

БИБЛИОТЕКА ЛЮБИТЕЛЯ АСТРОНОМИИ



П. Б. БАБАДЖАНОВ

•
**МЕТЕОРЫ
И ИХ
НАБЛЮДЕНИЕ**

БИБЛИОТЕКА ЛЮБИТЕЛЯ АСТРОНОМИИ



П. Б. БАБАДЖАНОВ

МЕТЕОРЫ
И ИХ
НАБЛЮДЕНИЕ



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1987

ББК 22.655
Б12
УДК 523.682(023)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ
Председатель Г. С. ХРОМОВ

Бабаджанов П. Б.

Б12. Метеоры и их наблюдение.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987 (Б-ка любителя астрономии)

Популярное изложение современных представлений о метеорах («падающих звездах»): об их природе и частоте появлений, о методах их исследования, о задачах и способах их наблюдения любителями астрономии. Приводятся результаты изучения главных метеорных потоков, распределения метеорных тел в межпланетном пространстве и притока метеорного вещества на Землю.

Для широкого круга любителей астрономии, членов астрономических кружков, лекторов и преподавателей.

Б $\frac{1705050000-089}{053(02)-87}$ 136-87

ББК22.655

Рецензент кандидат физико-математических наук *В. И. Цветков*

Пулат Бабаджанович Бабаджанов

МЕТЕОРЫ И ИХ НАБЛЮДЕНИЕ

Редактор *В. А. Бронштэн*

Художественный редактор *Т. Н. Кольченко*

Технический редактор *И. Ш. Аксельров*

Корректор *В. П. Сорокина*

ИБ № 12852

Сдано в набор 16.10.86. Подписано к печати 27.03.87. Т-10302. Формат 84×108/32.
Бумага тип. № 2. Гарнитура обыкновенная. Печать высокая.
Усл. печ. л. 10,08. Усл. кр.-отт. 10,5. Уч.-изд. л. 9,98.
Тираж 94 000 экз. Заказ № 3212 Цена 35 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

2-я типография издательства «Наука»
121099 Москва Г-99, Шубинский пер., 6

© Издательство «Наука».
Главная редакция
физико-математической литературы, 1987.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга состоит из шести глав. В первой главе дан краткий обзор истории становления и развития науки о метеорах. Во второй главе кратко описываются современные средства и методы наблюдений метеоров: фотографические, радиолокационные, телевизионные и прямые. Третья глава посвящена некоторым наблюдательным данным о метеорах, таким, как численность и звездные величины, высоты и скорости, состав и структура метеороидов. В четвертой главе изложена простейшая физическая теория метеоров и ее приложения. В главе пятой рассматриваются связь метеорных потоков с кометами, структура метеорных роев, распределение метеорных тел в околоземном космическом пространстве, приток метеорного вещества на Землю, а также вопросы метеороидной безопасности космических аппаратов. Шестая глава посвящена методике визуальных и простейших фотографических наблюдений метеоров. Здесь же приводятся некоторые рекомендации по наблюдению болидов и поиску метеоритов.

В приложении приведены полезные для любителей астрономии таблицы. Таблица I составлена И. С. Астаповичем и А. К. Терентьевой и ранее была опубликована в постоянной части «Астрономического календаря». Таблица I содержит основные данные о главных метеорных потоках, хорошо известных по визуальным наблюдениям. Она составлена по многолетним наблюдениям, главным образом, любителей астрономии. Дальнейшее всестороннее изучение этих потоков безусловно представляет большой интерес.

Сведения о главнейших малых потоках приведены в постоянной части «Астрономического календаря». Структура, свойства, происхождение и эволюция малых потоков изучены пока недостаточно, так как для них мы распола-

гаем малочисленными наблюдательными данными. Наблюдения малых метеорных потоков представляют большое поле деятельности для любителей астрономии.

В таблице II приведены радианты комет, орбиты которых сближаются с земной орбитой на расстояние, равное или меньшее 0,05 а. е., по данным Дж. Драмонда, полученным на основе точного каталога кометных орбит Б. Марсдена.

Таблица III, составленная Р. Л. Хотинком, служит для определения коэффициентов замечаемости при групповых наблюдениях и для определения полного числа метеоров.

Автор глубоко признателен кандидату физико-математических наук Ю. В. Обрубову, который просмотрел всю рукопись книги и помог в подборе иллюстраций. Отдельные разделы рукописи были внимательно прочитаны кандидатами физико-математических наук Р. Ш. Бибарсовым и В. М. Колмаковым, которым автор выражает свою благодарность.

Автор заранее благодарит всех читателей, которые пришлют свои отзывы, замечания и пожелания.

ВВЕДЕНИЕ

Ясной темной ночью, наблюдая величественную и неповторимую по своей красоте панораму неба, усеянного тысячами звезд, образующих знакомые нам с детства созвездия и серебряный пояс Млечного пути, можно заметить, как вдруг бесшумно и быстро прочерчивает небо яркая «падающая звезда». Разбрызгивая по сторонам множество искр, она исчезает так же неожиданно, как и появилась. После нее иногда остается белесая полоска следа, которая вскоре растворяется в ночном небе. Это *метеор*, интересное природное явление, знакомое человеку с незапамятных времен.

Метеоры, особенно в последние годы, привлекают пристальное внимание астрономической науки. Они уже многое рассказали и о нашей Солнечной системе, и о самой Земле, в частности о земной атмосфере. Более того, метеоры, образно говоря «вернули долг», возместили средства, затраченные на их изучение, внося существенный вклад в решение некоторых практических задач науки и техники. Исследование метеоров активно проводится в нашей стране и за рубежом как профессионалами, так и энтузиастами — любителями астрономии. Прежде чем рассказать, для чего и как изучают метеоры, уточним некоторые термины.

Твердое тело, движущееся в межпланетном пространстве, размером меньше астероида (малой планеты) и больше атома или молекулы, называют *метеорным телом*, или *метеороидом*. Обращаясь вокруг Солнца, наша Земля сталкивается с мириадами метеорных тел, в одиночку и целыми потоками движущихся по самым разнообразным траекториям около Солнца.

Вторгаясь в земную атмосферу со скоростью от 11 до 72 км/с, метеорное тело нагревается до нескольких тысяч кельвинов; испаряясь, оно ярко светится и вскоре прекращает самостоятельно существовать.

Мы наблюдаем не вторгнувшееся в атмосферу и раскалившееся тело — метеороид (из-за незначительности его размеров), а некий светящийся объем, окружающий и сопровождающий метеороид вдоль его траектории в земной атмосфере. Световое явление, имеющее вид «падающей звезды» и вызванное испарением метеорного тела, называют *метеором*. Метеоры, более яркие, чем Венера, обычно называют *болидами*. Чрезвычайно яркие болиды имеют вид горящей головки или огромного шара с хвостом. Такие болиды иногда видны даже днем.

Если метеороид имеет сравнительно большую массу и достаточную плотность, а его скорость относительно невелика, то, не успев полностью испариться в атмосфере, часть метеорного тела падает на поверхность Земли. Эту выпавшую часть называют *метеоритом*.

Естественно, что встреча метеорных тел происходит не только с Землей, но и с другими планетами Солнечной системы. Для планет и их спутников, не защищенных или слабо защищенных атмосферой, встреча с метеорными телами приводит к образованию многочисленных кратеров и воронок. Это подтверждают фотографии поверхностей Луны, Марса, Меркурия, спутников Марса и планет-гигантов, полученные с близких расстояний автоматическими межпланетными станциями.

«Падающие звезды», или метеоры, ничего общего не имеют со звездами. Звезды, как и наше Солнце, являются огромными раскаленными газовыми шарами и только из-за громадных расстояний до них кажутся нам светящимися точками.

Метеоры наблюдают в течение столетий, но только в последние три-четыре десятилетия стали четко выясняться природа, физические свойства, характер орбит и происхождение космических тел, порождающих «падающие звезды».

Возрастающий интерес, который в настоящее время проявляется к малым телам Солнечной системы и, в частности, к метеороидам, вполне объясним. Прежде всего, изучение траекторий, процессов свечения и ионизации метеоров важно для выяснения их физической природы, а метеорные тела — это, как-никак, прибывшие к Земле «пробные порции» вещества из различных районов Солнечной системы.

Совместно со своими близкими «родственниками» — кометами и астероидами — метеороиды составляют популяцию малых тел Солнечной системы. Согласно современ-

ным представлениям малые тела являются реликтами (остатками) того вещества, из которого около 4,5 млрд лет назад образовались планеты Солнечной системы. Благодаря их ничтожным массам состав и физико-химические свойства малых тел остались почти такими же, как при образовании планетной системы. Под действием силы тяжести, внутреннего тепла, вулканической деятельности, ядерных и химических реакций вещество больших тел — Солнца, планет (в том числе Земли) и Луны — со временем сильно изменилось. Вещество же комет и метеорных тел сохранилось в «первозданном» виде. Поэтому малые тела содержат весьма важную информацию о тех условиях, которые господствовали в начальной стадии формирования Солнечной системы и, в частности, Земли, на которой затем зародилась жизнь и образовалась развитая цивилизация.

Исследование физических явлений, сопровождающих полет метеорного тела, дает богатый материал для изучения физических и динамических процессов, происходящих в так называемой метеорной зоне земной атмосферы, охватывающей высоты около 60—120 км. Для этих слоев атмосферы метеоры, пожалуй, остаются наиболее эффективным «исследовательским инструментом» даже на фоне нынешнего размаха исследований с помощью космических аппаратов. Изучение верхних слоев земной атмосферы при помощи искусственных спутников Земли и высотных ракет было начато около 30 лет тому назад. Однако искусственные спутники дают сведения об атмосфере на высотах более 130 км, на меньших высотах спутники, так же как и метеороиды, сгорают в плотных слоях атмосферы. Что же касается ракетных измерений, то они проводятся только над фиксированными пунктами земного шара и носят кратковременный характер.

В настоящее время для изучения метеорного комплекса Солнечной системы применяются как различные наземные методы — визуальные, фотографические, радиолокационные и телевизионные наблюдения, так и космические, при которых метеорные частицы регистрируются с помощью различных датчиков, устанавливаемых на космических аппаратах.

В последние десятилетия интерес к метеорам значительно возрос в связи интенсивным освоением околоземного космического пространства. Важной практической задачей стала оценка так называемой метеорной опасности на различных космических трассах. Поэтому изучение

метеорных частиц прочно вошло и в космические программы. Так, например, с помощью искусственных спутников, космических зондов и геофизических ракет получают ценные сведения о движущихся в межпланетном пространстве мельчайших метеороидах. Вот одна лишь справка: устанавливаемые на космических аппаратах датчики позволяют регистрировать удары метеороидов, размеры которых измеряются тысячными долями миллиметра.

В отличие от других небесных тел, диапазон масс метеорных тел весьма велик, от 10^{-13} г до сотен тонн, т. е. охватывает величины, отличающиеся более чем в 10^{20} раз, или, как говорят, на двадцать порядков. Изучая массы, скорости, численность и направления движения метеороидов, можно создать основу для построения теории происхождения и эволюции метеорного вещества.

В книге приводятся современные данные о метеорах, метеорном веществе в Солнечной системе, а также рекомендации по визуальным и фотографическим наблюдениям метеоров, доступным широкому кругу любителей астрономии.

КРАТКИЙ ОЧЕРК РАЗВИТИЯ НАУКИ
О МЕТЕОРАХ

Слово *метеор* происходит от греческого «метеорос» (во множественном числе «метеора») и дословно означает «явление вверху» или «предмет, парящий в воздухе». Еще в IV в. до н. э. греческий ученый и философ Аристотель (384—322 г. до н. э.) утверждал, что метеоры являются земными испарениями, которые, поднимаясь вверх и приближаясь к сфере огня*), загораются. В результате мы наблюдаем их как падающие звезды.

Почти до XVIII столетия на многие явления природы, в том числе на метеоры, придерживались взглядов Аристотеля, который считался общепризнанным авторитетом во всех областях естествознания. Даже в изданной в 1823 г. книге известного немецкого ученого И. Боде (1743—1826), одного из авторов знаменитого закона планетных расстояний — правила Тициуса — Боде, «Руководство по изучению звездного неба», о метеорах можно было прочесть следующее: «...Явления падающих звезд должны совершаться выше всех облаков в самой высокой области атмосферы, когда смесь легких горючих веществ внезапно воспламеняется там под влиянием электричества воздуха или от химического брожения и разложения и затем падает отвесно вниз. Так называемые блуждающие огни, факелы, горящие столбы и другие светящиеся метеоры имеют, вероятно, частью одинаковый характер с падающими камнями и отличаются от них только по величине, частью же могут образовываться из густых и тяжелых испарений нижних слоев воздуха. Эти испарения издают фосфорический свет вследствие брожения их первичной материи, а от ветра принимают различные случайные формы и движутся... Иногда эти явления оказы-

*) Согласно Аристотелю земная часть мира состоит из четырех элементов: земли, воды, воздуха и огня, которые в виде концентрических сфер расположены друг над другом в «подлунном мире» в такой же последовательности.

ваются даже вовсе не метеорами, а происходят от некоторых светящихся насекомых, которые часто в ночное время перелетают большими роями. Порой можно также видеть ночью большие огненные и блестящие шары, проносящиеся быстро по воздуху, скорость которых во много раз превышает скорость полета пушечного ядра. Поэтому современные естествоиспытатели отказались от мнения, что эти явления происходят от испарений нашей атмосферы и считают их (как уже некогда считал Галлей) за особые тела, которые стягиваются вместе под влиянием силы тяготения в одно целое повсюду в мировом пространстве и с которыми Земля встречается на своем пути.

В XVIII в. термин «метеор» применялся к совершенно различным по природе атмосферным явлениям. Метеоры подразделялись на три типа: 1) «воздушные метеоры», к которым относились ветер, бури, смерчи, ураганы и т. п.; 2) «гидрометеоры», означающие дождь, снег, град, росу, туман и т. п. (этот термин употребляется и поныне в том же смысле); 3) «огненные метеоры» — молнии, северные сияния, ложные Солнца, «падающие звезды» и «огненные шары» — болиды. С тех пор термин «метеор» используется как корень слова, описывающего нижеатмосферные явления, *метеорологии*, — науки, которая в тот период только начала развиваться.

Французский часовой мастер Р. А. Кувье-Гравье, живший в конце XVIII в. в Париже, пытался по наблюдениям метеоров предсказывать погоду. Для того чтобы иметь возможность постоянно вести наблюдения, он переселился на окраину города и оборудовал там специальную площадку для своих наблюдений. Конечно, он не смог предсказывать погоду, но позже накопленные им сведения были использованы итальянским астрономом Дж. Скиапарелли (1835—1910) для определения скорости полета метеоров и составления их астрономической теории.

Считая метеоры земными испарениями, даже научные авторитеты к сведениям о падении камней с неба относились весьма иронически. Так, официальное сообщение (акт) о падении камня с неба на глазах трехсот жителей города Жульяка (Гаскония, 24 июля 1790 г.), в том числе и мэра города, на заседании Парижской Академии наук было поднято на смех и в принятом постановлении выражалось сожаление по поводу наивности гасконцев, а подписанный очевидцами во главе с мэром Жульяка протокол о падении метеорита назывался «...подлинным»

удостоверением заведомо ложного факта, физически невозможного явления». Что же касается вещественного доказательства — метеорита, то по поводу него Парижская Академия наук заявила, что он является просто земным камнем, в который ударила молния. В то время метеориты были известны как «громовые камни». Думали, что черная расплавленная корка на метеоритах обусловлена ударом молнии. Другая часть ученых XVIII века приписывала падение камней с неба «сгущению» воздуха под действием молний, а метеориты считались соответственно «камнями молний», рождающихся в атмосфере при грозе. В то время было широко распространено мнение о том, что болиды имеют электрическое происхождение. Таким образом, два родственных явления — болиды и метеориты — порознь привязывались к чуждому им третьему явлению — грозе.

В противоположность таким взглядам о природе метеоров и метеоритов еще некоторые древнегреческие ученые были убеждены, что камни падают на Землю извне, а метеорные дожди являются небесными фейерверками. Так, древнегреческий ученый Плутарх (50—125 гг. н. э.) писал, что «падающие звезды, по мнению некоторых физиков, суть не извержения или истечения эфирного огня, который потухает в воздухе тотчас же после воспламенения, а также не вспыхивание воздуха, который распадается в высших областях, а это, скорее всего, падение небесных тел, которые устремляются вниз вследствие некоторого ослабления центробежной силы и отбрасываются в сторону вследствие неправильного движения; при этом они могут падать не только на заселенную Землю, но и в открытое море, где их уже нельзя найти».

Но эти и подобные им идеи противоречили традициям и, не подкрепленные измерениями и другими доказательствами, особого успеха не имели. На протяжении почти двух тысяч лет господствующим взглядом на природу метеорных явлений оставалось ничем не обоснованное предположение Аристотеля.

После многовекового застоя в развитии астрономической науки, в том числе представлений, относящихся к метеорам, лишь в конце XVII в., когда уже утвердилась гелиоцентрическая система мира и были открыты четыре спутника Юпитера, пять спутников и кольцо Сатурна, стали обращать внимание и на метеорные явления.

В 1686 г. английский королевский астроном Эдмонд Галлей (1656—1742), незадолго до этого открывший зна-

менитую комету (1682 г.), названную впоследствии его именем, высказал гипотезу о космической природе тел, порождающих метеоры и болиды. Он определил высоту и скорость очень яркого болида, с грохотом пролетевшего над Англией 19 марта 1719 г.

С 1734 г. начали проводиться первые научные наблюдения метеоров и в России. Подлинным началом формирования метеорной астрономии следует считать рубеж XVIII—XIX вв., когда в 1794 г. в Риге была опубликована книга основателя науки о метеорах и метеоритах, члена-корреспондента Петербургской Академии наук Э. Ф. Ф. Хладни (1756—1827). В этой книге под названием «О происхождении найденной Палласом и других подобных ей железных масс и о некоторых связанных с этим явлениях природы» Э. Хладни, на основе всестороннего изучения данных о траекториях, высотах, яркости и скорости болидов, наблюдавшихся с 1676 по 1783 г., обстоятельств падений «небесных камней», исследований метеоритов и особенно «Палласова железа», с глубокой проницательностью четко провозгласил космическое происхождение «громовых камней», болидов и метеоров. В этой, а также в другой своей книге, изданной в 1819 г., он установил связь между болидами и метеоритами, с одной стороны, и между болидами и метеорами, с другой. Он же впервые высказал мысль о возможной связи этих явлений с кометами.

История метеорита, называемого Палласовым железом такова. В 1749 г. оберштейгер (старший горный мастер) И. К. Меттих, обследовавший по показаниям отставного казака Якова Медведева месторождения полезных ископаемых на юге Красноярского края, обнаружил массивную железную глыбу на хребте горы, расположенной почти в 20 км от берегов Енисея. И. К. Меттиха удивили необычные вкрапления в глыбе желтых хрупких камешков величиной с кедровый орех и особый звон глыбы. Эту огромную железную массу местные жители считали святыней, упавшей с неба. Услышал об этой легенде и Я. Медведев, занимавшийся кузнечным делом, Привлеченный особой ковкостью, белизной железа и звонким тоном глыбы, Медведев, надеясь использовать ее при случае в деле, вскоре перевез эту массу во двор своего дома, находившегося в 30 км от того места, где она лежала неизвестно с каких пор. Находящийся в 1772—1773 гг. в экспедиции по Сибири молодой петербургский академик П. С. Паллас (1741—1811), получив донесение Меттиха,

заинтересовался загадочной глыбой «самородного железа», в которой камень и железо переплелись в причудливых сочетаниях. В 1772 г. он отправил пудовый образец глыбы в Петербург, а в 1777 г. туда была доставлена вся глыба весом около полутонны. Начиная с 1774 г. образцы этой уникальной глыбы были распространены среди научных обществ, музеев и частных лиц по всей Европе, что способствовало ее всестороннему изучению. Уникальность Палласова железа заключалась в том, что особенности его вещества явно исключали возможность земного происхождения. Его структуру и состав нельзя было объяснить представлениями или техническими возможностями того времени.

Книга Хладни была встречена западноевропейскими учеными враждебно. Но все же взгляды о космическом происхождении метеоров и «небесных камней» начали широко распространяться. В 1798 г. под влиянием идей Э. Хладни профессор физики Геттингенского университета и иностранный член Петербургской Академии наук Георг Лихтенберг (1742—1799) поручил двум своим студентам Г. В. Брандесу (1777—1834) и И. Ф. Бенценбергу (1777—1846) попытаться определить высоты возгорания и погасания метеоров. Для этой цели они использовали метод, который применяется для определения расстояний до недоступных предметов на Земле. С 11 сентября по 4 ноября 1798 г. были проведены одновременные наблюдения метеоров с двух пунктов, расположенных в предместьях Геттингена на расстоянии 14 км друг от друга. Было зарегистрировано 402 метеора. Проанализировав полученные данные, Брандес и Бенценберг пришли к заключению, что 22 из них были общими, т. е. появились в одно и то же время и имели близкую яркость. Средняя высота этих метеоров оказалась равной 98 км, а их скорость составляла несколько десятков километров в секунду, т. е. была сравнима со скоростью движения планет. Отсюда было заключено, что метеорные частицы должны приходить из областей пространства, находящихся далеко за пределами земного шара.

Через два месяца после выхода первой книги Хладни каменный метеорит выпал в Сиене (Италия), а с 1795 г. по 1803 г. в различных местах выпали еще 12 метеоритов, что способствовало признанию взглядов Хладни большинством ученых. После того как 26 апреля 1803 г. близ города Л'Эгль (Франция) выпал обильный метеоритный дождь и с площади около 40 кв. км было собрано

более трех тысяч камней, Парижская Академия наук была вынуждена признать факты выпадения метеоритов действительными. На место падения метеоритного дождя был послан известный физик, астроном и геодезист Ж. Б. Био (1774—1862). По возвращении он представил Академии подробный отчет, подтверждающий рассказы свидетелей. В заключении Био писал, что «поставил вне сомнения самый поразительный феномен, который когда-либо наблюдался людьми».

Большой вклад в распространение знаний о метеорах и метеоритах внес профессор Харьковского университета А. Стойкович, который в 1807 г. опубликовал книгу «О воздушных камнях и их происхождении». В Петербурге в 1819 г. химик И. М. Мухин опубликовал большую книгу о метеорных и метеоритных явлениях «О чудесных дождях (или необыкновенных) и о ниспадающих из воздуха камнях (аэролитах)», в которой он подробно рассказал о химическом составе метеоритов и выдвинул ряд гипотез об их происхождении.

Но для того чтобы узнать, по каким же орбитам движутся в космическом пространстве тела, порождающие болиды и метеоры и иногда выпадающие на поверхность Земли в виде метеоритов, недоставало знаний направлений их движения.

12 ноября 1799 г. находившиеся в Южной Америке выдающийся немецкий естествоиспытатель и путешественник Александр Гумбольдт и его спутник, французский ботаник Э. Бонплан, стали очевидцами феноменального метеорного дождя Леонид. Начиная с 2^ч 30^м ночи и вплоть до восхода Солнца, в течение четырех часов, они увидели тысячи падающих звезд. Собрав все сведения об этом метеорном дожде, Гумбольдт пришел к заключению, что это явление наблюдалось по всей Америке до Гренландии. Кроме того, из расспросов местных жителей он установил, что такой же дождь «падающих звезд» наблюдался и в 1766 г. Самым важным из наблюдений Гумбольдта было то, что он первый обратил внимание на факт расхождения путей метеоров из одной точки, находящейся в созвездии Льва. К сожалению, Гумбольдт опубликовал свои наблюдения только в 1816 г. и они стали известны лишь после дождя Леонид 1833 г.

В ночь с 12 на 13 ноября 1832 г. наблюдался обильный метеорный дождь над обширной территорией Евразии. Но особенно впечатляющим был метеорный дождь, наблюдавшийся 12 ноября 1833 г. в западном полушарии (в восточ-

ном был день) и привлечший внимание общественности и широких научных кругов. Разыгралось редкое захватывающее зрелище, настоящий «звездный» фейерверк. Метеоры и болиды были настолько многочисленны, что напоминали густо падающие хлопья снега в зимнюю метель. При этом легко можно было заметить, что все они исходили из одной единственной точки неба, названной радиантом*) и, так же как и в 1799 г., находящейся в созвездии Льва (отсюда и название потока — Леониды, т. е. «дети Льва»; «Лео» — по-латыни Лев, а «ид» или «нид» являются греческими окончаниями, придаваемыми потокам. Метеорные потоки именуются по созвездиям, в которых находятся их радианты; см. также § 2 гл. V). Радиант имел неизменное положение относительно звезд, участвовал в суточном вращении неба и, следовательно, не был связан с Землей.

Одним из очевидцев этого метеорного дождя был Д. Олмстед, профессор Йельского колледжа в Нью-Хэвене (США), который подробно описал картину дождя Леонид 1833 г. и правильно объяснил сходжение продолженных назад путей метеоров в радианте влиянием эффекта перспективы, обусловленного пересечением Землей потока параллельно движущихся космических частиц. Ноябрьский дождь Леонид 1833 г. вызвал большой интерес ученых к метеорным явлениям. Анализируя все имеющиеся данные о наблюдениях Леонид, немецкий астроном В. Ольберс в 1837 г. пришел к заключению, что метеорный дождь Леонид обусловлен прохождением Земли в ноябре сквозь рой метеорных частиц, наиболее плотная часть которого встречается с Землей через каждые 33 года и что Леониды снова станут захватывающим зрелищем в 1866 г.

Действительно, в 1866 г., в соответствии с предсказаниями Ольберса, вновь наблюдался обильный «звездный» дождь Леонид. В 1867—1868 гг. поток был достаточно сильным, но в последующие годы надолго ослабел.

В 1867 г. появилось сообщение итальянского астронома Джованни Скиапарелли о том, что метеоры 9—11 августа 1866 г., с радиантом в созвездии Персея имеют точно такую же орбиту, что и открытая в 1862 г. комета Свифта — Туттля. В том же 1867 г. было установлено, что орбита

*) В 1832 г., наблюдая метеорный поток Леонид, явление радиации заподозрил и курский астроном-самоучка Ф. А. Семенов, но его наблюдения были опубликованы много лет спустя.

метеорного роя Леонид, вычисленная У. Леверье и Дж. Скиапарелли, совпадает с орбитой слабой кометы Темпля — Туттля.

Вскоре была установлена родственная связь еще одного метеорного потока с кометой 1861 I, но несколько иным способом, который применяется и поныне. А именно, в 1867 г. австрийский ученый Э. Вейс, исходя из элементов орбит комет, вычислил теоретические «кометные» радианты и сравнил их с имеющимися к тому времени наблюдениями метеорных потоков. Оказалось, что теоретический радиант кометы 1861 I совпадает с открытым в 1838 г. радиантом наблюдаемого в апреле метеорного потока Лирид. Эти впечатляющие и важные астрономические открытия доказывали связь метеоров и комет, подтвердив гипотезу Э. Хладни и английского ученого Д. Кирквуда о том, что метеорные рои являются продуктом разрушения ядер комет, вещество которых распределилось вдоль их орбит. За установление родства комет и метеоров Дж. Скиапарелли был удостоен золотой медали английского Королевского астрономического общества.

Наиболее убедительным эффектным доказательством связи комет и метеорных потоков явился метеорный дождь Андромедид, наблюдавшийся в ноябре 1872 г., краткая предыстория которого такова. Еще в 1826 г. чех В. Биэла открыл комету с периодом обращения вокруг Солнца 6,8 лет. При появлении в 1846 г. комета распалась на две части, каждая из которых имела характерные для комет оболочку и хвост. После разделения обе кометы двигались по очень близким орбитам. В следующем появлении, в 1852 г., расстояние между ними существенно увеличилось и составило около 3 млн км. Возвращения этой пары комет ожидали в 1859 и 1866 гг., но их поиски были безуспешными — кометы исчезли. 27 ноября 1872 г. при пересечении Землей кометной орбиты в течение нескольких часов наблюдался обильный «звездный дождь» (13 000 метеоров в час) с радиантом в созвездии Андромеды. Орбита метеорного роя оказалась тождественной с орбитой исчезнувшей кометы Биэлы. «Звездный дождь» повторился и 27 ноября 1885 г. Отсюда был сделан вывод, что метеорный дождь Андромедид (который иногда, по названию кометы, называют Биэлидами) явился результатом встречи Земли с продуктами разрушения кометы.

Великолепные метеорные дожди Андромедид в 1872 и 1885 гг. способствовали повышению интереса к изуче-

нию метеоров. Установление родства комет и метеорных потоков в свою очередь требовало объяснения природы отделения метеорных частиц от ядер комет. В зависимости от воззрений на строение ядра кометы это отделение представлялось по-разному. Дж. Скиапарелли полагал, что ядро кометы состоит из компактного облака твердых частиц, связанных силой взаимного тяготения, но под действием притяжения Солнца частицы отрываются от этого облака и начинают двигаться самостоятельно. Постепенно рассеиваясь вдоль орбиты кометы, частицы образуют замкнутое кольцо.

Совершенно по-иному подошел к образованию метеорных потоков один из основателей кометно-метеорной астрономии, выдающийся русский ученый Ф. А. Бредихин (1831—1904). Во второй половине XIX столетия в серии своих работ он создал новую теорию происхождения и эволюции метеорных потоков, развивая свои классические исследования кометных хвостов. В 1877 г. он исследовал природу открытых им аномальных хвостов комет, направленных от кометы к Солнцу, и установил, что такие хвосты представляют собой следствие процесса образования метеорных потоков из крупных (поперечником более 0,01 мм) частиц кометной массы. Согласно Ф. А. Бредихину твердые частицы извергаются из ядра кометы потоками истекающих газов. Новая теория Ф. А. Бредихина существенно изменила воззрения астрономов на происхождение метеорных потоков и нашла свое подтверждение в современных исследованиях природы комет и структуры их ядер.

Следующим крупным шагом в развитии метеорной астрономии стал выход в 1884 и 1891 гг. классических монографий о метеорах петербургского ученого И. А. Клейбера (1860—1898). Они были посвящены астрономической теории метеоров, проблемам движения метеорных тел в земной атмосфере и определению их орбит. Эти работы не потеряли своего значения и по настоящее время.

Почти до 30-х годов XX века основным методом наблюдений метеоров был визуальный. Этот метод требовал хорошего знания созвездий и звезд до 3—4-й звездной величины, натренированного глаза и несложной аппаратуры (часы, карты неба и т. д.). На основании визуальных наблюдений в Англии У. Деннинг в 1899 г. опубликовал каталог 4367 радиантов, среди которых были и радианты одиночных, очень ярких метеоров.

Следующий каталог 1200 радиантов, составленный по визуальным наблюдениям членов Американского метеорного общества под руководством Чарльза Оливье, был опубликован в 1920 г. Он считал, что половина этих радиантов относится к реальным потокам, а остальные, по видимому, — к спорадическим метеорам.

В конце XIX в. в метеорной астрономии стали применяться фотографические методы наблюдений. Первая фотография метеора, принадлежащая метеорному дождю Андромедид, была получена 27 ноября 1885 г. в Праге Л. Вейнеком. Случайные фотографии метеоров стали все чаще появляться на снимках неба, полученных с помощью телескопов. В 1894 г. Х. Элькин на Йельской обсерватории начал проводить базисные (из двух пунктов) фотографические наблюдения метеоров. В 1900 г. для определения скорости метеоров он установил перед камерами вращающийся затвор (обтюратор), сделанный из велосипедного колеса и перекрывающий объективы от 6 до 10 раз в секунду. С 1893 по 1909 г. им были получены базисные фотографии 117 метеоров, но длина базиса составляла всего лишь 3,3 км, что было слишком мало для точных определений высот, скоростей и радиантов.

Систематические базисные фотографические наблюдения метеоров (из двух и даже трех пунктов, расстояние между которыми составляло несколько десятков километров) в 1901—1909 гг. проводил И. И. Сикора в Ташкенте. Полученные им снимки позволили надежно определить высоты метеоров, а в последующем они были профотометрированы с целью определения масс метеороидов. В 1904 г. профессор Московского университета С. Н. Блажко организовал систематическое спектрографирование метеоров в Московской обсерватории. Параллельно здесь проводилось и обычное фотографирование метеоров. В этих наблюдениях, кроме С. Н. Блажко, принимали участие П. И. Яшнов и И. Ф. Полак. Всего в 1904—1907 гг. С. Н. Блажко получил спектры трех метеоров, которые были тщательно им исследованы, а результаты опубликованы *).

В 20-х годах нашего столетия стала очевидной возможность и необходимость изучения физического состояния верхних слоев земной атмосферы и происходящих в ней процессов не только для науки, но и для насущных задач

*) Самый первый спектр метеора был получен в 1897 г. в Ареквине (Перу) случайно. Вышедшие на нем спектральные линии были ошибочно приписаны водороду.

повседневной жизни. В связи с этим сильно возрос интерес к метеорным явлениям, происходящим в этих слоях атмосферы. В этот период в нашей стране исследования метеоров велись систематически с применением усовершенствованных методов.

Обширные визуальные наблюдения метеоров проводились в различных городах нашей страны как отдельными астрономами-любителями, так и коллективами наблюдателей. Проведение любительских наблюдений координировалось в этот период Русским обществом любителей мирведения и Московским обществом любителей астрономии, позднее Всесоюзным астрономо-геодезическим обществом (ВАГО), организованным в 1932 г. Изучение метеоров и в настоящее время является одним из главных направлений деятельности Московского, Крымского, Томского, Таджикского и других отделений ВАГО. В 1935 г. в Государственном астрономическом институте им П. К. Штернберга при МГУ был создан отдел комет и метеоров, где С. В. Орлов, Н. Д. Моисеев, Т. В. Водопьянова и другие проводили теоретические работы по метеорной астрономии, включающие вопросы устойчивости и эволюции метеорных роев.

В 20-х—30-х годах советскими исследователями метеоров были достигнуты существенные успехи: был значительно усовершенствован метод визуальных наблюдений метеоров (И. С. Астапович); открыто большое количество радиантов и составлен их каталог; изучены физические характеристики метеоров (цвет, блеск, скорость и т. д.); исследованы структура потоков, эволюция орбит метеорных роев и связь метеорных потоков с кометами (В. В. Федынский, В. А. Мальцев); разработана методика фотографической фотометрии метеоров (Н. Н. Сытинская). Уже в те годы большое внимание уделялось метеорным методам исследования верхних слоев атмосферы и, в частности, изучению воздушных течений в верхней атмосфере по наблюдениям дрейфа метеорных следов. В этот период обширные визуальные наблюдения в Канаде проводились под руководством П. Миллмана, в Англии — под руководством Дж. Прентиса и затем У. Ф. Деннинга, в США — под руководством Ч. Оливье.

В конце 30-х годов и в послевоенные годы большое внимание уделялось наблюдениям слабых метеоров ($+6$ — $+12^m$) с помощью биноклей и бинокулярных труб (И. С. Астапович, В. Н. Петров, А. М. Бахарев, Г. О. Зайцевич, О. В. Добровольский, В. Е. Штепан и др.).

Одной из важнейших проблем является взаимодействие метеорных тел с атмосферой Земли, т. е. построение физической теории метеоров. Задачу о движении метеорных тел в земной атмосфере в 1922 г. рассмотрел В. Г. Фесенков. В 1923 г. Ф. Линдеман и Дж. Добсон опубликовали работу, в которой пытались создать физическую теорию метеоров и применить ее для определения плотности и температуры атмосферы. Хотя их результаты представляют лишь исторический интерес, они все же способствовали развитию исследований верхней атмосферы метеорными методами. Дальнейшее развитие физическая теория метеоров получила в работах К. Спарроу (формула потери массы метеорного тела), Э. Эпика (основы теории свечения метеоров) и У. Фишера (формула, связывающая изменение массы и скорости метеорного тела). Большую роль в развитии представлений о физике метеорных явлений сыграла опубликованная в 1937 г. работа И. Хоппе, в которой был дан строгий вывод основных уравнений физической теории метеоров.

В 1939—1941 гг. Б. Ю. Левин опубликовал несколько работ, в которых подробно рассмотрел различные вопросы физической теории метеоров. Позже, в 1956 г. он опубликовал монографию «Физическая теория метеоров и метеорное вещество в Солнечной системе», которая на протяжении почти четверти века была единственной книгой, посвященной вопросам физической теории метеоров. На основе этой теории в монографии сделан ряд важных выводов о структуре метеорных потоков и роли метеороидной составляющей межпланетного пространства. Итогам и достижениям исследований по физике метеорных явлений за последние десятилетия посвящены монографии В. Н. Лебединца и В. А. Бронштэна, изданные в 1980—1981 гг.

Важным этапом в изучении метеоров и верхней атмосферы Земли метеорными методами явилось широкое применение фотографических методов исследований. Начиная с 1932 г. под руководством В. В. Федынского, базируясь на фотографировании метеоров из двух пунктов стало проводиться в Москве. В. В. Федынский и К. П. Станюкович первыми в нашей стране использовали фотографические наблюдения метеоров для изучения физических условий в верхних слоях земной атмосферы.

В Гарвардской обсерватории базисные фотографические наблюдения метеоров с использованием малых камер были организованы Ф. Уипплом в 1936 г. (объектив «Росс-Экспресс», $D=3,75$ см, $F=15$ см, поле зрения 50°). По

данным этих наблюдений были вычислены массы метеорных тел, а также определена плотность атмосферы на высотах 60—110 км.

В тридцатых годах господствовала идея существования широкого класса метеорных тел, приходящих к нам по гиперболическим орбитам из межзвездного пространства. Эта идея, развитая Э. Эпиком, основывалась на результатах визуальных наблюдений Аризонской метеорной экспедиции (1931—1933 гг.), согласно которым 60% наблюдавшихся метеоров имели якобы гиперболические орбиты. К гиперболическим был отнесен даже поток Таурид (радиант в созвездии Тельца, по-гречески «Таурус»).

Базисные фотографии 14 метеоров потока Таурид показали, что метеороиды этого роя движутся по замкнутым, эллиптическим орбитам и, более того, имеют весьма малый период обращения вокруг Солнца, равный 3,3 года. Исследование элементов орбит сфотографированных Таурид позволило установить связь этого потока с короткопериодической кометой Энке—Баклунда. Но этим проблема гиперболических метеоров еще не была закрыта, так как согласно Эпику доля гиперболических орбит резко уменьшается с увеличением блеска, а для ярких метеоров (ярче -1^m), фотографируемых малыми камерами, и для болидов доля гиперболических метеоров ничтожно мала. Поэтому полученные Уипплом результаты еще не доказывали отсутствие гиперболических метеоров. В 1950—1951 гг. специально для метеорных наблюдений были изготовлены светосильные камеры Супер-Шмидт и с их помощью в 1951—1953 гг. были сфотографированы метеоры до $+3,5^m$, т. е. почти такого же диапазона блеска, что и наблюдаемые визуально. В результате обработки полученных снимков выяснилось, что если гиперболические метеоры и существуют, то их доля весьма незначительна и не превышает 1%. Так была развенчана идея о существовании широкого класса гиперболических метеоров, и в 1969 г. Эпик вынужден был признать, что «неудачи неизбежны, но и не напрасны: иногда они дают нам даже больше, чем успех».

В 1938 г. систематические фотографические наблюдения метеоров были начаты в Душанбе, на Таджикской астрономической обсерватории. Для этой цели в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга и в Московском отделении ВАГО был разработан и изготовлен специальный метеорный патруль, состоящий из четырех отдельных агрегатов. Каждый агрегат состоял из семи камер с объективами «Индустар-7» ($D=3,0$ см,

$F=10,5$ см). Камеры одного агрегата фотографировали область неба почти в $11\,000$ кв. градусов, от зенита до зенитного расстояния 50° во все стороны. Три агрегата патруля, один из которых был смонтирован на параллактической установке с часовым механизмом, были размещены на территории обсерватории. Четырехсекторный обтюратор, установленный над одним из агрегатов, 16 раз в секунду закрывал объективы камер и служил для определения скорости метеора. Третий агрегат в основном пункте предназначался для получения спектров метеоров. Четвертый агрегат был размещен на расстоянии 38 км от обсерватории и обеспечивал определение высот и радиантов метеоров. В 1939—1954 гг. с помощью этого метеорного патруля за 1415 часов работы был сфотографирован 161 метеор, из которых 105 (65%) из двух пунктов. Под руководством Л. А. Катасева были определены радианты, высоты, скорости и орбиты 73 метеоров, которые приведены в его монографии «Фотографические методы метеорной астрономии», изданной в 1957 г.

В 50-х годах в связи с программой всестороннего изучения околоземного космического пространства, подготовкой и проведением исследований по программе Международного геофизического года широко развернулись и получили всестороннее развитие исследования метеорных явлений с помощью новых метеорных патрулей, а также радиолокационным методом и путем прямых измерений с помощью высотных ракет и ИСЗ. В 1955 г. в Ашхабадской астрофизической лаборатории АН ТССР были начаты фотографические наблюдения метеоров с помощью автоматической метеорной станции АМС-1, состоящей из 10 камер с объективами «Уран-9» ($D/F = 1:2,5$ и $F = 25$ см, поле зрения $40 \times 50^\circ$). В Институте астрофизики АН Таджикской ССР в 1956 г. был создан новый метеорный патруль, состоящий из 21 камеры с объективами «Уран-9», смонтированными на параллактических установках.

В 1957 г. в Одессе, Киеве и Ашхабаде были установлены метеорные патрули, состоящие из камер с объективами «Уран-9» и покрывающие область неба в 6400 кв. градусов. Один из агрегатов был снабжен обтюратором с подвижным крылом конструкции Е. Н. Крамера.

Большая работа по исследованию физики метеорных явлений была проведена П. Миллманом в Канаде. Для этой цели в 1956—1957 гг. недалеко от Оттавы была построена специальная метеорная обсерватория. В ЧССР широкое изучение метеоров фотографическим методом

было организовано В. Гутом и З. Цеплехой. Базисное фотографирование метеоров проводилось с помощью камер с объективами «Тессар» ($D/F=1:4,5$, $F=18$ см). Всестороннее исследование метеоров и метеорных потоков проводится Астрономическим институтом Словацкой АН под руководством Л. Кресака и Я. Штола.

Важным вопросом, привлечшим внимание исследователей в последние десятилетия, является вопрос о структуре и природе метеорных тел. Для решения этой проблемы большое значение имеют спектры метеоров, которые позволяют судить о химическом составе метеорных тел и условиях их свечения.

Начиная с 30-х годов успешные спектрографические исследования метеоров проводятся как у нас в стране, так и за рубежом. В настоящее время активные фотографические и спектральные наблюдения метеоров ведутся Институтом астрофизики АН Таджикской ССР, Астрономическими обсерваториями Киевского и Одесского университетов, коллективами Московского и Крымского отделений ВАГО и другими учреждениями.

Начиная с 1964 г. в ряде стран, а именно в США, ЧССР, ГДР и ФРГ (1964), Канаде (1971) и Великобритании (1973), были созданы сети станций для фотографических наблюдений болидов. Основная цель болидных сетей заключалась в определении высот, скоростей, радиантов и орбит болидов, сопровождающихся выпадением метеоритов. К настоящему времени сетями получены снимки нескольких тысяч болидов, но лишь два из них завершились выпадением и находкой метеоритов (Лост Сити в США, 1970; Иннисфри в Канаде, 1977).

В начале 30-х годов в различных странах было замечено, что имеется связь между ионизацией земной атмосферы и метеорными явлениями (радиоинженер и любитель астрономии Н. А. Иванов в СССР, М. Нагаока в Японии, А. М. Скеллетт в США и др.). Но в ту пору ученые, занимающиеся наблюдательными и теоретическими вопросами метеорной астрономии, не имели достаточных связей со специалистами по распространению радиоволн. Поэтому использование радиолокационной техники в качестве инструмента метеорных исследований получило широкое развитие лишь после второй мировой войны и впоследствии стало мощным методом исследования метеоров.

В 1945 г. Дж. Хей и Г. Стюарт в Великобритании впервые применили радиолокационную аппаратуру для наблюдений метеоров, Систематические наблюдения метеоров по-

вым методом проводятся с 1946 г. В крупной радиоастрономической обсерватории Джордrell Банк вблизи Манчестера Дж. Клегг и другие под руководством Б. Ловелла широко развернули теоретические и экспериментальные исследования метеоров. Центры по исследованию метеоров радиометодами возникли в США (У. Лиллер, Л. Маннинг, В. Эшлмен и др.), в Канаде (П. Миллман, В. Макинтош и др.) и других странах (Австралия, Новая Зеландия, Швеция, Чехословакия, Индия и др.).

В нашей стране первыми работами по радиолокации метеоров руководил Б. Ю. Левин. Вместе с П. О. Чечиком в 1946 г. он провел радиолокационные наблюдения метеорного потока Драконида.

В 1953 г. под руководством Е. И. Фиялко в Томске были начаты пробные радионаблюдения метеоров Персеид и Геминид, а в 1956 г. была создана специализированная аппаратура для радиолокационных наблюдений.

В Казани систематические наблюдения метеоров радиометодом были начаты под руководством К. В. Костылева. Чуть позже радиолокационные наблюдения метеоров были начаты и в Душанбе.

Особенно успешно радиолокационные наблюдения метеоров проводились в Харькове. С помощью оригинальной аппаратуры, созданной под руководством профессора В. Л. Кашеева, были успешно измерены скорость метеоров, скорости и направления дрейфа метеорных следов и параметры атмосферы. Спустя несколько лет были начаты определения индивидуальных радиантов метеоров и орбит метеорных тел.

В дальнейшем радиолокационные исследования метеоров приняли в нашей стране еще более широкий размах и развитие. Регулярные измерения метеорной активности, исследование физики метеорных явлений и верхней атмосферы Земли по радионаблюдениям метеорных следов, определение радиантов, высот, скоростей и орбит метеоров, начиная с 1957 г., велись по программе Международного геофизического года (1957—1958), а затем по проектам: Международное геофизическое сотрудничество (1959), Международный год спокойного Солнца (1964—1965), Международный год активного Солнца (1969) и др. В исследованиях принимали участие ученые Казани, Харькова, Обнинска, Душанбе, Киева, Ашхабада, Фрунзе, Томска. Эти города и в настоящее время являются активными центрами радиометеорных исследований, проводимых в Советском Союзе.

В результате проведенных экспериментов и наблюдений стало очевидно, что задачи метеорной астрономии и геофизики (такие, как распределение радиантов в северной и южной полусферах неба, приток метеорного вещества на Землю, его распределение в околоземном пространстве и особенно вопросы глобальной циркуляции атмосферы) можно решить путем многолетних наблюдений метеоров одновременно из нескольких пунктов, значительно разнесенных друг от друга по широте и долготе.

В процессе развития сети радиометеорных станций сложилась такая ситуация, что к концу 60-х годов основная часть станций наблюдения находилась в средних широтах северного полушария ($38\text{--}55^\circ$ с.ш.), а также в Арктике и Австралии (35° ю.ш.). В то же время отсутствовали наблюдательные данные о движении верхней атмосферы в экваториальной зоне. Поэтому с целью изучения особенностей движений верхней атмосферы в экваториальной зоне, а также для определения метеорных радиантов и скоростей в северной и южной полусферах неба, в 1968—1970 гг. по инициативе члена-корреспондента АН СССР В. В. Федынского была организована Советская экваториальная метеорная экспедиция (СЭМЭ) в Сомали. Выполнение программы работ СЭМЭ было поручено Институту астрофизики АН Таджикской ССР и Харьковскому политехническому институту. В течение двух лет под руководством автора этих строк и профессора Б. Л. Кащеева экспедиция провела в экваториальной Африке (2° с.ш., 45° в.д.) комплексные наблюдения метеоров.

В результате двухгодичной работы СЭМЭ и радиолокационных наблюдений метеоров в Душанбе и Харькове, проводившихся параллельно, были получены уникальные данные о динамике верхней атмосферы в метеорной зоне над экватором, о тонкой структуре движения атмосферы, о сравнительном притоке метеорного вещества в южное и северное полушария Земли.

Программа освоения околоземного пространства предусматривала полеты человека в космос. Это требовало решения целого ряда сложнейших вопросов, в том числе оценки метеорной опасности для ИСЗ. Изучение околоземной метеороидной обстановки с помощью различных датчиков, устанавливаемых на высотных ракетах и искусственных спутниках Земли, было начато в 50-х годах. Датчики регистрировали удары метеорных частиц. Разработка датчиков ударов метеорных частиц и обработка результатов

измерений проводилась в нашей стране под руководством Т. Н. Назаровой.

В Москве в 1958 г. состоялась Ассамблея Специального комитета Международного геофизического года. Активное участие в ее работе приняли советские исследователи метеоров. В частности, был сделан важный вывод о ничтожности метеорной опасности для космонавта в скафандре во время выхода в открытый космос.

Со времени исторического полета Юрия Алексеевича Гагарина в космос прошло более четверти века. За это время совершили полеты в космос более ста человек, причем с длительными пребываниями на орбите и с выходами в открытый космос. Ни один космонавт не пострадал от ударов метеорных частиц.

Увеличение протяженности космических трасс и продолжительности полетов требуют дальнейшего, все более углубленного изучения метеоров и метеорного вещества в межпланетном пространстве различными методами.

Начиная с 1980 г. по инициативе советских ученых проводится большой объем исследований в рамках Международной программы ГЛОБМЕТ (Глобальной системы метеорных наблюдений). Рассчитанная на период не менее одного цикла солнечной активности (1980—1990 гг.), программа ГЛОБМЕТ преследует цель интенсификации исследований в области метеорной астрономии и геофизики на основе широкого использования новейших достижений в этой области и расширения международного сотрудничества в исследовании метеоров.

Астрономическими задачами ГЛОБМЕТа являются: построение моделей притока метеорного вещества на Землю для различных диапазонов масс, изучение распределения метеорного вещества в околоземном пространстве и распределения радиантов, уточнение структуры метеорных потоков Квадрантид, Геминид, Персеид, Эта-Акварид, Орионид и других.

Геофизические задачи ГЛОБМЕТа включают построение моделей глобальной циркуляции атмосферы в метеорной зоне и ее взаимодействий с процессами в нижележащих слоях, исследование взаимосвязи циркуляции земной атмосферы с солнечной и геомагнитной активностью.

В выполнении программы ГЛОБМЕТ принимают активное участие академические, вузовские и другие коллективы исследователей метеоров в Харькове, Душанбе, Казани, Апхабаде, Киеве, Обнинске, Фрунзе и других городах СССР.

Советская метеорная наука занимает ведущее положение на таких направлениях, как создание наземных автоматизированных радиометеорных комплексов, исследование глобальных циркуляционных процессов в верхней атмосфере, исследование структуры метеорного комплекса в окрестностях орбиты Земли, метеорная радиосвязь, исследование взаимодействий метеорных тел с атмосферой Земли на основе мгновенного фотографирования и спектрографирования метеоров и использования параллельных оптических и радиолокационных наблюдений, физическая теория метеорных явлений.

Для координации проводимых в СССР метеорных исследований в 1937 г. при Астрономическом совете Академии наук СССР была создана Комиссия по кометам и метеорам. В настоящее время координация осуществляется Рабочей группой Астрономического совета АН СССР «Метеорное вещество» и Секцией метеорных исследований Междуведомственного геофизического комитета при Президиуме АН СССР. Любительские наблюдения метеоров по-прежнему координируются Метеорным отделом Всесоюзного астрономо-геодезического общества и его отделениями. Рабочая группа «Метеорное вещество» один раз в два года организует всесоюзные конференции и симпозиумы по различным актуальным проблемам исследований метеоров.

Результаты изучения метеоров публикуются в периодическом журнале «Астрономический вестник», посвященном исследованиям Солнечной системы. Вопросам изучения метеоров посвящен и издающийся с 1956 г. в Душанбе «Бюллетень Комиссии по кометам и метеорам», преобразованный с 1972 г. в журнал «Кометы и метеоры», а также сборники «Метеорные исследования», издаваемые Междуведомственным геофизическим комитетом АН СССР,

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ
НАБЛЮДЕНИЯ МЕТЕОРОВ

Вторжение метеороида в земную атмосферу происходит со скоростями от 11 до 73 км/с, сопровождается его нагреванием и сложными процессами разрушения — плавлением, распылением, дроблением и испарением. В результате столкновений испарившихся метеорных молекул с молекулами и атомами воздуха происходит распад молекул на атомы и возбуждение и ионизация образующихся атомов. Возбужденные атомы и ионы метеорного вещества излучают, и мы наблюдаем явление «падающей звезды», или метеора. Свечение метеора можно наблюдать визуально, фотографировать или регистрировать другим приемником излучения.

В результате столкновений испарившихся метеорных атомов и молекул с атомами и молекулами воздуха происходит разделение молекул и атомов метеорного тела и воздуха на положительно и отрицательно заряженные частицы, т. е. их ионизация. Но ионизируются главным образом метеорные атомы, так как потенциал их ионизации ниже потенциала ионизации атомов газов. Размеры ионизованного следа, образующегося вдоль траектории метеорного тела, зависят от массы и скорости метеороида. Длина следа может составлять десятки километров. Радиус следа составляет при своем образовании около метра и со временем увеличивается вследствие диффузии (рассеивания). Ионизированные следы метеоров способны отражать радиоволны, и поэтому их можно наблюдать при помощи радиолокационной аппаратуры.

В течение многих лет изучение метеоров проводилось только на основе визуальных наблюдений. Были установлены частота появления метеоров, суточные и сезонные вариации численности и определены радианты нескольких сотен метеорных потоков. Несмотря на развитие инструментальных методов наблюдений (фотографических, спектральных, радиолокационных, телевизионных), неко-

торые задачи визуальных наблюдений метеоров не потеряли своего значения и до настоящего времени. К ним относятся изучение радиантов «слабых» метеорных потоков, численности поточных и спорадических метеоров и ее изменения со временем, исследование пространственной плотности и структуры метеорных роев, оценка притока метеорного вещества на Землю и некоторые другие.

О методах и принципах визуальных, а также простых фотографических наблюдений метеоров, доступных широкому кругу любителей астрономии, мы подробно расскажем в главе VI. Здесь же мы сообщим основные сведения о современных фотографических, радиолокационных, телевизионных и прямых методах наблюдений метеоров.

§ 1. ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТЕОРНЫЕ ПАТРУЛИ

Метеоры относятся к весьма быстротечным и кратковременным явлениям природы. Кроме того, заранее неизвестно, в какой области неба и в какой момент пролетит метеор. Даже с помощью светосильной фотографической камеры и высокочувствительных фотопленок для фотографирования одного метеора приходится затрачивать несколько десятков часов. Для повышения эффективности фотографирования метеоров обычно создают агрегаты из четырех — шести камер, закрепляемых друг относительно друга веерообразно и охватывающих соответственно в четыре — шесть раз большую площадь неба. Два таких агрегата (один из которых снабжается периодическим затвором-обтюратором), размещенные на некотором расстоянии друг от друга, составляют метеорный патруль. Фотографическое патрулирование неба проводится в ясные безлунные ночи в течение нескольких часов с продолжительностью экспозиций (в зависимости от чувствительности фотопленки, яркости фона неба и светосилы камеры) от 0,5 до 1 часа. Ниже приводится описание некоторых метеорных патрулей.

Метеорный патруль Института астрофизики АН Таджикской ССР состоит из четырех агрегатов (А, В, С и Р), три из которых (А, Р, С) установлены в Гиссарской обсерватории, а один (В), корреспондирующий, — на расстоянии 33 км от нее. Каждый агрегат снабжен шестью фотографическими камерами МК-25, которые фотографируют область неба от зенита до зенитного расстояния $40-60^\circ$ во все стороны. Камеры имеют следующие характеристики: объектив «Уран-9» (диаметр $D=10$ см, фокусное расстояние

$F=25$ см), размер кадра 18×18 см, поле зрения $40 \times 40^\circ$. Агрегат А (см. фото I в конце книги) установлен на неподвижной раме. Перед его камерами со скоростью 25 об/с вращается симметричный двухлопастный obtюратор диаметром 1,5 м. Ширина каждой лопасти obtюратора составляет 60° и на снимках длина метеорных штрихов получается в два раза больше перерывов. Вращение obtюратора производится электромотором; скорость вращения obtюратора контролируется с помощью печатающего хронографа. Изображение метеора, полученное с помощью этого агрегата, получается в виде прерывистой линии, а следы звезд — в виде дуг (фото II). Для определения координат отдельных точек метеора на следы звезд наносятся «марки времени»: с помощью затвора следы звезд прерываются на 10—30 секунд через каждые 10 минут экспозиции. Моменты открытия и закрытия затворов камер регистрируются печатающим хронографом.

Агрегат Р (фото III) установлен на параллактической монтировке, снабженной часовым механизмом с секундным контролем, благодаря чему изображения звезд получаются в виде точек (фото IV).

Агрегат С является спектральным. Перед каждой его камерой установлена реплика дифракционной решетки, имеющая 300 штрихов на 1 мм. Агрегат В, установленный на корреспондирующем пункте наблюдений, полностью подобен агрегату А, но не имеет obtюратора.

Управление всеми агрегатами метеорного патруля (гидирование, перемотка кадров, открытие и закрытие затворов, вращение obtюратора) осуществляется с помощью специального пульта. Синхронность проведения наблюдений на корреспондирующих пунктах обеспечивается заранее составленным расписанием и двусторонней радиосвязью между пунктами.

Взаимный наклон агрегатов в каждом пункте (на концах базиса) выбирается таким образом, чтобы они фотографировали одну и ту же область на высотах 60—120 км. Для наблюдений используется панхроматическая фотопленка чувствительностью 1100—1300 единиц ГОСТ. Продолжительность экспозиции 30—60 минут. Применяющаяся оптика и фотоматериалы позволяют фотографировать метеоры ярче $+1^m$ звездной величины.

Начиная с 1957 г. и до настоящего времени с помощью метеорного патруля Института астрофизики АН Таджикской ССР были получены базисные (из двух пунктов) фотографические снимки многих сотен метеоров.

Метеорный патруль Одесской астрономической обсерватории состоит из двух агрегатов, установленных неподвижно на расстоянии 38 км друг от друга. Каждый агрегат представляет собой металлическую раму, на которой смонтированы четыре камеры с объективами «Уран-9». Перед объективами камер одного из агрегатов со скоростью 25 об/с вращается двухлопастный obtюратор. Он снабжен дополнительным подвижным крылом, которое при помощи специальной системы передач за часовую экспозицию совершает на один оборот больше, чем лопасти obtюратора. Так как форма obtюратора при работе изменяется пропорционально времени, то по виду изображения метеора на фотопленке можно определить момент его пролета.

Аналогичные фотографические метеорные патрули были установлены на наблюдательных станциях Киевской астрономической обсерватории и Апхабадской астрофизической лаборатории.

Камера Супер-Шмидт (фото V) является астрономической установкой, сконструированной специально для фотографирования метеоров. Диаметр ее входного отверстия $D=31$ см, фокусное расстояние $F=20$ см, относительное отверстие $D/F=1:0,65$, поле зрения круговое диаметром 55° . Фокальная поверхность сферическая с радиусом кривизны 20 см. Фотографирование ведется на сферическую пленку диаметром 18,4 см. Двухлопастный obtюратор вращается непосредственно перед пленкой со скоростью 30 об/с. Время одной экспозиции составляет около 15 мин.

Камеры Супер-Шмидт смонтированы на параллактических установках, снабженных часовыми механизмами. Они позволяют фотографировать метеоры до +4-й звездной величины. С помощью этих камер Астрофизической обсерваторией Смитсоновского института (США) были получены снимки более 6000 метеоров. Момент пролета метеора определялся визуально или путем отождествления особых деталей на изображении метеора (например, вспышки блеска).

Метеорный патруль Астрономического института Чехословацкой Академии наук состоит из трех агрегатов по 10 камер с объективами «Тессар» ($D:F=1:5,5$ и $F=18$ см). В основном пункте (Ондржейов) установлены два агрегата: один неподвижный с obtюратором, дающим 48 перерывов в секунду, а другой, на параллактической монтировке, служит для определения момента пролета метеоров. Третий агрегат, также неподвижный, размещен на расстоянии 40,4 км от основного.

§ 2. МЕТОД МГНОВЕННОЙ ЭКСПОЗИЦИИ

При обычном фотографировании метеоров на негативе получается изображение не самого метеора, а след от его полета. В результате быстрого движения метеора его изображение оказывается смазанным. Это не позволяет детально исследовать различные стадии метеорного явления. Вращающийся перед объективом обтюратор разрезает фотографический след метеора на отдельные участки — штрихи. Это позволяет, при знании скорости вращения обтюратора, измерить скорость и торможение метеорного тела. Часто можно заметить, что промежутки между штрихами оказываются замытыми, что свидетельствует о значительных размерах метеора (фото II). Если фотографирование метеоров производить с помощью длиннофокусных камер ($F=75$ см и более), то при расстояниях 100—150 км можно разрешить объекты, протяженность которых превышает 10—40 м. Но чтобы получить такое разрешение, необходимо получить снимки метеоров с очень малыми экспозициями. Действительно, при выдержке 10^{-3} с смещение метеора, даже при скорости 60—70 км/с, будет примерно на порядок меньше его линейных размеров, а при выдержке 10^{-4} с лежит в пределах разрешающей способности используемой оптики. Следовательно, экспозиции при выдержках 10^{-8} — 10^{-4} секунды в зависимости от скорости метеора позволяют получить «чистое», мгновенное изображение метеора. Метод мгновенной экспозиции особенно интересен при изучении процессов дробления метеорных тел в атмосфере.

Интересно отметить, что дробление метеорного тела на сравнительно крупные осколки почти невозможно обнаружить длиннофокусной фотографической аппаратурой, так как при больших фокусных расстояниях поле зрения объектива мало и уменьшаются шансы сфотографировать метеор. Кроме того, поперечные (перпендикулярные движению метеора) расстояния между осколками обычно так малы, что даже при фокусных расстояниях в 1—2 м они остаются меньше разрешающей способности. Продольные, т. е. совпадающие с направлением движения метеора, расстояния между осколками со временем увеличиваются из-за различного сопротивления воздуха и становятся больше разрешающей способности аппаратуры. При обычном фотографировании изображения отдельных осколков налагаются одно на другое и их невозможно различить. Метод мгновенной экспозиции позволяет определять массы от-

дельных осколков и отделять их изображения друг от друга. Разработанный П. Б. Бабаджановым и Е. Н. Крамером метод мгновенной экспозиции ныне широко используется для исследования процессов разрушения метеорных тел в земной атмосфере.

Первые систематические наблюдения метеоров по методу мгновенной экспозиции были начаты в Институте астрофизики АН Таджикской ССР. Для этой цели использовались 16 камер МК-75 (светосила $f=1:3,5$; $F=75$ см, размер кадра 30×30 см, поле зрения $20\times 20^\circ$). Камеры были установлены таким образом (фото VI), что все они вместе охватывали область неба площадью около 6000 кв. градусов. Перед пленкой, в непосредственной близости к фокальной плоскости камер, вращается obtюратор с двумя симметричными узкими вырезами по 5° . Вращение obtюратора производится синхронным мотором со скоростью 25 об/с. Это дает возможность получать снимки метеоров с экспозицией 0,00056 с через каждые 0,02 с. Так как при этом фон неба экспонируется весьма коротко (около 30 мин в течение всей ночи), то вполне достаточно, чтобы смена кадров производилась один раз в сутки. Опорные звезды для определения блеска и координат метеора фотографируются, с соответствующей регистрацией времени, перед началом наблюдений без obtюратора в течение 5—10 мин.

Первые мгновенные изображения нескольких сотен метеоров показывают многообразие форм разрушения метеорных тел в земной атмосфере, они позволяют также детально изучить физические особенности метеорных тел разных классов (фото VII).

Помещенные перед объективами камер дифракционные решетки позволяют получать и мгновенные спектры метеоров, необходимые для детального изучения процессов их свечения.

§ 3. ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ БОЛИДНЫЕ СЕТИ

В апреле 1959 г. метеорным патрулем Астрономического института Чехословацкой АН был сфотографирован болид —19-й звездной величины, сопровождавшийся падением метеорита Пршибрам. Тщательное изучение базисных снимков болида позволило определить его орбиту в межпланетном пространстве, которая оказалась расположенной в поясе астероидов. Это первый метеорит, полет которого был сфотографирован и была определена точная его орбита. Эта удача побудила создать фотографические

болидные сети сначала в Чехословакии, а затем и в других странах.

Согласно данным чехословацкого астронома Э. Цеплехи болид, имеющий блеск ярче, чем Луна в полнолунии ($-12,7^m$), в каком-нибудь пункте ночью может наблюдаться в среднем один раз за два-три года, а выпадение в данном месте в почное время метеорита массой в килограмм и более можно ожидать каждые 10—15 лет. Следовательно, счастливый случай фотографирования полета ярких болидов обычными метеорными патрулями является крайне редким. Поэтому простым способом увеличения вероятности регистрации болидов является увеличение площади метеорной зоны, охватываемой фотографическими патрулями путем увеличения поля зрения камер и количества наблюдательных пунктов, т. е. создание болидных сетей.

Основные задачи болидных сетей заключаются в том, чтобы: 1) по данным видимых траекторий болидов определять районы ожидаемого выпадения метеоритов и увеличивать число «свежих» метеоритов, для которых известны точные орбиты; 2) основываясь на данных о сфотографированных болидах и выпавших после них метеоритах исследовать структуру метеоритов различных классов; 3) определять орбиты болидообразующих тел в Солнечной системе; 4) изучать процессы торможения и потери массы этих тел в атмосфере.

Наблюдения болидов необходимы для решения проблемы происхождения метеоритов и выяснения генетических связей между метеоритами отдельных групп и типов. Эти наблюдения весьма важны для изучения взаимосвязи малых тел Солнечной системы и для выяснения структуры и происхождения мелких частиц, порождающих метеоры, и крупных тел, образующих болиды и выпадающих в виде метеоритов.

Ниже приведены некоторые данные о существующих болидных сетях.

Европейская болидная сеть. Первая сеть станций фотографических наблюдений болидов была создана в 1963 году на территории Чехословакии. На каждой станции была установлена одна камера «всего неба» с полем зрения около 180° и с обтюратором, дающим 12,5 перерывов в секунду. Камера «всего неба» состоит из выпуклого зеркала диаметром 36 см, расположенного горизонтально, и укрепленного над ним фотоаппарата ($F=50$ см, ширина пленки 35 мм), который фотографирует изображение неба, отра-

жаемое зеркалом. Камера установлена на бетонном фундаменте высотой 2 м и позволяет фотографировать болиды ярче -6^m , пролетающие над горизонтом (фото VIII).

В 1968 г. станции фотографических наблюдений болидов были организованы также на территории ФРГ и ГДР. Совместно с чехословацкими станциями они образовали Европейскую болидную сеть, состоящую ныне из 46 станций, охватывающих площадь около 1 млн км² на уровне метеорной зоны. Взаимные расстояния между станциями составляют около 90 км. Европейской болидной сетью сфотографировано несколько сот болидов, для которых определены атмосферные траектории и орбиты. В большинстве станций Европейской сети вместо камер «всего неба» используются камеры с объективами «Цейс-Дистагон» типа «рыбий глаз» (фокусное расстояние 30 мм, диаметр поля зрения 180°, светосила 1:3,5, размер кадра 76 мм). Камеры обеспечивают высокое качество изображения и позволяют определить координаты точек на снимке с погрешностью до $\pm 1^m$. За четырехчасовую экспозицию на гидрируемой камере можно получить изображения звезд до $+11^m$. Камеры снабжены obtюраторами, расположенными вблизи фокальной плоскости и дающими 25 перерывов в секунду.

Прерийная сеть США, организованная Смитсоновской астрофизической обсерваторией, была расположена на равнинной территории средне-западных штатов с центром в г. Линкольне и состояла из 16 станций, находящихся на расстоянии около 250 км друг от друга. Обозреваемая сетью площадь на высоте 60 км составляла $1,7 \cdot 10^6$ км². Камеры Прерийной сети позволяли получить за год около 300 базисных фотографий болидов ярче -6^m . На каждой станции сети четыре неподвижные широкоугольные камеры были установлены таким образом, что вместе контролировали почти все небо. Работа станций автоматизирована: включение и выключение камер соответственно с наступлением темноты или рассвета производится фотоэлементом. Каждая экспозиция длится один час, после чего фотопленка автоматически перематывается.

Экспонированные пленки вынимаются из камер каждые 3—6 недель. По снимкам болидов, полученных минимум с двух станций, вычисляются и затем обследуются вероятные районы падения метеоритов.

Прерийной сетью получены базисные снимки нескольких тысяч болидов и 4 января 1970 г. было зафиксировано падение метеорита Лост Сити, который был найден поисковой группой через несколько дней около предвычис-

ленной точки (прямо на снегу возле проезжей части дороги). После метеорита Пршибрам это был второй метеорит, орбита которого вычислена по фотографическим наблюдениям. Она оказалась также короткопериодической. Наиболее удаленная точка (афелий) орбиты Лост Сити была расположена в поясе астероидов, на расстоянии 2,4 астрономической единицы, а ближайшая к Солнцу точка (перигелий) — около орбиты Земли.

Канадская болидная сеть. Эта сеть состояла из 12 станций, расположенных на расстоянии около 200 км друг от друга. На каждой станции установлена 5-объективная камера. Фокусное расстояние объективов $F=50$ мм, а угол поля зрения 60° . Каждая камера обзоревает область неба от зенитного расстояния 30° почти до горизонта во все стороны. Продолжительность экспозиции составляет от трех часов и более и определяется интегрирующим фотометром, который обеспечивает автоматическое открытие и закрытие камер, реагируя на сумерки, наличие лунного освещения и полярных сияний. Камеры снабжены obtюратором, вращающимся перед пленкой со скоростью 4 об/с. Obtюратор состоит из трех равных секторов по 120° каждый. Сектор является нейтральным фильтром с плотностью 5, 3 и 0. В случае пролета слишком яркого болида obtюратор обеспечивает получение изображения через фильтры с плотностью 3 или 5.

За период 1971—1983 гг. Канадской сетью получены базисные снимки сотен болидов, один из которых, 5 февраля 1977 г., завершился выпадением метеорита Иннисфри. Орбита Иннисфри оказалась также короткопериодической с перигелием $q \approx 0,986$ а. е., афелием $q' = 2,56$ а. е. и наклоном плоскости орбиты к эклиптике $i = 11,8^\circ$.

Болидная сеть Великобритании, организованная силами любителей астрономии, начала свою работу в 1973 г. Она состоит из 13 станций, расположенных на расстояниях около 100 км друг от друга, и контролирует площадь 0,5 млн км² на высоте 60 км. На станциях сети используется фотоаппарат «Зоркий-4», объектив которого ($F=50$ мм, $D:F=1:2$) дополнен насадкой, расширяющей поле зрения до 180° . В Британской болидной сети obtюраторы не используются. Предполагается дальнейшее расширение сети и доведение числа станций до 50, что увеличит площадь, контролируемую сетью, до 1,5 млн км².

Момент пролета болидов предполагается определять по данным очевидцев и любителей астрономии, патрулирующих небо по программе визуальных наблюдений болидов.

Программа работы болидной сети предусматривает, в перспективе, вычисление траекторий болидов и координат районов возможного падения метеоритов. Поиск метеоритов предполагается проводить с помощью населения. Для этого предусматривается проведение широкой популяризаторской работы с использованием радио и телевидения.

Накопленный опыт работы различных болидных сетей показывает, что болиды, сопровождающиеся выпадением метеоритов, должны иметь небольшую начальную скорость (менее 22 км/с) и небольшие высоты погасания. На основании данных наблюдений Канадской болидной сети Я. Халлидей находит, что число метеоритов массой больше 1 кг, выпадающих на 1 млн кв. км поверхности Земли, составляет 8 в год.

В настоящее время промышленностью нашей страны начат выпуск объектива «Зодиак-8», который относится к типу объективов «рыбий глаз» и имеет следующие характеристики: $F=30$ мм, $D:F=1:3,5$, поле зрения 180° . Он может быть установлен на фотоаппарат «Киев-6», размер кадра 6×6 см. «Зодиак-8» удобен и прост в эксплуатации и вполне подходит для проведения фотографических наблюдений болидов любителями астрономии.

Дальнейшее расширение болидных сетей, особенно силами любителей астрономии, несомненно внесет существенный вклад в изучение природы болидов и метеоритов, а следовательно, нашей Солнечной системы.

§ 4. РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ МЕТЕОРОВ

Способность метеорных следов отражать радиоволны позволяет исследовать метеоры при помощи радиолокационной аппаратуры. Принципиальное отличие радиолокационных наблюдений от визуальных, фотографических и других заключается в следующем. Если при оптических, визуальных, фотографических и телевизионных наблюдениях регистрируется излучаемая метеором энергия, то при радиолокационных наблюдениях регистрируется отраженная или рассеянная электронами метеорного следа электромагнитная энергия передатчика радиолокационной станции. Конечно, имеется и собственное радиоизлучение метеоров, но оно слишком слабое для регистрации.

Радиолокационные методы, являясь мощным современным исследовательским средством, позволяют вести наблюдения метеоров в любое время суток — и днем и ночью, при любых погодных условиях, даже в дождь и в снег.

Кроме того, с помощью радиометодов можно регистрировать метеоры намного более слабые (до 12–13-й звездной величины), чем оптическими средствами. Радиолокационные методы незаменимы при изучении дневных метеорных потоков, а также потоков, активность которых очень кратковременна.

По характеру взаимодействия радиоволн с метеорными следами последние делятся на несколько типов: а) ненасыщенные (или недоуплотненные), у которых концентрация электронов на единицу длины следа, называемая линейной электронной плотностью, меньше 10^{18} электронов на 1 м длины следа. Падающая на них радиоволна проникает в любую точку следа и рассеяние происходит на каждом электроне; б) насыщенные (или переуплотненные), у которых линейная электронная плотность больше или равна $\sim 10^{18}$ эл/м и внутри следа имеется область, где количество электронов в единице объема превосходит некоторое критическое значение для данной частоты радиоволн. Радиоволны отражаются от границы этой области, как от металлической поверхности. Минимальное значение электронной концентрации следа, регистрируемого радиолокатором, работающим на длине волны λ , или на частоте f , определяется по следующей формуле:

$$N_{\text{кр}} = \frac{\pi m c^2}{e^2 \lambda^2} = \frac{\pi m}{e^2} f^2.$$

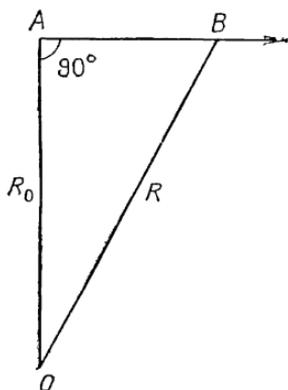
Здесь $m=0,911 \cdot 10^{-30}$ кг и $e=1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл — масса и заряд электрона, $c=3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света, $f = \frac{c}{\lambda}$ — частота радиолокатора. Если частота выражена в МГц, то $N_{\text{кр}}=1,24 \cdot 10^{-2} f^2$ эл/м³.

Принцип радиолокационного метода заключается в следующем. Антенная система излучает радиоимпульсы. Радиоволна рассеивается метеорным следом, и отраженный сигнал принимается в виде кратковременного импульса (эхo). Принятый сигнал можно наблюдать на экране осциллографа радиолокатора, регистрировать фотографически или вводить в память ЭВМ.

Промежуток времени t между моментом излучения радиоимпульса и моментом приема отраженного метеорным следом радиоэха позволяет определить дальность метеора R . Так как скорость c радиоволн известна, то

$$R = \frac{ct}{2}.$$

Метеор является движущимся и быстротечным явлением. Поэтому количество излучаемых импульсов обычно составляет 500—600 в секунду. Образованный движущимся метеорным телом ионизированный след является длинным и прямолинейным, и поэтому эхо, отражаясь зеркально, будет возвращаться обратно, если след перпендикулярен к лучу зрения радиолокатора (рис. 1). В точке отражения метеорный след образует прямой угол или, как говорят, он ортогонален лучу зрения радиолокатора. При использовании радиолокаторов с длиной волны 8—10 м получают и незеркальные отражения от участков следа, находящихся в стороне от точки ортогонального пересечения. Поэтому на экране радиолокатора можно проследить изменение расстояния до метеора со временем. Это дает возможность определить скорость метеора.



Пусть в момент времени t_0 (рис. 1) метеорное тело находилось в зеркальной точке A на кратчайшем расстоянии R_0 от радиолокатора, расположенного в точке O . В момент времени t метеорное тело будет находиться в точке B траектории на расстоянии R от радиолокатора. Тогда скорость v определится по формуле

Рис. 1. Схема отражения радиосигнала от следа метеора

$$v = \frac{AB}{t - t_0} = \frac{\sqrt{R^2 - R_0^2}}{t - t_0}.$$

Этот способ годится только в случае очень ярких метеоров, дающих так называемое головное эхо, так как только в этом случае можно непосредственно измерять изменение дальности.

Другой метод измерения скорости метеора основан на наблюдении явления дифракции радиоволн от формирующегося в поле зрения антенны радиолокатора ионизированного столба. Сущность метода, основанного на изменении амплитуды отраженного от метеорного следа радиосигнала, можно пояснить следующим образом.

Допустим, что в точке O (рис. 2) находится передающая и приемно-регистрационная радиолокационная аппаратура, работающая на длине волны λ , MM' — созда-

ваемый метеором ионизованный столб, P — точка ортогонального пересечения следа метеора с лучом зрения радиолокатора (зеркальная точка). Проводим из точки

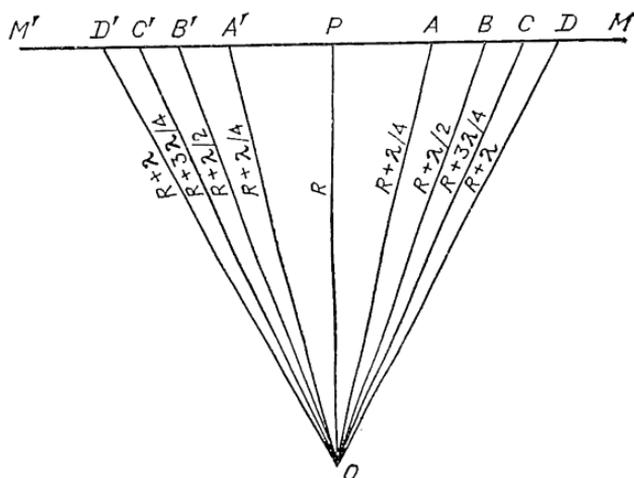


Рис. 2. Схема образования дифракционных картин при полете метеора. O — радиолокационная станция, MM' — траектория метеора

O к следу метеора MM' линии OA , OA' , OB , OB' и т. д. так, чтобы выполнялись условия

$$\begin{aligned} OA &= OA' = R + \lambda/4, \\ OB &= OB' = R + \lambda/2, \\ OC &= OC' = R + 3\lambda/4, \\ OD &= OD' = R + \lambda \text{ и т. д.} \end{aligned}$$

Под действием распространяемых радиолокатором радиоволн электроны ионизованного следа MM' начнут колебаться и рассеивать во все стороны радиоволны. Некоторая часть рассеянных радиоволн будет принята в точке O и создаст изображение эха на экране радиолокатора. Но радиоволны, посланные радиолокатором и отраженные различными участками следа, будут возвращаться в точку O , пройдя разные расстояния: радиоволны, отраженные от участков PA и PA' следа, пройдут расстояния в пределах от $2R$ до $2(R + \lambda/4) = 2R + \lambda/2$, а отраженные от участков AB и $A'B'$ — в пределах от $2(R + \lambda/4)$ до $2(R + \lambda/2) = 2R + \lambda$. Таким образом, радиоволна, рассеянная на участке PA , будет иметь с радиоволной, рассеянной на участке AB , разность фаз, равную полови-

не длины волны ($\lambda/2$), или, как говорят, эти волны будут находиться в противоположных фазах. Поэтому радиоволна с участка AB , налагаясь на радиоволну с участка PA , будет ослаблять последнюю. И наоборот, волна с участка BC , пройдя от станции до следа и обратно расстояние от $2R+\lambda$ до $2R+3\lambda/2$, в точке O будет в той же фазе, что и волна от участка PA , и, накладываясь, усилит ее. Таким образом, если приходящие в точку O радиоволны имеют

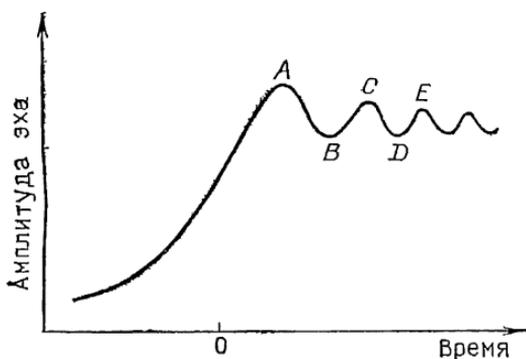


Рис. 3. Колебания амплитуды отраженного радиосигнала вследствие дифракции радиоволн

одинаковые (или отличающиеся на целое число длин волн) фазы, то они усиливают друг друга. Если же они имеют противоположные (или отличающиеся на нечетное число полуволн) фазы, то происходит ослабление радиоэха. В результате амплитуда отраженного сигнала со временем будет меняться (рис. 3). Расстояния между последовательными максимумами и минимумами могут быть определены следующим образом. Из рис. 2 имеем

$$(PA')^2 = (R + \lambda/4)^2 - R^2.$$

Пренебрегая членом, содержащим λ^2 , получим

$$PA' = \sqrt{0,5R\lambda} = 0,7\sqrt{R\lambda},$$

и аналогично

$$PB' = \sqrt{R\lambda}.$$

Тогда расстояние между первым максимумом и первым минимумом (A и B на рис. 3) будет

$$PB' - PA' = 0,3\sqrt{R\lambda}.$$

Если это расстояние пройдено метеором за время t , то его скорость

$$v = \frac{0,3 \sqrt{\lambda R}}{t}$$

может быть легко вычислена, так как длина волны радиолокатора λ известна, расстояние до метеора измеряется, а интервал времени между максимумом и минимумом может быть легко найден по дифракционной картине метеора. На фото IX приведены примеры дифракции радиоволн, отраженных от двух метеорных следов по радиолокационным наблюдениям в Душанбе. Радиолокатор имел следующие параметры: частота повторения импульсов 500 в секунду, т. е. промежуток времени между последовательными импульсами равен 2 миллисекундам, длина волны радиолокатора $\lambda=8$ м. Расстояние до первого метеора равно 122 км, а до второго — 183 км. Для первого метеора промежуток времени от первого максимума до минимума составляет 16 мс (8 импульсов по 2 мс), и следовательно, по приведенной выше формуле находим, что его скорость равна 19 км/с. Для второго метеора скорость $v=34$ км/с.

Другой важной характеристикой метеора являются координаты его радианта. Существует несколько методов определения радиантов метеоров по радиолокационным наблюдениям. Наиболее распространенным является так называемый импульсно-дифракционный метод. В этом методе используется один передатчик и три приемника отраженных сигналов, разнесенных на расстояние 3—4 км друг от друга и расположенных приблизительно в вершинах прямоугольного треугольника. Один из приемников размещается в основном пункте O (рис. 4) вместе с передатчиком, а два других — в выносных пунктах B и C . Для более точного определения радианта положение пунктов B и C выбирают так, чтобы угол между линиями OB и OC был близок к 90° .

При пролете метеорного тела через точку зеркального отражения на следе начинается дифракция радиоволн, которая регистрируется в виде амплитудно-временной характеристики на каждом пункте. Из этих характеристик для каждого метеора можно определить скорость (по каждой из трех дифракционных картин) и временные сдвиги (разность времени) между моментами прохождения метеорного тела через точки зеркального отражения для пунктов O и B $\Delta t_1 = t_B - t_O$ и для пунктов O и C $\Delta t_2 = t_C - t_O$.

Так как длины базисов $OB=b_1$ и $OC=b_2$ довольно малы по сравнению с расстоянием R до метеора, то углы θ_1 и θ_2 между базисными линиями и осью метеорного следа могут быть вычислены по формулам (рис. 4).

$$\cos \theta_1 = \frac{2v\Delta t_1}{b_1}, \quad \cos \theta_2 = \frac{2v\Delta t_2}{b_2}.$$

Зная точную длину и ориентацию базисных линий OB и OC относительно стран света, можно найти координаты

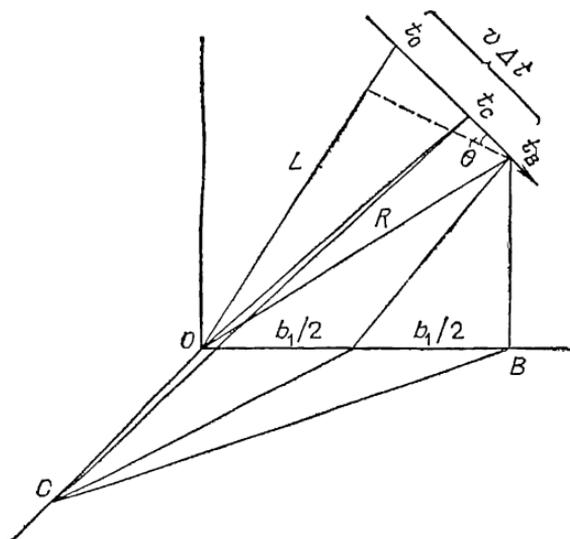


Рис. 4. Схема определения координат радианта метеора по наблюдениям импульсно-дифракционным методом из трех пунктов

радианта метеора в горизонтальной системе координат (азимут и зенитное расстояние) с помощью следующих формул:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} A &= \frac{\cos \varphi_2 - k \cos \varphi_1}{\sin \varphi_2 + k \sin \varphi_1}, \\ \sin Z &= \frac{2v\Delta t_1}{b_1} \sec(A - \varphi_1) = -\frac{2v\Delta t_2}{b_2} \sec(A + \varphi_2), \end{aligned}$$

где $k = \frac{b_1\Delta t_2}{b_2\Delta t_1}$, φ_1 и φ_2 — углы, которые составляют направления OB и OC с направлением на север.

По моменту пролета, скорости и координатам радианта метеора можно вычислить орбиту метеорного тела.

Радиолокационные наблюдения метеоров существенно расширили наши представления о структуре комплекса метеорных тел в окрестности орбиты Земли, о физических процессах, происходящих в ионизованных метеорных следах. Радиолокационные наблюдения метеоров позволили получить новую ценную информацию о многочисленных дневных и ночных метеорных потоках, о метеорной обстановке в окрестности орбиты Земли, а также о ветровых движениях земной атмосферы в метеорной зоне.

Метеорные следы под воздействием воздушных течений, господствующих в верхних слоях земной атмосферы, перемещаются в пространстве, или, как говорят, дрейфуют. Радиолокационные измерения дрейфа ионизированных метеорных следов являются незаменимым средством детального изучения скорости и направления верхнеатмосферных ветров в метеорной зоне атмосферы.

При удалении метеорного следа от радиолокационной станции длина волны отражаемых радиосигналов увеличивается, а при приближении уменьшается. Явление изменения длины радиоволны при перемещении источника колебаний (в данном случае метеорного следа), известное под названием эффекта Доплера, позволяет определить скорость перемещения метеорного следа по лучу зрения, а следовательно, скорость и направление ветра.

Радиолокационные наблюдения метеоров позволили изучить регулярные и нерегулярные движения атмосферы в метеорной зоне.

§ 5. ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Проницающая способность фотографических методов ограничивается метеорами 3—4-й звездной величины. Применение телевизионной техники в сочетании с электронно-оптическими преобразователями существенно увеличило проницающую способность оптических наблюдений.

Комплекс любого телевизионного устройства, независимо от его назначения, состоит из телекамеры, канала связи и приемной аппаратуры — телевизора. Но обычным телекамерам подавай залитые ярким светом Солнца или «юпитеров» сцены! Астрономические же объекты таким образом не осветишь. Оптические наблюдения небесных объектов (кроме Солнца и Луны) проводятся в темные безоблачные ночи и для них используются самые высо-

кочувствительные телевизионные трубки — так называемые суперортиконы. Однако для астрономических наблюдений, где мы имеем дело с очень слабыми освещенностями, а сами объекты наблюдений мало контрастны, оказывается недостаточной чувствительность и суперортиконов. Поэтому необходимо устройство для предварительного усиления яркости изображения небесных светил. В качестве такого устройства используется электронно-оптический преобразователь (ЭОП). В ЭОП оптическое изображение преобразуется в электрическое, а затем снова в оптическое, но усиленное в 10^3 – 10^4 раз, что соответствует выигрышу в 8–10 звездных величин.

Применение телевизионной аппаратуры для наблюдений метеоров сначала в США, а затем в Канаде показало ее высокую эффективность: были зарегистрированы метеоры до +7–+8 звездной величины, а спектры метеоров до +3–+4 звездной величины. Преимуществом телевизионной системы является контрастность изображения, высокая разрешающая способность и возможность наблюдения метеоров в довольно широкой спектральной области — от ультрафиолетовой до инфракрасной.

В нашей стране применение телевизионной техники для наблюдения метеоров было начато в 1970 г. в Ашхабаде, где использовались передающая телевизионная трубка ЛИ-214 и электронно-оптический преобразователь типа УМ-92. В качестве питающей оптики использовался

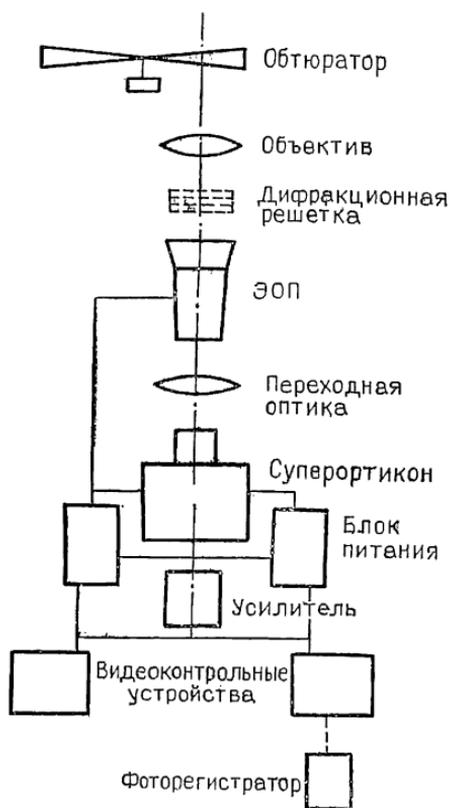


Рис. 5. Блок-схема телевизионной системы для наблюдений метеоров

объектив «Юпитер-6» ($D=6,5$ см, $F=18$ см). Чуть позже, с помощью телевизионной техники, были начаты и спектрографические наблюдения.

В настоящее время телевизионные и электронно-оптические наблюдения проводятся в Ашхабаде, Душанбе и Киеве, а за рубежом — в Англии.

На рис. 5 приведена упрощенная функциональная схема телевизионной системы наблюдения метеоров. Изображение звездного неба проецируется объективом на фотокатод ЭОП. С выходного экрана ЭОП усиленное в десятки тысяч раз оптическое изображение перебрасывается переходной оптикой на фотокатод суперортикона. В суперортиконе оптическое изображение опять преобразуется в электрический сигнал, который после прохождения через усилитель поступает на вход видеоконтрольных устройств (ВКУ). В кинескопе ВКУ электрические импульсы преобразуются в видимое изображение. В астрономических телевизионных устройствах обычно используются два видеоконтрольных устройства, одно из них предназначено для фотографирования изображения с экрана кинескопа с помощью кинокамеры либо для записи этого изображения на видеомэгнитофон, а другое — для визуального контроля.

Необходимый для определения скорости метеора обтюратор устанавливается либо перед объективом, либо перед фотокатодом ЭОП. Для получения метеорных спектров дифракционная решетка или объективная призма размещается перед объективом.

Весьма ценными являются базисные телевизионные наблюдения метеоров, а в комбинации с радиолокационными наблюдениями они обещают дать весьма важную информацию как о природе метеорных тел и процессах их взаимодействия с атмосферой, так и о распределении метеорного вещества в межпланетном пространстве.

§ 6. РЕГИСТРАЦИЯ МЕТЕОРНЫХ ЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОТНЫХ РАКЕТ И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Создание высотных ракет, запуски искусственных спутников Земли и различных космических аппаратов открыли широкую возможность для изучения наиболее мелких метеорных частиц массой менее 10^{-6} г, которые не дают явления метеора. Такие частицы из-за большого отношения поверхность/масса, не достигнув температуры

плавления, тормозятся в атмосфере и под действием гравитационного притяжения оседают на поверхность Земли в виде пыли.

Задачи изучения метеорных частиц с помощью высотных ракет и космических аппаратов довольно обширны и многообразны. Они включают оценку плотности потока метеорных частиц различного диапазона масс, измерение векторов скорости и изучение их физико-химических свойств (структура, плотность, состав).

Регистрация ударов метеорных частиц проводится с помощью устанавливаемых на высотных ракетах и КА различных датчиков: пьезоэлектрических, световых, пробойных, ионизационных и комбинированных.

Пьезоэлектрическими (или акустическими) были названы датчики, в которых механические колебания, возникающие при ударе микрометеороида, посредством пьезоэлектрических кристаллов преобразуются в пульсирующий электросигнал. При ударе микрометеороида о плату последняя начинает колебаться с частотой 400 с^{-1} . Колебание платы с помощью пьезоэлементов преобразуется в электрические сигналы, которые после усиления поступают в счетчик. Предполагая, что амплитуда сигналов пропорциональна кинетической энергии $\frac{Mv^2}{2}$ частицы и принимая ее скорость равной 40 км/с , можно оценить массы соударяющихся частиц. В свою очередь, зная частоту ударов на $\text{м}^2 \cdot \text{с}$, можно вычислить и плотность потока частиц.

Пьезоэлектрические датчики микрометеороидов были установлены на многих советских космических зондах, а также на американских ИСЗ.

При ударе микрометеороида о преграду происходит микровзрыв, сопровождающийся световой вспышкой. На регистрации таких вспышек был основан принцип работы световых датчиков микрометеороидов. Один из таких датчиков, установленный на ракетах «Аэробы», представлял собой усеченный конус из оргстекла. К обрезанной вершине конуса был прикреплен фотоэлектрический умножитель (ФЭУ). Основание конуса площадью 75 см^2 , покрытое тонкой алюминиевой пленкой, использовалось в качестве экрана для ударов микрометеороидов. Световые вспышки, возникающие в алюминиевой пленке при ударах микрометеороидов, регистрировались ФЭУ и в виде электрических импульсов передавались по телеметрическому каналу на Землю. Калибровка датчика пока-

зала, что интенсивность световой вспышки пропорциональна кинетической энергии соударяющегося микрометеороида. Такие датчики могли регистрировать удары частиц массой до 10^{-13} г при скорости 30 км/с.

На искусственном спутнике США «Эксплорер-1» для регистрации микрометеороидов использовались пробойные датчики сеточного типа, для которых чувствительным элементом служила однослойная обмотка из медной проволоки толщиной 17 мкм на пластинке из диэлектрика. Микрометеороид, ударившись об обмотку, обрывает проволоку и разрывает электрическую цепь, что регистрируется измерительной аппаратурой.

Микрометеороидные эксперименты состоят также из экспонирования в околоземном пространстве полированных или покрытых пленками поверхностей из нержавеющей стали, алюминия, меди и других материалов. Изучение пробоев пленок и микрократеров на полированных поверхностях, а также остатков частиц позволит получить информацию о плотности потока микрометеороидов и их составе.

Исследование метеорного вещества с помощью ракет и космических аппаратов позволило получить важную информацию о плотности потока, распределении орбит и физико-кинематических свойствах мельчайших метеорных частиц с массами 10^{-11} — 10^{-15} г, изучение которых невозможно проводить наземными методами. Были получены и интересные сведения о распределении микрометеороидов вплоть до орбит Марса и Сатурна. Интересным является, в частности, обнаружение двух групп микрометеороидов, отличающихся по характеру своей траектории относительно Солнца. К первой относятся очень мелкие частицы субмикронных размеров (с массой менее 10^{-13} г), движущиеся под действием светового давления Солнца по гиперболическим орбитам. Такие частицы были названы β -метеороидами. Ко второй группе относятся более крупные частицы с массами 10^{-12} — 10^{-7} г. Размеры орбит этих частиц под действием эффекта Пойнтинга — Робертсона со временем уменьшаются и частицы приближаются к Солнцу на очень малые расстояния.

Было выявлено, что вплоть до орбиты Марса плотность потока микрометеороидов почти одинакова; большинство микрометеороидов движутся по орбитам, имеющим небольшие наклоны (менее 20 — 30°) к плоскости эклиптики и не очень большие размеры; средняя плотность микрометеороидов равна 2 — 4 г/см³.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О МЕТЕОРАХ

§ 1. ЧИСЛЕННОСТЬ И БЛЕСК МЕТЕОРОВ

По своей яркости, или, вернее, по видимому блеску, метеоры сильно отличаются друг от друга. Под блеском подразумевается освещенность, которая создается метеором в пункте наблюдения на плоскости, перпендикулярной к его лучам. Некоторые метеоры так ярки и освещают местность настолько, что земные предметы отбрасывают тени, как при освещении Солнцем и Луной. С другой стороны, бывают настолько слабые метеоры, что их можно наблюдать лишь в бинокль или телескоп. Они условно были названы *телескопическими*.

Подобно блеску звезд блеск метеоров измеряется в звездных величинах. Еще во втором веке до н. э. древнегреческий ученый Гиппарх разделил видимые невооруженным глазом звезды на шесть групп, или на шесть звездных величин. Самые яркие были отнесены к звездам первой величины, а самые слабые, едва видимые невооруженным глазом, — к шестой. Впоследствии выяснилось, что звезды, отличающиеся друг от друга на 5 звездных величин, различаются ровно в 100 раз по своему видимому блеску. Отсюда следует, что две звезды, разность звездных величин которых составляет единицу, будут отличаться по блеску в $\sqrt[5]{100} = 2,512$ раза. Звезды в 2,512 раза ярче, чем звезды первой величины, были отнесены к нулевой величине, а еще в 2,512 раза ярче — к минус первой и т. д. Следовательно, чем больше блеск звезды, тем меньше ее звездная величина, и наоборот. Звездная величина обозначается маленькой латинской буквой *m*. Для звезд, имеющих промежуточный блеск, введены дробные звездные величины, например $+1,6^m$ или $-2,8^m$.

Звездные величины метеоров определяются обычно сравнением со звездной величиной находящихся близко к ним звезд. Но определенная таким образом звездная

величина метеора еще ничего не говорит о его реальном блеске, так как метеоры пролетают на разных расстояниях от наблюдателя. Для того чтобы сравнить два метеора между собой, необходимо относить наблюдаемые звездные величины к стандартному расстоянию, равному 100 км. Звездная величина, которую имел бы метеор, наблюдаемый со стандартного расстояния в зените, называется абсолютной звездной величиной метеора. Абсолютная звездная величина m метеора легко может быть найдена, если известна видимая звездная величина m_0 метеора и расстояние до него r :

$$m = m_0 + 10 - 5 \lg r. \quad (1)$$

Если звездная величина метеора определяется по сравнению со звездами в зените, то его абсолютная звездная величина определяется по формуле

$$m = m_0 + 10 - 5 \lg r - 0,2 \sec Z, \quad (2)$$

где Z — зенитное расстояние метеора.

Между абсолютной звездной величиной m_0 и энергией, излучаемой метеором в видимой области спектра (от 4500 Å до 5700 Å), имеется зависимость, полученная Э. Эпиком,

$$m = 24,3 - 2,5 \lg I, \quad (3)$$

где I — интенсивность излучения в эрг/с в рассматриваемой области спектра.

В ясную безлунную ночь невооруженным глазом можно заметить метеоры до +5-й и даже +6-й звездной величины. В течение часа в среднем можно заметить около 10 метеоров. Если учесть, что диаметр поля зрения наблюдателя составляет около 60°, то на высоте 100 км он обозревает площадь 10⁴ км².

Эффективная поверхность метеорной области составляет около 5·10⁸ км². Следовательно, одиночный наблюдатель замечает один метеор из 50 000, а суточное число метеоров ярче +6^m для всей Земли равно 12 миллионам. Истинное число всех метеоров значительно больше этого значения, так как наблюдатель замечает не все метеоры.

Согласно исследованиям Эпика наблюдатель замечает все метеоры до второй звездной величины, попадающие в его поле зрения, 9/10 — третьей звездной величины, 1/2 — четвертой и 1/12 — пятой величины.

Наблюдения показывают, что с увеличением звездной величины количество метеоров возрастает в геомет-

рической прогрессии. Закон распределения метеоров по звездным величинам, называемый функцией светимости метеоров, имеет вид

$$F(m) = F(0) \kappa^m, \quad (4)$$

где $F(m)$ — число метеоров m -й звездной величины и ярче. Параметр κ показывает, во сколько раз изменяется число метеоров при изменении блеска на одну звездную величину:

$$\kappa = \frac{F(m+1)}{F(m)}. \quad (5)$$

По имеющимся данным значение параметра κ заключено в пределах от 2 до 4. Из всестороннего анализа многочисленных рядов визуальных наблюдений метеоров Б. Ю. Левин пришел к заключению, что в широком диапазоне звездных величин в среднем для спорадических метеоров $\kappa = 3$. Это означает, что истинное число метеоров при ослаблении блеска на 1 звездную величину увеличивается в 3 раза. Было также установлено, что из общего числа наблюдаемых метеоров 1% составляют метеоры 0-й звездной величины, 3% — 1-й величины, 9% — 2-й величины, 23% — 3-й величины, 41% — 4-й величины, 20% — 5-й величины и 3% — 6-й величины (рис. 6).

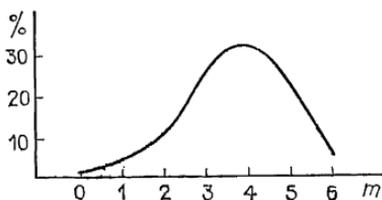


Рис. 6. Видимое распределение спорадических метеоров по звездным величинам

Учитывая коэффициенты замечаемости метеоров и принимая среднее наблюдаемое число метеоров 6-й величины и ярче равным 10 в час, можно найти наблюдаемое и истинное число метеоров любой звездной величины на всю Землю за сутки. Эти данные приведены в табл. 1. (Числа метеоров ярче 0-й и слабее 6-й звездной величины получены путем экстраполяции.)

Число спорадических метеоров, появляющихся за единицу времени над единицей поверхности Земли, принято называть плотностью потока метеоров. Плотность потока может быть определена по функции светимости, если известна площадь σ в метеорной зоне, охватываемая наблюдениями, и время t , за которое производился счет метеоров. Соотношение между суммарной (интегральной) плотностью потока $N(m)$ метеоров m -й звездной величи-

ны и ярче, функцией светимости $F(m)$, площадью σ и временем t имеет вид

$$N(m) = \frac{F(m)}{\sigma t} [M^{-2} \cdot c^{-1} (2\pi \text{ ср})^{-1}]. \quad (6)$$

Учитывая, что функция светимости $F(m)$ выражается зависимостью (4), для плотности потока метеоров имеем

$$N(m) = N(0) \kappa^m [M^{-2} \cdot c^{-1} (2\pi \text{ ср})^{-1}], \quad (7)$$

где $N(0)$ — плотность потока метеоров 0-й звездной величины и ярче.

Определение плотности потока спорадических метеоров можно иллюстрировать на следующем примере.

Т а б л и ц а 1

Среднее число спорадических метеоров для всей Земли за сутки

Видимая звездная величина	Наблюдаемое число метеоров	Истинное число метеоров	Звездная величина	Истинное число метеоров
—3	4 000	4 000	7	262 · 10 ⁶
—2	13 000	13 000	8	787 · 10 ⁶
—1	40 000	40 000	9	236 · 10 ⁷
0	120 000	120 000	10	708 · 10 ⁷
1	360 000	360 000	11	212 · 10 ⁸
2	1 080 000	1 080 000	12	638 · 10 ⁸
3	2 800 000	3 240 000		
4	4 860 000	9 720 000		
5	2 400 000	29 200 000		
6	350 000	87 480 000		

По визуальным наблюдениям околоразенитной области (диаметр поля зрения 60°) за $t=180$ часов было зарегистрировано следующее количество метеоров разных звездных величин:

Зв. величина	—2	—1	0	1	2	Всего метеоров
Число метеоров	2	5	17	55	161	239

Число метеоров +2-й звездной величины и ярче равно $F(2)=239$. Так как на высоте 95—100 км площадь σ составляет 10^4 км², то $\sigma t=6,5 \cdot 10^{15}$ м²·с. По формуле (6) находим, что плотность потока метеоров 2-й звездной величины и ярче равна $N(2)=3,7 \cdot 10^{-14}$ метеоров/м²·с · (2π ср). Воспользовавшись средним значением параметра $\kappa=3$, по

формуле (7) вычисляем плотность потока метеоров 0-й звездной величины и ярче:

$$N(0) = 4,1 \cdot 10^{-15} \text{ метеор}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot 2\pi).$$

В главе V будет показано, что закон распределения метеоров по звездным величинам позволяет определить и закон распределения метеорных тел по массам.

§ 2. СУТОЧНЫЕ И СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ЧИСЛЕННОСТИ МЕТЕОРОВ

Частота появления метеоров относится к достаточно подробно изученным вопросам метеорной астрономии. На основе визуальных, а впоследствии фотографических и радиолокационных наблюдений было выявлено, что число метеоров, регистрируемых за один час, меняется в течение

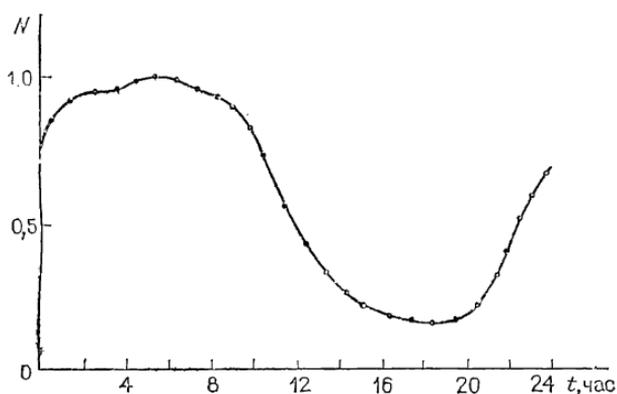


Рис. 7. Суточная вариация часовых чисел метеоров по радиолокационным наблюдениям в Душанбе. Время — декретное

суток. Вне периода активности главных метеорных потоков часовое число метеоров минимально около 18 часов местного времени и максимально в ранние утренние часы (около 6 часов). Оказывается, что после полуночи метеоров в среднем в два раза больше чем в вечерние часы.

Радиолокационные наблюдения позволили определить частоту появления метеоров и для дневного времени суток. Суточное распределение средних часовых чисел метеоров до +6 звездной величины по радиолокационным наблюдениям в Душанбе представлено на рис. 7. Общий ход кривой распределения часовых чисел в ночное время по ра-

диолокационным наблюдениям такой же, как и по данным оптических наблюдений.

Суточную вариацию численности метеоров качественно можно объяснить движением Земли вокруг Солнца, как это было сделано Дж. Скиапарелли еще в 1886 г. Если допустить, что метеорные радианты распределены по небесной сфере равномерно, а скорости метеорных тел такого же

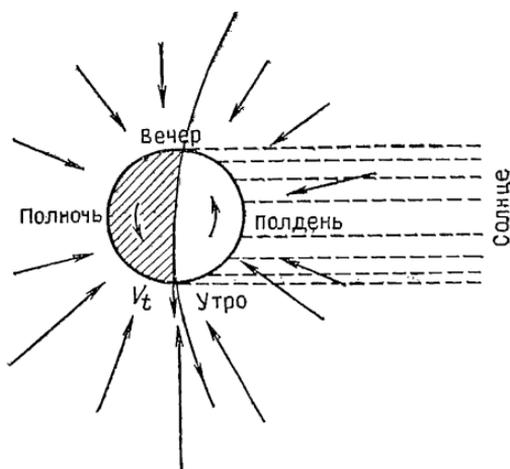


Рис. 8. Объяснение суточной вариации численности метеоров

порядка, как орбитальная скорость движения Земли, то в результате сложения скоростей метеорных тел и Земли число метеоров будет максимально в том направлении, в котором Земля движется по своей орбите. Точка на небесной сфере, к которой направлен вектор скорости Земли, называется *апексом*. Утренняя сторона Земли обращена к апексу, и, следовательно, утром наблюдатель замечает больше метеоров, чем вечером. Вечером мы наблюдаем метеоры, порождаемые метеороидами, догоняющими Землю, и так как их относительная скорость мала*), то в вечернее время число метеоров будет минимально (рис. 8).

Часовые числа метеоров меняются и в течение года. Средняя годовичная вариация численности метеоров, полученная по многочисленным данным визуальных и радиолока-

*) Блеск метеора очень сильно зависит от скорости метеороида: ведь энергия тела пропорциональна квадрату скорости, интенсивность испарения — ее кубу, так что блеск пропорционален 4-й степени скорости (см. главу IV, § 2),

ционных наблюдений, приведена на рис. 9 (из этих данных по возможности исключались метеорные потоки). Рис. 9 показывает, что численность метеоров минимальна в первой половине года и максимальна во второй. Увеличение численности метеоров во второй половине года, наблюдаемое одновременно для северного и южного полушарий

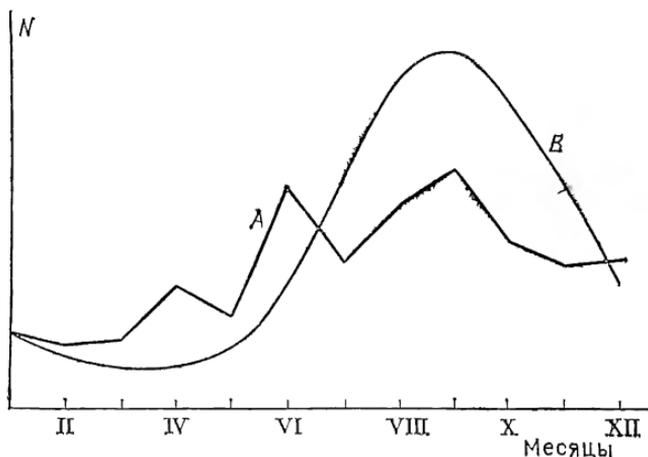


Рис. 9. Годичная вариация численности метеоров по радиолокационным наблюдениям в Душанбе (A) и визуальным наблюдениям (B) по данным Мак-Кинли

неба, можно объяснить неравномерным распределением пространственной плотности метеорных тел в окрестности земной орбиты. Аномальное увеличение численности метеоров в мае—июле оказалось связанным с тем фактом, что именно в этот период орбиту Земли пересекает значительно большее количество комет, чем в остальное время года,

§ 3. ВЫСОТЫ И СКОРОСТИ МЕТЕОРОВ

Высоты метеоров могут быть определены по визуальным и фотографическим наблюдениям из двух пунктов. Обычно метеоры появляются на высотах ниже 120 км и исчезают на высотах около 60 км над земной поверхностью.

Высота метеора зависит от скорости, массы, плотности метеорного тела и наклона его траектории к горизонту. Чем больше скорость метеорного тела, тем больше высота начала его разрушения и свечения метеора, так как метеороид с большей скоростью гораздо чаще сталкивается с час-

тицами воздуха. При одной и той же скорости высота метеора зависит от массы и плотности метеороида. Чем больше масса и плотность метеороида, тем ниже он проникает в атмосферу Земли.

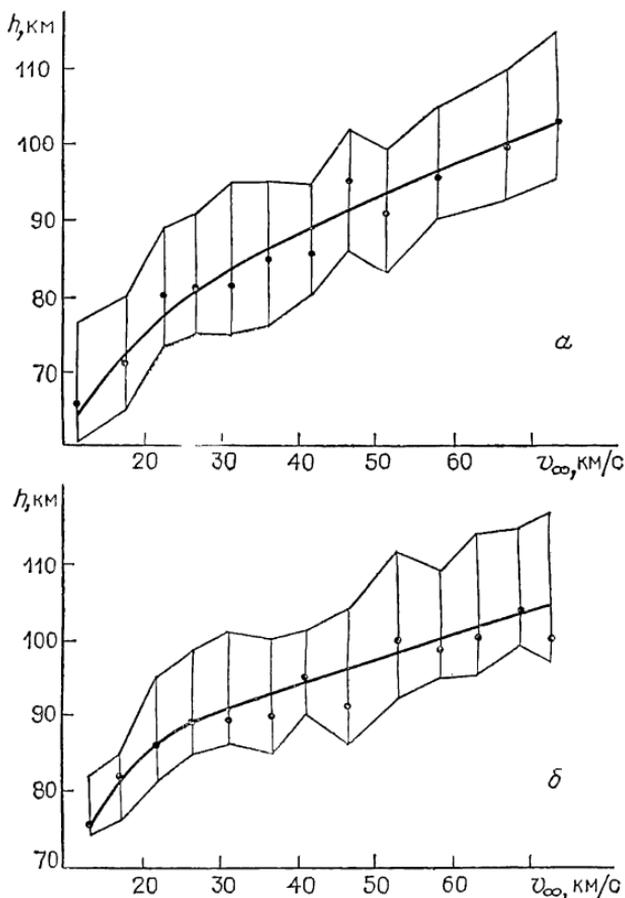


Рис. 10. Зависимость высот метеоров h от внеатмосферной скорости v_{∞} . Средние точки соответствуют высоте максимума яркости, а верхние и нижние соответственно высотам появления и исчезновения метеоров; *a* — по наблюдениям ярких метеоров, *b* — по наблюдениям слабых метеоров

На рис. 10 приведены графики зависимости высот h от внеатмосферной скорости v_{∞} для метеоров, сфотографированных камерами Супер-Шмидт (максимальная абсолютная звездная величина $-2 - +3^m$), и для метеоров, сфотографированных в Душанбе (максимальная абсолютная звездная величина $-6 - 0^m$). Из рисунка отчетливо

видно, что высоты подавляющего большинства метеоров заключены в интервалах 120–70 км. Число метеоров, высоты которых меньше 65 км, весьма незначительно.

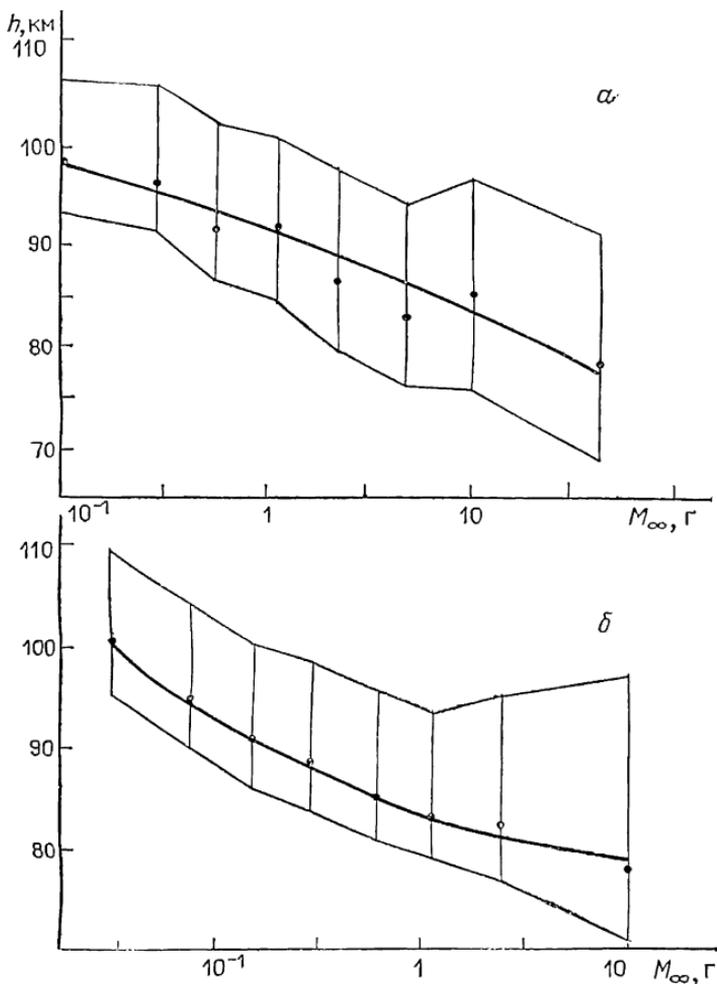


Рис. 11. Зависимость высот метеоров h от доатмосферных масс метеорных тел M_{∞} . Средние точки соответствуют высотам максимума яркости, верхние и нижние точки — соответственно высотам появления и исчезновения; а — по наблюдениям ярких, б — по наблюдениям слабых метеоров

Из рис. 10 следует интересный факт: большинство метеоров угасает на высоте около 80–90 км. Только массивные и медленные метеороиды, порождающие болиды, проникают ниже, разрушаясь на высотах 40–60 км. Еще

более крупные метеороиды, порождающие очень яркие болиды, наподобие огненных шаров, перестают светиться на высотах 15—20 км. Не успев полностью испариться на этих высотах, они теряют свою космическую скорость и падают на Землю под действием силы тяжести. Согласно исследованиям Б. Ю. Левина на поверхность Земли могут

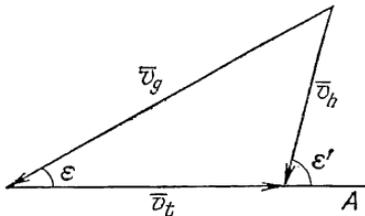


Рис. 12. К определению геоцентрической скорости метеороида v_g : ϵ — элонгация видимого радианта от апекса A , ϵ' — элонгация истинного радианта

выпасть лишь массивные тела, скорость входа которых в атмосферу не превышает 22 км/с. Выпавшую на поверхность Земли часть метеороидного тела называют метеоритом. Метеоритам обычно дают название по местности, в которой они выпали, например, Сихотэ-Алинский, Никольское, Хмелевка.

Зависимость высот метеороидов от доатмосферной массы метеороидов иллюстрируют графики рис. 11, построенные по данным фотографических наблюдений ярких и слабых метеоров.

Эти графики показывают степень проникновения метеороидов в глубь земной атмосферы в зависимости от их начальной массы.

Особый интерес представляют высоты метеоров, принадлежащих к метеорным потокам, так как отклонение этих высот от средней зависимости высота — скорость характеризует физические свойства метеорных тел данного потока. Например, метеоры потока Драконид имеют anomalно большие значения высот появления по сравнению с другими метеорами, обладающими такой же скоростью. Оказалось, что это связано с чрезвычайно рыхлой структурой метеорных тел роя Драконид.

Для исследования движения метеороида в Солнечной системе необходимо знать его гелиоцентрическую скорость. Скорость метеороида относительно Земли v_g (геоцентрическая скорость) складывается из его скорости относительно Солнца и из скорости движения Земли. Земля движется со скоростью $v_t = 29,8$ км/с. Гелиоцентрическая скорость метеороида v_h на среднем расстоянии Земли от Солнца не превышает 42,2 км/с. Если Земля встречает метеороид «в лоб», то он имеет скорость $v_g = 29,8 + 42,2 = 72$ км/с. Если же такой метеороид догоняет Землю, то подлетает к ней со скоростью $v_g = 42,2 - 29,8 = 12,4$ км/с,

В общем случае векторы скоростей метеороида v_h и Земли v_t складывают по правилу параллелограмма, диагональ которого показывает направление и величину геоцентрической скорости метеороида — v_g (рис. 12):

$$v_g^2 = v_h^2 + v_t^2 - 2v_h \cdot v_t \cos e',$$

где e' — угол между вектором гелиоцентрической скорости метеороида и направлением на антиапекс.

Под действием силы притяжения Земли метеороиды разгоняются до скорости v_∞ (доатмосферная скорость метеора), большей v_g и определяемой по формуле

$$v_\infty = \sqrt{v_g^2 + \frac{2fM_t}{R}} \approx 10^3 \sqrt{v_g^2 + 125} \text{ м/с}, \quad (8)$$

где $f=6,673 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$ — постоянная тяготения, $M_t=5,976 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ — масса Земли, $R=6,37 \cdot 10^6 \text{ м}$ — средний радиус Земли.

Соотношение (8) имеет интересное следствие: неподвижный по отношению к Земле метеороид ($v_g=0$) под действием земного притяжения влетел бы с достаточно большого расстояния в атмосферу со скоростью $v_\infty = \sqrt{125} \approx 11,2 \text{ км/с}$ (вторая космическая скорость). Следовательно, ни один метеороид, движущийся вокруг Солнца, не может войти в атмосферу Земли со скоростью меньше 11,2 км/с. Знание внеатмосферной скорости метеороида необходимо для изучения процессов свечения метеора и свойств атмосферы.

Метеороид испытывает некоторое торможение в земной атмосфере из-за сопротивления воздуха. Наблюдаемая скорость метеора v , исправленная за это торможение, и будет его внеатмосферной скоростью v_∞ . Пользуясь соотношением (8), можно получить геоцентрическую скорость метеора, а затем, определив координаты радианта, и гелиоцентрическую скорость.

На рис. 13 приведены распределения скоростей метеоров по фотографическим наблюдениям. В этих распределениях выделяются два максимума: первый — около 20—30 км, а второй — в области 60—70 км/с. Между этими максимумами при скорости около 50 км/с имеется четко выраженный минимум. На положении второго максимума сильно сказалось влияние метеорного потока Персеид. Первый максимум соответствует догоняющим Землю метеороидам, а второй — встречным.

Результаты фотографических и многочисленных радиолокационных измерений скоростей метеоров показывают, что подавляющее большинство метеорных тел

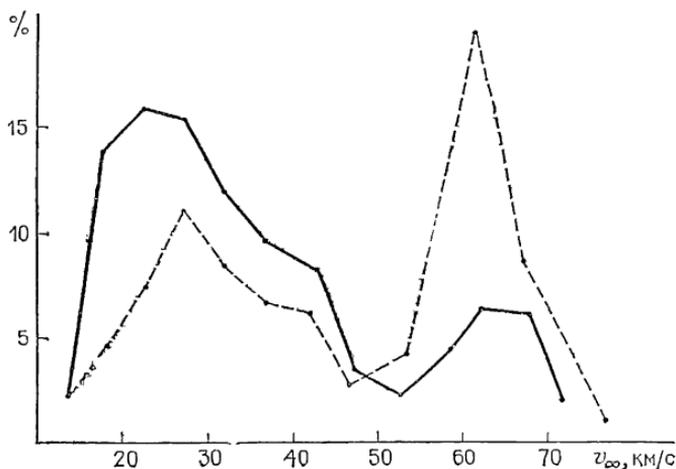


Рис. 13. Распределение внеатмосферных скоростей метеорных тел по фотографическим наблюдениям. Сплошная линия — яркие метеоры, прерывистая — слабые метеоры

движется вокруг Солнца по эллиптическим орбитам. Следовательно, метеороиды принадлежат Солнечной системе, а не приходят к нам из межзвездного пространства.

§ 4. ЯРКИЕ МЕТЕОРЫ И ИХ СЛЕДЫ

Метеоры, которые по своей яркости превосходят Венеру (-4^m), называются *болидами*. Верхний предел яркости болидов неограничен: наблюдаются болиды, сравнимые по яркости с Луной в полнолуние. Очень редко регистрируются болиды, по яркости равные или даже превосходящие Солнце.

Полет яркого болида — захватывающее природное явление. Яркие болиды имеют различный цвет: чаще зеленовато-белый или голубовато-белый, а иногда желтоватый или красный. Голова болида обычно имеет значительный угловой диаметр и каплевидную форму.

На фото X приведены мгновенные снимки яркого болида 12 августа 1964 г., пролетевшего над Душанбе. Траектория болида была вычислена по базисным снимкам. Болид появился на высоте 80 км. Средняя скорость состави-

ла 24,6 км/с. Болид дал яркую продолжительную вспышку. Во время вспышки метеор по яркости был сравним с полной Луной. Доатмосферная масса метеорного тела превышала 45 кг. В начале пути мгновенные изображения болида точечные. В дальнейшем появляется хвост, который растет вплоть до вспышки, где изображение хвоста налагается на предшествующее изображение. Максимальная длина хвоста, которую удалось измерить, превышает 1,2 км, а диаметр головы болида составляет около 1 км.

Характерной особенностью большинства ярких метеоров являются вспышки их блеска. Вспышкой называют резкое увеличение блеска метеора на несколько звездных величин в течение короткого промежутка времени (несколько миллисекунд). На фото XI приведен снимок метеора со вспышками. Исследования показывают, что вспышки метеоров обусловлены отделением от метеорного тела огромного количества мельчайших частиц с массами 10^{-5} – 10^{-6} г и размерами 100–150 мкм.

Резкие вспышки блеска относительно редко наблюдаются у слабых метеоров. Мелкие метеорные тела, порождающие слабые метеоры, вероятно, имеют довольно однородную структуру, не способную образовывать вспышки.

Вспышка метеора часто является следствием распада метеороида на несколько осколков. На фото XII приведены мгновенные фотографии метеора 1 июля 1977 г. Метеор появился на высоте 92 км. Внеатмосферная скорость метеора 23 км/с. На высоте 70 км блеск метеора резко подскочил до $-5,4^m$. В этот момент метеороид распался на несколько осколков, образовавших самостоятельные метеоры. На мгновенных снимках можно различить изображения пяти «субметеоров», образованных отдельными осколками.

Давно замечено, что когда высота болида становится менее 50 км, его полет может сопровождаться разнообразными звуковыми явлениями. Сначала слышен резкий одиночный или многократный звук взрыва, как от ударных волн, образованных телами, движущимися со сверхзвуковыми скоростями. Затем доносится продолжающийся некоторое время грохочущий звук, наподобие раскатов грома. Этот звук вызван резким сжатием воздуха в полости за метеороидом. Область глубокого вакуума образуется сразу за метеороидом, потому что его скорость значительно больше средней скорости молекул воздуха. До наблюдателя сначала доходит грохот от ближайшего участка траектории болида. Звуковые волны от остальных точек траектории

болида воспринимаются как постепенно замирающие раскаты, подобно обычной грозе. Так как скорость распространения звука при нормальных условиях равна 330 м/с, то проходит несколько минут после полета болида, прежде чем мы услышим грохот. По этому интервалу времени между пролетом болида и его звуковой волной можно найти кратчайшее расстояние до болида.

Кроме вышеуказанных звуковых явлений, следующих после пролета болидов и причины которых выявлены довольно хорошо, некоторыми наблюдателями отмечены свист и шипение, слышимые одновременно с полетом болида. Болиды с аномальными звуками, распространяющимися со скоростью света, по предложению П. Л. Драверта были названы *электрофонными*. Еще в 1951 г. известным наблюдателем метеоров И. С. Астаповичем был опубликован каталог 163 электрофонных болидов, наблюдавшихся с 585 г. по 1950 г.

Существенное отличие электрофонных болидов от обычных заключается так же в том, что они угасают на более низких высотах и имеют большую продолжительность полета. Можно допустить, что аномальные звуки, слышимые одновременно с полетом болидов, по-видимому, представляют собой какую-то форму электромагнитных возмущений, образуемых метеороидом. Австралийский ученый К. Кай считает, что эти звуки обусловлены излучением яркими болидами значительной электромагнитной энергии в области очень низких частот. Расчеты советского астронома В. А. Бронштэна подтверждают эту точку зрения.

Для выявления природы электрофонных болидов требуется накопление новых наблюдательных фактов, в чем могут оказать большую помощь любители астрономии.

После пролета ярких быстрых метеоров часто остаются газовые или ионизационные следы в виде серебристо-голубой полоски вдоль траектории метеора. Они представляют собой область ионизованного газа, светящегося вследствие процессов рекомбинации. Такие следы оставляют и обычные метеоры, но они видны в течение нескольких секунд, тогда как следы, оставляемые очень яркими и быстрыми метеорами, могут быть видны в продолжении многих минут. Согласно данным чехословацкого астронома Л. Кресака один долгоживущий метеорный след можно увидеть за 150 часов наблюдений. Замечено, что частота появления стойких следов, оставленных быстрыми и яркими метеорами потоков Персеид, Орионид и Леонид, втрое больше.

Сразу после образования метеорный след начинает расширяться и менять свою форму, принимая иногда причудливый вид. Согласно визуальным наблюдениям И. С. Астаповича длительность 98,4% следов составляет менее 7 с и мода (максимум распределения) приходится на длительность 2 с. Остальные 1,6% следов являются стойкими и наблюдаются на высотах 82—87 км.

Подобный анализ наблюдений метеорных следов показывает, что интервал высот образования метеорных следов чаще заключен в пределах 80—95 км, и чем ярче метеор, тем больше длительность оставляемого им следа. Было выявлено, что имеется линейная зависимость между звездной величиной следа и его длительностью, а изменение интенсивности свечения следа I_t со временем t выражается формулой

$$I_t = I_0 \cdot e^{-kt},$$

где I_0 — начальная интенсивность следа, k — постоянная затухания следа. Убывание интенсивности свечения следа со временем зависит от ряда причин. Главными из них являются диффузия (перемешивание), прилипание электронов к нейтральным частицам и рассеяние следа верхнеатмосферными ветрами. Наблюдения показывают, что у разных следов значение k различно и меняется от 0,1 до 2,7 в зависимости от высоты. Наименьшие значения k (0,1—0,5), а следовательно, самые длительные следы, наблюдаются на высотах 87—95 км независимо от яркости следа, подтверждая тем самым факт, что максимум числа следов приходится именно на эти высоты.

Кроме ионизационных, наблюдаются пылевые метеорные следы, образующиеся после пролета ярких болидов, сопровождаемых выпадением метеоритов. Пылевые следы видны благодаря отражению солнечного света и наблюдаются днем или в сумерках. Высоты пылевых следов ниже, чем ионизационных. Чаще они образуются на высотах 40 км и ниже. После образования пылевой метеорный след также начинает деформироваться, принимая различные формы, и смещаться, или, как говорят, дрейфовать.

§ 5. АТМОСФЕРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В МЕТЕОРНОЙ ЗОНЕ

Раньше считалось, что на высотах возгорания метеоров земная атмосфера спокойна и неподвижна, а перемещения воздушных масс происходят только в нижних слоях атмосферы на высотах до 11—12 км. Совершенно неожиданным

явился факт существования ураганных ветров, господствующих на высотах 80—100 км. Этот факт был обнаружен советскими учеными по наблюдениям дрейфа метеорных следов. В 40-х годах В. В. Федынский, И. С. Астапович и другие исследователи на основе большого ряда визуальных наблюдений метеорных следов, проведенных в Таджи-

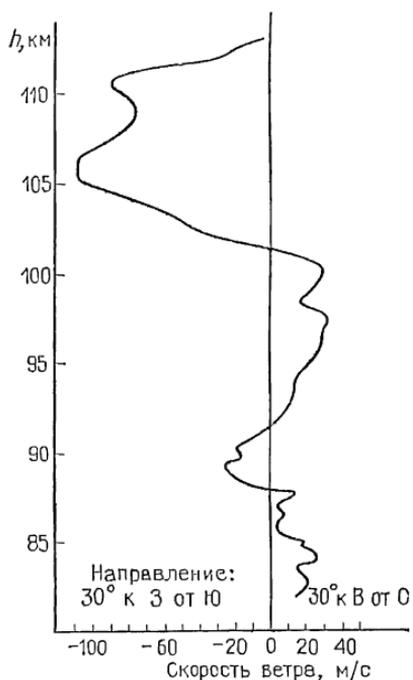


Рис. 14. Изменение скорости ветра с высотой, определенное Лиллером и Уишлом по фотографиям метеорных следов над Нью-Мексико

кистане, выявили характерные особенности воздушных течений в метеорной зоне атмосферы. Оказалось, что в этой зоне воздушные течения перемещают метеорные следы преимущественно к востоку со средней скоростью около 70 м/с. За рубежом многочисленные визуальные наблюдения метеорных следов проводились под руководством канадского ученого П. Миллмана.

Визуальные наблюдения метеорных следов позволили получить данные не только о скорости и направлении верхнеатмосферных ветров, но и дали представление об изменении величины и направления скорости ветров с высотой, о наличии турбулентности и характере перемешивания воздушных

масс в метеорной зоне атмосферы. Так, например, было выявлено, что для двух высотных уровней, отличающихся на несколько километров, направления ветров могут быть противоположными и что встречаются даже вертикальные течения.

Несколько позже, в 50-х годах, с помощью базисных фотографических наблюдений метеорных следов стало возможным получение более точных данных о воздушных течениях в метеорной зоне, в частности о высотном распределении скорости и направлений верхнеатмосферных ветров.

Фотографирование метеорных следов может быть успешно проведено и с помощью короткофокусных камер с объективами «Юпитер-3», «Гелиос-40» и других.

На рис. 14 представлены результаты измерения скорости ветра на различных высотах по базисным фотографическим наблюдениям метеорных следов над Нью-Мексико. Здесь явно выделяется действие турбулентных ветров на метеорные следы. Средняя величина изменения скорости ветра с высотой составляет 50 м/с на км.

В настоящее время основным методом наблюдения дрейфа метеорных следов, а следовательно, и изучения воздушных течений в метеорной зоне, является радиолокационный метод, использующий эффект Доплера и эффект когерентности. Радиолокационные методы исследования скорости и направления воздушных течений по наблюдениям дрейфа метеорных следов получили мощное развитие в СССР благодаря усилиям коллективов исследователей в Харькове, Томске, Казани, Обнинске, Душанбе, Ашхабаде, Фрунзе и в других городах. По исследованию метеоров и атмосферы радиолокационными методами советские ученые занимают ведущее место в мире.

Используя радиолокационные методы наблюдения метеоров в различных пунктах на разных географических широтах и долготах, удалось получить суточные, сезонные и другие вариации скорости ветра в метеорной зоне и особенности воздушных течений над различными широтами. Так, например, над Душанбе средние характеристики ветра в метеорной зоне имеют следующие особенности: средняя скорость 30—40 м/с и практически всегда направлена на восток. По наблюдениям на экваторе, проведенным Советской экваториальной метеорной экспедицией в 1968—1970 гг., было выявлено, что скорость преобладающего ветра в верхней атмосфере большую часть года направлена на запад. Сравнение данных о скорости и направлении дрейфа метеорных следов, полученных на разных географических широтах, позволило получить качественную картину глобальной циркуляции верхней атмосферы Земли.

Обработка многолетних наблюдений показывает, что средняя скорость верхнеатмосферных ветров зависит от фазы цикла солнечной активности — совокупности явлений, периодически возникающих в атмосфере Солнца (в среднем через каждые 11 лет). Оказалось, что во время максимума солнечной активности преобладающая скорость ветра на широте $38,5^\circ$ почти вдвое больше, чем во время минимума.

В настоящее время исследование скорости и направлений воздушных течений по радиолокационным наблюдениям дрейфа метеорных следов составляет важный раздел Международной программы ГЛОБМЕТ, охватывающий период 1980—1990 гг. В течение этих лет будет проведено всестороннее изучение метеоров и, в частности, дрейфа метеорных следов, что позволит решать ряд важных научных и прикладных задач.

§ 6. СПЕКТРЫ МЕТЕОРОВ

Первые попытки наблюдения спектров метеоров с помощью стеклянных призм были сделаны в XIX в. Оказалось, что спектр метеора состоит из ярких линий или является непрерывным с преобладанием определенного цвета. Чаще всего (в 75 % случаев) наблюдается ярко-оранжевая D-линия натрия. Затем наиболее часто встречается зеленая линия магния ($\text{MgI } \lambda=5176 \text{ \AA}$). Если эта линия довольно яркая, то метеор выглядит зеленоватым. Линейчатый спектр метеора свидетельствует, что свечение обусловлено сильно нагретым газом.

Более конкретных результатов нужно было ожидать от фотографирования метеорных спектров. Первое успешное спектрографирование метеоров, как уже отмечалось, было организовано в 1904—1907 гг. С. Н. Блажко. В полученных и обработанных им первых в мире метеорных спектрах были отождествлены линии кальция и магния (CaI , CaII и MgI). До 1931 г. во всем мире имелось всего 11 спектров метеоров. За исключением спектров С. Н. Блажко, все они были получены случайно. С тридцатых годов было начато систематическое фотографирование метеорных спектров в различных странах. Наибольшее количество спектров метеоров получено в СССР, Канаде, США, Чехословакии и Японии. Количество сфотографированных к настоящему времени спектров исчисляется несколькими тысячами. Благодаря применению дифракционных решеток значительно возросла дисперсия: до десятков ангстрем на мм ($\text{\AA}/\text{мм}$) *). В ЧССР Э. Цеплеха получил несколько метеорных спектров с дисперсией от 38 до 11 $\text{\AA}/\text{мм}$. Он же получил уникальный спектр вспышки болида — $12,5^m$, в котором отождествлено рекордное

*) Дисперсия спектрограммы считается тем большей, чем меньше число ангстрем приходится на 1 мм длины спектра, т. е. чем больше его масштаб.

число линий (более 1000). В Душанбе сфотографированы спектры ярких метеоров с дисперсией 67 Å/мм, уникальные в том отношении, что получены по методу мгновенной экспозиции.

Применение высокочувствительных телевизионных установок с дифракционными решетками позволило получить в Ашхабаде спектры метеоров +1 — +4^m с дисперсией 260 Å/мм. В этих спектрах были обнаружены интересные эмиссии (зеленая запрещенная линия кислорода OI 5577 Å, полосы нейтрального молекулярного азота N₂ и др.).

В метеорных спектрах (фото XIII) видны главным образом яркие эмиссионные линии. Среди них обнаружены линии нейтральных атомов железа FeI (5,63), натрия NaI (4,27), марганца MnI (5,20), кальция CaI (5,30), хрома CrI (3,86), азота NI (13,93), магния MgI (7,16), алюминия AlI (4,97), кислорода OI (10,94), никеля NiI (3,83), кремния SiI (7,14), водорода HI (12,04), титана TiI (3,39), кобальта CoI (4,0) и углерода CI (10,08), линии ионизированных атомов магния MgII (5,4), кремния SiII (3,1), железа FeII (5,51), азота NII (20,66), кислорода OII (31,31), алюминия AlII (17,0), титана TiII (4,28) и хрома CrII (6,75), полосы шести молекул CN, CN, C₂, N₂, MgO, FeO и ионизированных молекул азота N₂. В скобках указаны потенциалы возбуждения в электрон-вольтах (эВ). В спектрах метеоров отождествлены также линии и некоторых других элементов, таких, как литий LiI, калий KI, молибден MoI, стронций SrII и барий BaII, но реальное их присутствие в метеороидах вызывает сомнение. Из перечисленных элементов кислород и азот, обнаруженные в спектрах только быстрых метеоров, по-видимому, имеют атмосферное происхождение.

Свечение метеоров обусловлено атомами и молекулами, имеющими в основном низкие потенциалы возбуждения. Почти у 80% обнаруженных мультиплетов верхние потенциалы возбуждения составляют 2—7 эВ, а в среднем равны 4,5 эВ. Для остальных мультиплетов потенциалы возбуждения находятся в пределах 10—14 эВ. Только лишь мультиплеты NII и OII имеют потенциалы возбуждения около 20 эВ.

Если вторгшийся в земную атмосферу метеороид имеет скорость 40 км/с, то испарившиеся атомы метеороида первоначально движутся со скоростью метеороида. Тогда, если метеороид каменный, то испарившийся метеорный атом массой $30 \cdot 1,67 \cdot 10^{-24}$ г будет иметь кинетическую

энергию

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 30 \cdot 1,67 \cdot 10^{-24} (40 \cdot 10^5)^2 \approx 4 \cdot 10^{10} \text{ эрг} \approx 250 \text{ эВ.}$$

Этой энергии вполне достаточно для возбуждения и ионизации метеорных атомов. Излучение возбужденных атомов и обуславливает свечение метеора.

Самым распространенным элементом в метеорных телах, обнаруженным по метеорным спектрам, является железо. Это объясняется низким потенциалом возбуждения и ионизации атомов этого элемента и его широкой распространенностью. В оранжево-зеленой области метеорных спектров наиболее яркими являются D линии натрия и линии магния. Линии ионизированных кальция и магния обнаруживаются в сине-фиолетовой области спектров метеоров с большими скоростями. Линии ионизированного кремния являются интенсивными в красной области, а атмосферных азота и кислорода — в близкой инфракрасной.

Простая классификация метеорных спектров, основанная на яркости линий в двух участках спектра, а именно в оранжево-зеленой (5000–6000 Å) и в сине-фиолетовой (3500–4500 Å), была предложена П. Миллманом. Согласно этой классификации спектры метеоров разделяются на 4 типа:

тип Y — в сине-фиолетовой области спектра очень интенсивными являются линии H и K ионизированного кальция CaII;

тип X — в оранжево-зеленой или сине-фиолетовой области очень интенсивны D-линии натрия NaI или линии магния MgI;

тип Z — в оранжево-зеленой или сине-фиолетовой области очень интенсивны линии железа FeI или хрома CrI;

тип W — прочие спектры.

Было выявлено, что наиболее яркими в метеорных спектрах могут быть линии CaII, NaI, MgI, FeI, CrI и N₂. Появление линий тех или иных элементов в метеорных спектрах зависит как от химического состава метеорного тела, так и от скорости, высоты и блеска метеора. Так, линии H и K ионизированного кальция CaII свойственны спектрам быстрых метеоров. Линии нейтральных атомов натрия, магния и железа с низкими потенциалами возбуждения преобладают в спектрах медленных метеоров. А в спектрах метеоров, движущихся со скоростями менее 25 км/с, линии ионизированных элементов полностью отсутствуют. Наблюдалось также несколько метеоров, спектр которых состоял исключительно из линий железа.

У быстрых метеоров, принадлежащих к потокам со скоростями 60 км/с и более (Персеиды, Ориониды, Леониды), преобладает тип спектра Y. Поточные метеоры с умеренной скоростью 30—50 км/с (Геминиды, Тауриды и т. д.) чаще имеют спектр типа X и реже тип Y. Все поточные метеоры с малыми скоростями порядка 20—30 км/с (Дракониды и др.) имеют спектры типа X или Z. Было замечено, что по мере проникновения метеорного тела во все более плотные слои атмосферы тип спектра меняется. Спектры некоторых метеоров Персеид в начальных участках траектории состояли в основном из линий нейтрального железа и, следовательно, соответствовали спектрам медленных метеоров типа Z. На конечном участке траектории, т. е. на меньших высотах, в более плотных слоях атмосферы, их спектры приобрели характерные черты спектров типа Y быстрых метеоров с интенсивными линиями ионизированных элементов.

Характер спектра может изменяться и во вспышках метеора. В частности, усиливается линия дублета натрия и линии магния.

Исследование спектров метеоров до недавнего времени носило качественный характер и сводилось к измерению длин волн и отождествлению спектральных линий. Важной задачей дальнейшего исследования является определение количественного содержания основных химических элементов в метеорных телах, что необходимо для выяснения природы и происхождения малых тел Солнечной системы.

Первые количественные определения химического состава метеорных тел по спектрам девяти метеоров потока Драконид и двух метеоров Персеид были проведены П. Миллманом, а затем Эд. Цеплехой, К. Нагасавой, Г. Харви и другими. В табл. 2 приведено содержание элементов относительно железа по данным метеорных спектров и из анализа каменных метеоритов.

Из 14 элементов, входящих в состав метеоритов, 12 отождествлены и в спектрах метеоров. В последних отсутствуют линии серы и фосфора, что объясняется высокими потенциалами возбуждения этих элементов для излучения в визуальной области спектра. С другой стороны, найденные в метеорных спектрах линии водорода, азота и стронция не обнаруживаются в спектрах метеоритов. Линии стронция очень слабы и отождествлены с большой неуверенностью, а линии азота безусловно имеют атмосферное происхождение. Ярко-красная линия водорода в

спектрах быстрых метеоров свидетельствует о родстве метеорных тел с кометами, так как их ядра, согласно современным данным, в изобилии содержат H_2O .

Из линий 15 элементов, отождествленных в спектрах комет, 3 элемента (гелий, ванадий и медь) пока не найдены в спектрах метеоров. С другой стороны, в спектрах

Т а б л и ц а 2

Логарифмы отношений массовых концентраций химических элементов к концентрации железа

Автор	Элемент							
	Ca	Mg	Mn	Cr	Ni	Co	Na	Al
Метеоры:								
П. Миллман (1964)	-1,37	-0,32	—	—	—	—	-1,37	—
З. Цеплеха (1965)	-1,19	-0,30	-2,76	-3,90	-0,98	-1,29	-3,13	-3,44
К. Нагасава (1978)	-3,11	0,55	-3,67	—	—	—	—	—
Хондриты:								
А. А. Явнель	-1,26	-0,26	-2,05	-1,92	-1,92	-2,56	-1,55	-1,30

комет отсутствуют линии таких распространенных в метеорных телах элементов, как магний, алюминий, кремний и титан.

Имеющиеся данные о химическом составе метеороидов, комет и метеоритов свидетельствуют о генетической связи этих тел. Среди метеорных тел обнаруживаются и имеющие родство с астероидами.

Большинство метеорных спектров имеют низкое разрешение — от 200—400 Å/мм в синем диапазоне спектра, до 800—1000 Å/мм в красном, и получены спектры лишь очень ярких метеоров. Поэтому для решения задач, связанных с физикой метеорных тел, наряду с лабораторными экспериментами необходимо получить достаточно большое количество метеорных спектров с высокой дисперсией.

§ 7. СТРУКТУРА И ПЛОТНОСТЬ МЕТЕОРОИДОВ

На основе фотографических наблюдений более чем 3000 спорадических метеоров, порождаемых метеороидами с массами от 10^{-4} до 10^8 г, З. Цеплеха пришел к за-

ключению, что метеорные тела по плотности и структуре делятся на пять групп (табл. 3).

Оказывается, что орбиты метеороидов первой и второй групп имеют астероидный, а остальные — кометный характер.

Плотности метеорных тел некоторых метеорных роев приведены в табл. 4 по данным Ф. Верниани, полученным по фотографическим наблюдениям слабых метеоров *).

Таблица 3

Классификация метеороидов по плотности и структуре
(по Цеплехе)

Группа	Средняя плотность, г/см ³	Предполагаемый состав
Астероидные	3,7	обыкновенные хондриты *)
A	2,1	углистые хондриты
B	1,0	плотное кометное вещество
C	0,6	обычное кометное вещество
D	0,2	рыхлое кометное вещество

*) Хондриты—это каменные метеориты плотностью от 2 до 3,7 г/см³, содержащие округлые зерна — хондры. Очень темные хондриты (из-за присутствия магнетита Fe₃O₄) называют углистыми.

Согласно данным табл. 4, среднее значение плотности метеорных тел, входящих в известные метеорные рои, составляет 0,28 г/см³. Низкие значения плотности метеорных тел были получены и по фотографическим наблюдениям ярких метеоров. Для более мелких метеорных тел, порождающих метеоры 5–8^m, значения плотности несколько выше и составляют 0,8–0,9 г/см³. А плотность еще более мелких частиц — микрометеороидов, массой менее 10⁻⁶ г, сказывается близкой к 3,5 г/см³.

Выяснено, что средняя плотность спорадических метеорных тел убывает с увеличением афелийного расстояния орбиты.

Фотографические наблюдения по методу мгновенной экспозиции наглядно показали, что при движении в атмосфере метеороиды подвергаются различным видам дробления, и, как правило, от метеорного тела почти непре-

*) Есть основание полагать, что плотности, полученные Ф. Верниани, занижены, потому что при их определении недостаточно учитывался процесс дробления метеорных тел.

рывно отделяются частицы, образующие хвосты метеоров (фото X). Массы этих частиц заключены в пределах 10^{-8} — 10^{-7} г. Напомним, что во время вспышки метеора от метеорного тела отделяются мельчайшие метеорные частицы, имеющие массы порядка 10^{-6} г.

Т а б л и ц а 4

Средние плотности метеорных тел (по Верниани)

Поток	δ , г/см ³	Поток	δ , г/см ³
Геминиды	1,06	Северные Тауриды	0,26
Южные Тауриды	0,28	σ -Гидриды	0,40
α -Каприкорниды	0,14	Лириды	0,39
Квадрантиды	0,20	Северные ι -Аквариды	0,63
Персеиды	0,29	Дракониды	0,01
δ -Аквариды	0,27	Виргиниды	0,70
Южные ι -Аквариды	0,30	Леониды	0,60
Ориониды	0,25	η -Аквариды	0,60
κ -Цигниды	0,17	Спорадические	0,28

Все эти данные позволяют заключить, что метеорные тела, имеющие кометное происхождение, представляют собой хрупкие и пористые образования, состоящие из отдельных структурных элементов. Так как с увеличением массы объем пор увеличивается, то и плотность метеороидов уменьшается.

МЕТЕОРОИДЫ В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ

§ 1. АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ — СРЕДА МЕТЕОРНЫХ ЯВЛЕНИЙ

О среде, где происходят метеорные явления и прекращается самостоятельное существование метеорных тел, до двадцатых годов нашего столетия почти ничего не было известно. Ни плотность, ни давление, ни химический состав воздуха на этих высотах не были известны. Ничего не было известно и о господствующих здесь воздушных течениях.

Даже стратостаты, полеты которых были осуществлены в 30-х годах, могли подниматься с людьми и приборами только до высот около 22 км, а воздушные шары без экипажа с автоматическими измерительными приборами — до 30 км.

Первые результаты изучения верхних слоев атмосферы по наблюдениям метеоров оказались весьма неожиданными. В 1923 г. Ф. Линдеман и Дж. Добсон опубликовали работу «Теория метеоров, плотность и температура атмосферы». В ней на основе имевшихся данных о высотах появления и исчезновения метеоров авторы пытались рассмотреть физические процессы, возникающие при движении метеорных тел в атмосфере, и оценить плотность и температуру атмосферы. По их приближенным данным, температура на высоте около 60 км над земной поверхностью равнялась $+30^{\circ}\text{C}$, что совершенно не укладывалось в рамки существовавших в то время представлений о верхней атмосфере.

Дело в том, что согласно имевшимся тогда данным измерений, температура, по мере подъема над поверхностью Земли, уменьшается до высоты 11 км, после которой начинался слой атмосферы, имеющий почти постоянную температуру -50°C в любое время года и над любой точкой земного шара.

Использование наблюдений метеоров для изучения верхней атмосферы неожиданно выявило существование нового повышения температуры с высотой — верхней

температурной инверсии в стратосфере. С этого момента метеорные методы становятся одним из надежных инструментов исследования физического состояния стратосферы. До применения высотных ракет метеоры были, пожалуй, наилучшим средством определения плотности и температуры земной атмосферы на высотах 80—120 км.

Исследование верхних слоев атмосферы метеорными методами основывалось на том, что торможение метеорного тела пропорционально плотности воздуха на данной высоте и квадрату его скорости. Кроме того, торможение зависит от массы и плотности метеорного тела. Зная блеск метеора, скорость и торможение метеороида, можно определить плотность воздуха вдоль пути метеороида. Принимая молекулярный состав воздуха в метеорной зоне таким же, как на уровне моря, можно по данным метеорных наблюдений вычислить и температуру воздуха. В становлении современных представлений о верхней атмосфере в значительной степени мы обязаны изучению метеоров.

Прямые методы изучения верхних слоев земной атмосферы при помощи искусственных спутников Земли и высотных ракет получили широкое применение со времени Международного геофизического года (1957—1958). На основе теоретических предположений и экспериментальных данных (в том числе метеорных) получены результаты, удовлетворительно характеризующие в среднем распределения плотности, давления и температуры на больших высотах. Использование средних данных о структуре атмосферы позволяет решить обратную задачу — уточнение физической теории метеоров и выявление свойств самих метеорных тел.

По различным экспериментальным данным и теоретическим представлениям составлено несколько таблиц так называемой стандартной атмосферы, в которых приведены значения плотности, температуры, давления и другие параметры до значительных высот над поверхностью Земли. В табл. 5 мы приводим эти данные по стандартной атмосфере (1976) до высоты 130 км. Данные табл. 5 являются средними и возможны отклонения от них, обусловленные сезонными, широтными и другими вариациями.

В зависимости от изменения температуры с высотой атмосферу Земли принято делить на пять основных слоев, или сфер: тропосфера, стратосфера, мезосфера, термосфера и экзосфера.

На рис. 15 представлено приближенное распределение температуры земной атмосферы до высоты 130 км.

Ближайший к земной поверхности слой называется *тропосферой* (от греческого «тропос» — поворот). Она простирается до высот 10—11 км в полярных и умеренных широтах и до 14—17 км в тропических. В тропосфере температура резко снижается с высотой: в среднем на $6,5^\circ$ на каждый километр. В тропосфере сосредоточено более 75% массы всей атмосферы и почти вся содержащаяся в ней влага. Здесь происходит большинство наблюдаемых атмосферных явлений: образование облаков, туманов, осадков, гроз и т. п.

Тропосфера заканчивается *тропопаузой* — тонким слоем, где температура в среднем составляет около -55°C . Над тропосферой находится *стратосфера* — слой атмосферы, границы которого располагаются в среднем на высотах 11 и 50 км. От нижней границы стратосферы до высоты около 25 км температура сохраняется почти постоянной (-55°). Далее, до высоты 46 км, температура растет приблизительно на $2,8^\circ$ на километр и в переходном слое (на высотах 46—54 км), называемом *стратопаузой*, достигает примерно 0°C . Рост температуры и ее высокое значение в стратопаузе объясняется наличием в стратосфере озона, поглощающего значительную долю ультрафиолетового излучения Солнца и создающего теплый слой.

Над стратосферой, до высоты 90 км, располагается слой атмосферы, называемый *мезосферой*. В мезосфере наблюдается падение температуры с высотой — в среднем на $3,5^\circ$ на километр. В *мезопаузе* (от 80 до 95 км), являющейся переходным слоем от мезосферы к *термосфере*, температура достигает -88°C и ниже.

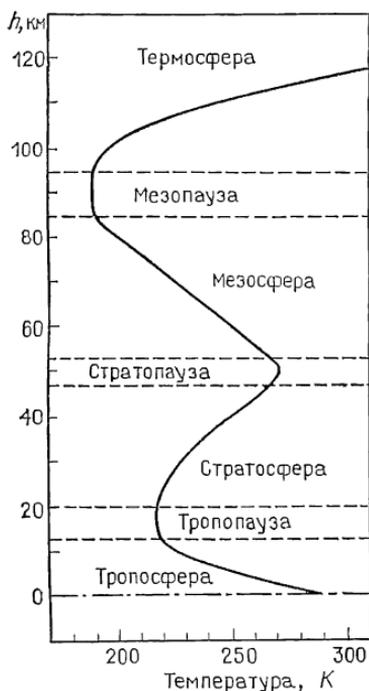


Рис. 15. Распределение температуры атмосферы в средних широтах в зависимости от высоты

В термосфере температура снова быстро растет с высотой из-за поглощения ультрафиолетового излучения Солнца молекулярным кислородом. Так, на высоте 150 км температура превышает $+360^{\circ}\text{C}$.

Начиная с высот 60 км и выше, под воздействием ультрафиолетового, рентгеновского и корпускулярного излучения Солнца газы частично находятся в ионизированном состоянии. Поэтому этот слой термосферы часто называют *ионосферой*. Она простирается до высот 800–900 км.

В отличие от температуры T , плотность ρ и давление p воздуха изменяются с высотой h плавно, по экспоненциальному закону:

$$\rho = \rho_0 e^{-h/H^*}, \quad p = p_0 e^{-h/H^*}, \quad (9)$$

где ρ_0 и p_0 — плотность и давление воздуха на уровне моря ($h=0$); H^* — так называемая высота однородной атмосферы. В изотермической атмосфере H^* определяет интервал высот, на котором плотность и давление воздуха изменяются в e раз, где $e=2,718$ — основание натуральных логарифмов.

Высота однородной атмосферы H^* зависит от температуры T , средней массы m_a молекул воздуха и ускорения силы тяжести g следующим образом:

$$H^* = \frac{kT}{m_0 g}, \quad (10)$$

где $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К — постоянная Больцмана. У поверхности Земли ($h=0$) средняя масса молекул воздуха равна $4,8 \cdot 10^{-23}$ г и $g_0=9,8$ м/с². При $T=273$ К получим $H^*=7,9$ км. Значение g на высоте h может быть вычислено по формуле

$$g = g_0 \left(\frac{R_0}{R_0 + h} \right),$$

где $R_0=6370$ км — средний радиус Земли. До высоты 120 км средняя масса молекул воздуха почти постоянна, а g меняется с высотой незначительно ($g=9,45$ м/с на высоте $h=120$ км). Поэтому можно считать, что значение H^* зависит только от температуры. Поскольку атмосфера Земли неизотермична, то H^* изменяется с высотой в соответствии с изменением температуры (табл. 5).

Атмосфера Земли состоит из смеси газов, среди которых азот занимает по объему 78,09%, кислород — 20,95%, аргон — 0,93% и неон — 0,03%. На долю остальных газов

Структура атмосферы по данным стандартной атмосферы (1976)

Высота над уровнем моря H , км	Средняя молекулярная масса воздуха μ_a	Температура T , К	Логарифм давления $\lg p$ (кг/м ²)	Логарифм плотности $\lg \rho$ (кг/м ³)	Высота однородной атмосферы H^* , км	Ускорение силы тяжести g , м/с ²
0	28,96	288	4,006	-0,912	8,43	9,81
5	28,96	256	3,733	-1,133	7,49	9,79
10	28,96	223	3,423	-1,383	6,55	9,78
15	28,96	217	3,083	-1,710	6,37	9,76
20	28,96	217	2,743	-2,051	6,38	9,74
25	28,96	222	2,406	-2,397	6,53	9,73
30	28,96	227	2,078	-2,735	6,69	9,71
35	28,96	237	1,759	-3,072	7,00	9,70
40	28,96	250	1,458	-3,398	7,42	9,68
45	28,96	264	1,173	-3,706	7,84	9,67
50	28,96	271	0,902	-3,988	8,04	9,65
55	28,96	261	0,622	-4,245	7,77	9,64
60	28,96	247	0,342	-4,509	7,37	9,62
65	28,96	233	0,039	-4,788	6,97	9,61
70	28,96	220	-0,282	-5,082	6,57	9,60
75	28,96	208	-0,622	-5,399	6,24	9,58
80	28,96	198	-0,978	-5,733	5,96	9,57
85	28,96	189	-1,351	-6,085	5,68	9,55
90	28,91	187	-1,736	-6,466	5,64	9,53
95	28,73	189	-2,119	-6,855	5,73	9,52
100	28,40	195	-2,495	-7,250	6,01	9,51
110	27,27	240	-3,148	-8,013	7,72	9,48
120	26,20	360	-3,595	-8,653	12,09	9,45
130	25,44	469	-3,903	-9,088	16,29	9,42

(гелий, криптон, ксенон, водород и озон) приходится тысячные — миллионные доли процента. Два из этих газов, а именно кислород и азот, участвуют в свечении метеоров.

Масса земной атмосферы составляет около $5,15 \cdot 10^{15}$ тонн. Около 90 % массы атмосферы заключено в слое до 16 км, а 10 % — в слое от 16 до 100 км. На слой выше 100 км приходится около одной миллионной доли массы атмосферы.

Минимум температуры (в среднем около -88°C) на высотах 80—90 км обуславливает целый ряд явлений. Так, например, на высотах 80—92 км наблюдается смена направлений воздушных течений. На высоте около 83 км во время астрономических сумерек, в основном летом, в средних широтах появляются светящиеся облака, кото-

рые называются серебристыми. Они состоят из кристалликов льда размерами менее 1 мкм. По внешнему виду серебристые облака похожи на обычные перистые облака. Согласно гипотезе В. А. Бронштэна кристаллики льда образуются вокруг микрометеороидов (масса которых равна 10^{-10} — 10^{-12} г, а радиус около 0,2 мкм). Приток микрометеороидов в атмосферу Земли вполне достаточен для образования серебристых облаков. Кроме микрометеороидов, ядрами конденсации могут быть и продукты дробления крупных метеорных тел. Обнаружено, что серебристые облака перемещаются с большими скоростями, средние значения которых составляют 65 м/с. Следовательно, как и метеорные следы, серебристые облака являются еще одним средством изучения воздушных течений в верхней атмосфере.

Высота около 80 км является нижней границей впечатляющего и красивого геофизического явления — полярных сияний. Полярные сияния возникают в магнитном поле Земли на высотах до 1000 км в результате взаимодействия солнечного ветра, состоящего из протонов, электронов и ионов различных элементов и нейтральных частиц, с верхней атмосферой. Полярные сияния наблюдаются преимущественно в полярных районах обоих полушарий Земли. Наиболее интенсивным в свечении полярных сияний является излучение атомарного кислорода. В спектре полярных сияний особенно выделяется зеленая линия кислорода $\lambda=5577 \text{ \AA}$.

Таковы вкратце основные данные о земной атмосфере — среде, где разрушаются метеорные тела и наблюдаются метеорные явления.

§ 2. ДВИЖЕНИЕ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ МЕТЕОРОВ

На высотах 60—120 км атмосфера в основном состоит из азота и кислорода, приблизительно в такой же пропорции, как в приземном слое. Плотность и давление воздуха в метеорной зоне в сотни миллионов раз меньше, чем на поверхности Земли. Когда метеорное тело с чудовищной скоростью вторгается в эту разреженную атмосферу, оно подвергается интенсивной бомбардировке молекулами и атомами воздуха, которые при упругих столкновениях отскакивают либо с силой втискиваются в кристаллическую решетку метеороида. Чем глубже в земную атмосферу проникает метеороид, тем значительнее становится

плотность воздуха, и метеорное тело во все более нарастающем темпе подвергается ожесточенной бомбардировке. Вследствие нарастающего сопротивления атмосферы метеорное тело тормозится, нагревается, крошится, плавится и испаряется.

Рассмотрим каждое из явлений, сопровождающих движение метеорного тела в атмосфере, более подробно, с точки зрения простейшей физической теории.

При движении метеорного тела в сопротивляющейся среде, каковой является земная атмосфера, его скорость и масса непрерывно убывают. Если пренебречь силой притяжения Земли (так как она значительно меньше силы сопротивления воздуха), то движение метеорного тела описывается уравнением

$$M \frac{dv}{dt} = - \Gamma S \rho v^2, \quad (11)$$

где M — масса метеорного тела в данный момент, v — его скорость, Γ — коэффициент лобового сопротивления (в большинстве случаев $0,5 \leq \Gamma \leq 1,0$), S — площадь поперечного сечения (мидель) метеорного тела, ρ — плотность воздуха, а $\frac{dv}{dt}$ — торможение метеороида.

Если вместо миделя S ввести коэффициент формы A метеорного тела, определяемый по соотношению

$$A = \frac{S}{V^{2/3}},$$

где V — объем, то, имея в виду, что масса равна произведению объема V на плотность δ тела, получим

$$S = A M^{2/3} \delta^{-2/3}, \quad (12)$$

и уравнение движения метеорного тела (11) можно записать в виде

$$\frac{dv}{dt} = - \Gamma A M^{-1/3} \delta^{-2/3} \rho v^2. \quad (13)$$

Для сферического тела радиусом r имеем $S = \pi r^2$, $V = \frac{4}{3} \pi r^3$ и $A = 1,21$. Для куба, в зависимости от его ориентации, $A = 1-1,7$ и т. д. Для вращающихся тел неправильной формы A близко к 1.

Убывание массы метеорного тела со временем выражается уравнением

$$\frac{dM}{dt} = - \frac{\Lambda}{2Q} S \rho v^3,$$

которое с учетом (12) можно записать в виде

$$\frac{dM}{dt} = - \frac{\Lambda A}{2Q} M^{2/3} \delta^{-2/3} \rho v^3, \quad (14)$$

где $\frac{1}{2} S \rho v^3$ есть кинетическая энергия набегающего на метеороид потока воздуха в единицу времени, Λ — доля этой энергии, затрачиваемая на удаление массы dM за время dt и называемая коэффициентом теплопередачи ($\Lambda \leq 1$, а в среднем $\Lambda = 0,5$), Q — удельная теплота испарения метеорного вещества, которая практически одинакова для каменных и железных метеорных тел и равна $Q = 8 \cdot 10^3$ Дж/г.

Предполагая, что интенсивность свечения метеора I (под которой понимают энергию излучения в интервале длин волн 4500—5700 Å) пропорциональна кинетической энергии испарившегося метеорного вещества, можно записать уравнение свечения метеора в следующем виде:

$$I = - \tau \frac{dM}{dt} \cdot \frac{v^2}{2}, \quad (15)$$

где τ — коэффициент свечения, выражающий долю кинетической энергии испарившихся атомов метеорного вещества, которая превращается в видимое свечение.

Учитывая (14), уравнение свечения можно представить в виде

$$I = \frac{\tau \Lambda A}{4Q} M^{2/3} \delta^{-2/3} \rho v^5. \quad (16)$$

Заметьте, что согласно формуле (16) интенсивность свечения метеора очень сильно зависит от скорости метеороида v .

Интенсивность свечения связана с абсолютной визуальной звездной величиной m метеора соотношением

$$\lg I = 9,72 - 0,4m. \quad (17)$$

Постоянная величина, входящая в это соотношение, получена с учетом спектральной чувствительности адаптированного к темноте глаза.

Значения коэффициента светимости τ заключены в интервале от $2 \cdot 10^{-2}$ до $3 \cdot 10^{-4}$. Для ярких метеоров ($m < 0^m$)

$$\tau = 5,25 \cdot 10^{-10} v, \quad (18)$$

если v выражено в см/с. Для слабых метеоров ($m \geq 0^m$)

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{2 \cdot 10^3}{v} && \text{для } v \geq 17 \cdot 10^5 \text{ см/с,} \\ \tau &= 6,8 \cdot 10^{-10} v && \text{при } 10^6 < v < 1,7 \cdot 10^6 \text{ см/с.} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Если считать, что число электронов, образующихся в единицу времени в результате взаимодействия испарившихся метеорных атомов с молекулами и атомами воздуха, пропорционально потере массы метеорным телом за то же время, то можно написать уравнение ионизации метеоров

$$\alpha = \frac{\beta}{\mu v} \frac{dM}{dt}, \quad (20)$$

где α — число электронов (или ионов), образованных на пути единичной длины, β — коэффициент ионизации, выражающий среднее количество свободных электронов, образуемых одним испарившимся метеорным атомом при столкновении с частицами воздуха, μ — средняя масса метеорного атома.

Подставляя в (20) значение $\frac{dM}{dt}$ из (14), находим зависимость α от параметров метеора и плотности атмосферы:

$$\alpha = \beta \frac{\Lambda A}{2Q\mu_m} \cdot M^{2/3} \delta^{-2/3} \rho v^2.$$

Коэффициент ионизации β сложным образом зависит от скорости метеора v . Согласно В. Н. Лебединцу зависимость β от v для метеоров со скоростью 20–73 км/с можно представить формулой

$$\beta = 4 \cdot 10^{-25} v^{3,5}.$$

Согласно данным Эпика для скоростей 20–80 км/с зависимость β от v хорошо представляется формулой

$$\beta = 8,4 \cdot 10^{-24} v^3,$$

где v измеряется в см/с.

§ 3. КРИВЫЕ СВЕЧЕНИЯ И ИОНИЗАЦИИ МЕТЕОРОВ

Приведенные в предыдущем параграфе основные уравнения простейшей физической теории метеоров позволяют получить ряд интересных соотношений. В этих уравнениях некоторые параметры метеора (скорость v , торможение dv/dt , интенсивность свечения I , линейная электронная

плотность α , высоты h и координаты радианта) определяются непосредственно из наблюдений. Плотность атмосферы ρ для соответствующей высоты можно взять из таблиц стандартной атмосферы. Тогда, пользуясь уравнением свечения (15), можно по наблюдаемой кривой блеска и скорости метеора вычислить массу метеорного тела. Пренебрегая изменением скорости метеора вдоль траектории, проинтегрируем уравнение (15) от некоторого момента t , когда масса метеороида равна M , до момента t_k исчезновения метеора, когда масса метеороида становится практически равной нулю:

$$M = \frac{2}{\tau v^2} \int_t^{t_k} I dt. \quad (21)$$

Если интегрирование в (21) производится от момента появления до момента исчезновения метеора, то определяемая масса называется внеатмосферной массой метеороида M_∞ .

Разделив уравнение убыли массы (14) на уравнение торможения (13), получим соотношение, связывающее изменение массы dM и скорости dv метеороида:

$$\frac{dM}{M} = \sigma v dv, \quad (22)$$

где $\sigma = \frac{\Lambda}{2\Gamma Q}$ — коэффициент абляции (уноса массы с поверхности метеороида).

Если иметь в виду, что при изменении скорости метеора от внеатмосферной v_∞ до наблюдаемой v в данный момент, масса метеороида изменится соответственно от M_∞ до M , то интегрирование (22) дает формулу, связывающую массу и скорость метеороида в любой точке траектории метеора:

$$M = M_\infty e^{-\frac{\sigma}{2}(v_\infty^2 - v^2)}. \quad (23)$$

Другое соотношение, вытекающее из основных уравнений простейшей физической теории метеоров, показывает, что масса метеорного тела M_{\max} в точке максимального свечения метеора уменьшается до $8/27$ своего первоначального значения, т. е.

$$M_{\max} = \frac{8}{27} M_\infty, \quad (24)$$

а его радиус до $2/3$.

Соотношения (23) и (24) позволяют определить уменьшение Δv_{\max} скорости метеора от внеатмосферной v_{∞} до v_{\max} в точке максимального блеска. Так, приравнявая правые части (24) и (23), при $v=v_{\max}$ имеем

$$8/27 M_{\infty} = M_{\infty} e^{-\frac{\sigma}{2}(v_{\infty}^2 - v_{\max}^2)};$$

так как $(v_{\infty}^2 - v_{\max}^2) = (v_{\infty} + v_{\max})(v_{\infty} - v_{\max}) \approx 2v_{\infty} \cdot \Delta v_{\max}$, то получим

$$\Delta v_{\max} = v_{\infty} - v_{\max} \approx 1,22/\sigma v_{\infty}.$$

Из последней формулы следует, что чем больше внеатмосферная скорость метеора, тем меньше изменение скорости до точки максимального блеска метеора.

По базисным фотографическим наблюдениям метеоров найдено, что значения коэффициента абляции $\sigma = 3 \cdot 10^{-12}$ $\text{с}^2/\text{см}^2$ для ярких метеоров и $\sigma = 5,8 \cdot 10^{-12}$ $\text{с}^2/\text{см}^2$ для слабых метеоров. Используя эти значения σ , из формулы (23) можно заметить, что при уменьшении массы метеорного тела, движущегося со скоростью $v_{\infty} = 40$ км/с, в 10 раз ($M_{\infty}/M = 10$) его скорость уменьшится всего на 5 %.

В предположении, что для не слишком толстых слоев атмосферы справедлива формула (9), можно получить уравнения «стандартных» кривых свечения и ионизации метеоров

$$\frac{I}{I_{\max}} = \frac{\alpha}{\alpha_{\max}} = 9/4 \frac{\rho}{\rho_{\max}} \left(1 - \frac{\rho}{3\rho_{\max}}\right)^2, \quad (25)$$

где I_{\max} и α_{\max} — максимальные интенсивность свечения и линейная электронная плотность метеора, определяемые по внеатмосферным массе M_{∞} , скорости v_{∞} и зенитному расстоянию радианта Z_R с помощью следующих формул:

$$I_{\max} = \frac{2\tau}{9H^*} M_{\infty} v_{\infty}^3 \cos Z_R, \quad (26)$$

$$\alpha_{\max} = \frac{4}{9} \frac{\beta}{\mu H^*} M_{\infty} v_{\infty}^3 \cos Z_R. \quad (27)$$

Плотность атмосферы на высоте максимального свечения метеора вычисляется по формуле

$$\rho_{\max} = \frac{2Q\delta^{2/3}}{\Lambda A H^*} M_{\infty}^{1/3} v_{\infty}^{-2} \cos Z_R. \quad (28)$$

Отметим, что плотность атмосферы на высоте исчезнове-

ния метеора $\rho_E = 3\rho_{\max}$. Воспользовавшись этими значениями ρ_{\max} и ρ_E из таблиц стандартной атмосферы, можно найти соответствующие теоретические высоты максимального блеска и исчезновения метеора.

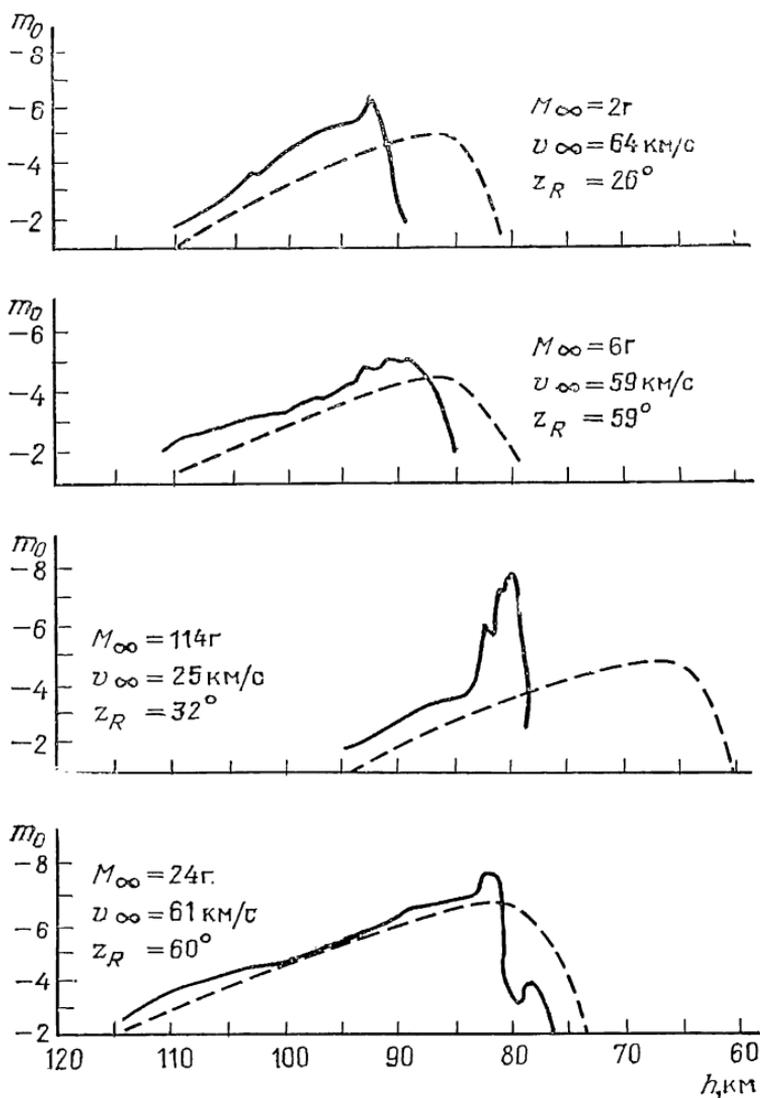


Рис. 16. Типичные кривые блеска метеоров

Для удобства сравнения теоретической кривой свечения с наблюдаемой в (25) необходимо заменить интенсивность свечения I абсолютной звездной величиной m .

С помощью соотношений (3) можно найти, что

$$\Delta m = m - m_{\max} = -2,5 \lg \frac{I}{I_{\max}}. \quad (29)$$

Воспользуясь барометрической формулой (9), имеем

$$\frac{\rho}{\rho_{\max}} = e^{\frac{h_{\max} - h}{H^*}}. \quad (30)$$

Подставляя (30) в (25), а затем (25) в (29), находим зависимость относительного блеска метеора от высоты, т. е. кривую блеска:

$$\Delta m = -1,086 \left[\frac{h_{\max} - h}{H^*} + 2 \ln \frac{3}{2} \left(1 - \frac{1}{3} e^{\frac{h_{\max} - h}{H^*}} \right) \right]. \quad (31)$$

На рис. 16 приведены типичные кривые блеска метеоров, полученные по фотографическим наблюдениям с помощью малых камер. Пунктирными линиями нанесены теоретические кривые блеска, вычисленные с помощью формул (26), (28), (31) и таблиц стандартной атмосферы (табл. 5). При этом было принято $H^* = 5,6$ км.

Для ярких метеоров изменение блеска вдоль траектории удовлетворительно описывается теоретической кривой (31). Для вспышечных метеоров кривая блеска близка к теоретической до момента вспышки.

§ 4. ЗАВИСИМОСТЬ МАКСИМАЛЬНОЙ АБСОЛЮТНОЙ ЗВЕЗДНОЙ ВЕЛИЧИНЫ МЕТЕОРА ОТ МАССЫ И СКОРОСТИ МЕТЕОРОИДА

Подставляя в (26) вместо I_{\max} ее выражение через m_{\max} , используя соотношение (17) и значение τ согласно (18) и (19), получим зависимости максимальной абсолютной звездной величины m_{\max} метеора от внеатмосферных массы M_{∞} и скорости v_{∞} метеороида и зенитного расстояния Z_R радианта метеора:

для ярких метеоров

$$m_{\max} = 63,50 - 10 \lg v_{\infty} - 2,5 \lg M_{\infty} - 2,5 \lg \cos Z_R, \quad (32)$$

для слабых метеоров

$$m_{\max} = 32,0 - 5 \lg v_{\infty} - 2,5 \lg M_{\infty} - 2,5 \lg \cos Z_R, \quad (33)$$

где v_{∞} выражено в см/с, M_{∞} — в г.

Однако из фотографических наблюдений 300 ярких метеоров была получена следующая эмпирическая зависимость:

$$m_{\max} = 49,7 - 8,0 \lg v_{\infty} - 2,0 \lg M_{\infty} - 1,5 \lg \cos Z_R. \quad (34)$$

Формула (34) показывает, что зависимость интенсивности свечения метеора от массы, скорости и зенитного расстояния радианта несколько слабее, чем предсказывается простейшей теорией.

Согласно (34) метеор пулевой звездной величины порождается телом с массой $\sim 0,04$ г, вертикально летящим со скоростью 40 км/с.

На рис. 17, а отложены редуцированные к скорости $v=40$ км/с и $\cos Z_R=0,63$ (зенитное расстояние около 50°)

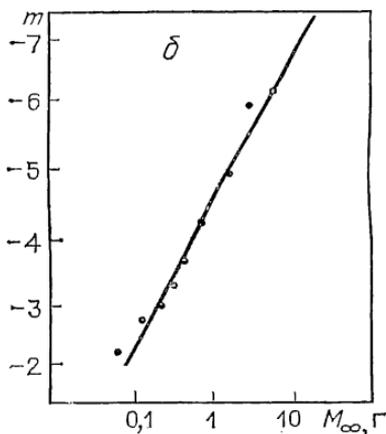
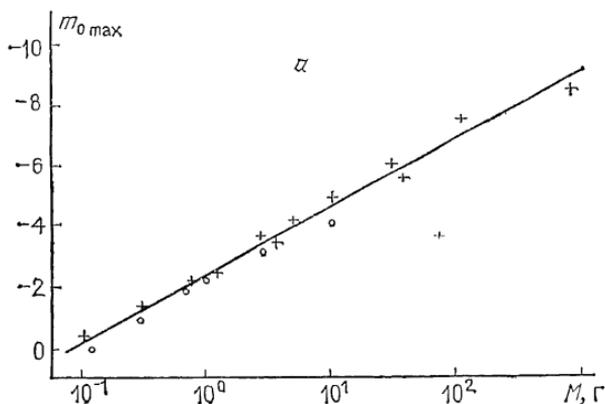


Рис. 17. Зависимость максимальной абсолютной величины метеоров от внеатмосферной массы метеороидов: а — спорадически метеоры, б — Персеиды

наблюденные максимальные абсолютные звездные величины метеоров в зависимости от масс метеороидов. Эту зависимость можно выразить вытекающим из (34)

соотношением

$$m_{\max} = -2,8 - 2 \lg M_{\infty}.$$

Зависимость максимальных абсолютных звездных величин метеоров, редуцированных к массе $M_{\infty} = 1$ г и $\cos Z_R = 0,63$, от скорости представлена на рис. 18.

Зависимость максимальной абсолютной звездной величины метеора от зенитного расстояния радианта относительно слабая.

Представляет интерес рассмотреть зависимость m_{\max} от M_{∞} и $\cos Z_R$ для отдельных метеорных потоков, так как

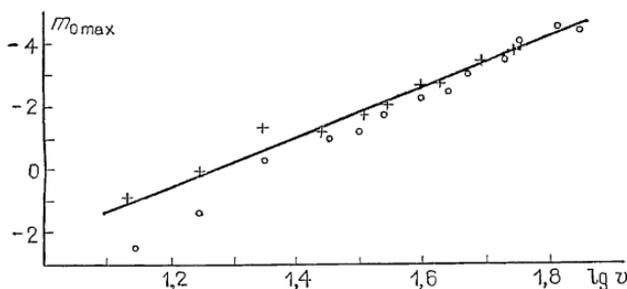


Рис. 18. Зависимость максимальной абсолютной звездной величины метеоров от скорости

все метеороиды одного потока имеют практически одинаковую скорость и, возможно, одинаковый химический состав и структуру.

По фотографическим наблюдениям 101 метеора потока Персеид была найдена эмпирическая зависимость максимальной абсолютной звездной величины от внеатмосферной массы метеороида и зенитного расстояния радианта метеора в виде

$$m_{\max} = 4,5 - 2,35 \lg M_{\infty} - 2,31 \lg \cos Z_R. \quad (35)$$

Эта зависимость близка к теоретической. Редуцированные к $Z_R = 0$ максимальные звездные величины метеоров потока Персеид в зависимости от внеатмосферных масс метеороидов представлены на рис. 17, б. Из (35) следует, что метеор потока Персеид нулевой звездной величины порождается вертикально летящим телом, имеющим массу всего лишь в 0,01 г, а метеороид массой в 1 г порождает болид $-4,5$ звездной величины.

Для других метеорных потоков накоплено еще недостаточно наблюдательного материала. Поэтому для наход-

дения массы метеороида, порождающего метеор данной максимальной абсолютной звездной величины, можно пользоваться теоретическими зависимостями (32) или (33).

§ 5. МИКРОМЕТЕОРОИДЫ

Оптическими и радиолокационными методами можно регистрировать метеоры до +13 — +14-й звездной величины, которые порождаются частицами массивнее 10^{-6} г. Отношение площади поверхности к массе растет с уменьшением размера частиц. Как показали Э. Эпик и Ф. Уиппл, частицы малых размеров, из-за большого значения отношения поверхность — масса, вторгаясь в земную атмосферу, излучают столько же энергии, сколько получают ее вследствие столкновений с атомами и молекулами воздуха. Поэтому они не достигают температуры плавления и тормозятся в атмосфере, не подвергаясь процессу абляции. Частицы с массами 10^{-13} — 10^{-10} г полностью теряют свою космическую скорость уже на высотах 130—140 км. Под действием гравитационного притяжения и аэродинамического торможения они постепенно оседают на поверхность Земли. Такие частицы называются микрометеороидами. Их максимальный размер зависит от внеатмосферной скорости:

$$r_{\max} = \frac{4,2 \cdot 10^{15}}{v_{\infty}^3},$$

где v_{∞} выражено в см/с.

Согласно данной формуле при минимальной скорости 11,2 км/с без потери массы на поверхность Земли выпадают частицы радиусом около 30 мкм и меньше (или массой менее $3 \cdot 10^{-10}$ г при плотности 3 г/см³).

Анализ собранных в верхней атмосфере микрометеороидов показывает, что по своим физическим свойствам и химическому составу они похожи на каменные метеориты — хондриты и углистые хондриты.

На основе исследований микрометеоритных кратеров на лунных породах было заключено, что средняя плотность микрометеороидов, имеющих массы от 10^{-12} до 10^{-13} г, заключена в пределах 2—4 г/см³, т. е. также близка к плотности каменных метеоритов.

МЕТЕОРНОЕ ВЕЩЕСТВО В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

§ 1. ЭЛЕМЕНТЫ ОРБИТ

Для того чтобы изучать свойства движения метеорных тел в межпланетном пространстве, рассмотрим сначала, какими параметрами они характеризуются.

В конце XVII в. Исаак Ньютон показал, что под действием всемирного тяготения небесные тела обращаются вокруг Солнца по коническим сечениям, в одном из фокусов которых находится Солнце. Конические сечения — это кривые, получающиеся при сечении поверхности кругового конуса плоскостью (рис. 19). Таких кривых четыре: окружность, эллипс, парабола и гипербола.

Если пересечь конус плоскостью, перпендикулярной его оси OO' , то получим окружность. Сечение конуса плоскостью, не параллельной ни одной образующей конуса, дает эллипс. Сечение плоскостью, параллельной одной образующей конуса (например, AB или BC и т. д.) дает параболу, а сечение плоскостью, параллельной двум образующим конуса — гиперболу. Траектория движения (орбита) и положение движущегося по ней небесного тела определяются шестью параметрами, называемыми *элементами орбиты*. Два из них определяют форму и размер орбиты, три элемента — ориентацию орбиты в пространстве; шестой элемент определяет положение тела на орбите.

Для небесных тел, обращающихся вокруг Солнца S , ближайшая к нему точка орбиты называется *перигелием* ($П$). В случае эллиптической орбиты наиболее удаленная от Солнца точка называется *афелием* (A) (рис. 20). Прямая, соединяющая точки $П$ и A , называется *линией апсид*.

Элементами, определяющими размер и форму орбиты, являются большая полуось a и эксцентриситет e . Для эллипса, изображенного на рис. 20, расстояние от центра эллипса O до точки $П$ (или A) называется *большой полуосью* и определяет размер орбиты. Расстояние $OB=OC=b$ называется *малой полуосью*.

Для эллипса *эксцентриситет* e характеризует меру отклонения от окружности и связан с расстоянием между фокусом S и центром O эллипса соотношением

$$e = \frac{OS}{a} = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}.$$

Для эллиптической орбиты $0 < e < 1$. В частном случае, когда оба фокуса эллипса совпадают, то $e=0$, и получается окружность. Движение Земли вокруг Солнца происходит почти по окружности: эксцентриситет ее орбиты равен $e_z \approx 0,017$. Парабола и гипербола являются незамкнутыми кривыми и движущиеся по ним тела могут удаляться от фокуса на бесконечно далекое расстояние. Для гиперболы $e > 1$ и $a < 0$, а для параболы $e=1$ и $a=\infty$.

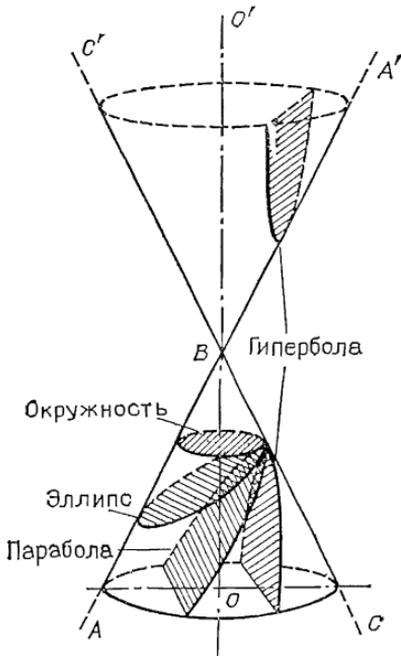


Рис. 19. Конические сечения

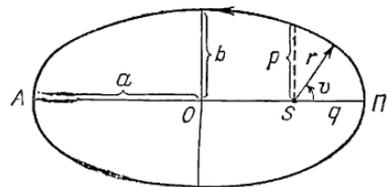


Рис. 20. Эллипс и полярная система координат

Любое коническое сечение может быть записано в виде уравнения

$$r = \frac{p}{1 + e \cos v},$$

где r — радиус-вектор (отрезок прямой, соединяющий Солнце с телом), v — угол между радиусом-вектором и направлением на перигелий, называемый *истинной аномалией*, p — *параметр* конического сечения (рис. 20). Для эллиптической и гиперболической орбит параметр связан с большой полуосью и эксцентриситетом соотношением $p = a(1 - e^2)$. Для параболы $p = 2q$, где расстояние q между

Солнцем и перигелием орбиты называется перигелийным расстоянием. Для эллипса и гиперболы $q=a(1-e)$.

Положение плоскости орбиты и ориентация орбиты в этой плоскости определяются тремя элементами: *долготой восходящего узла*, *наклоением* и *аргументом перигелия*. Ориентация орбиты метеорного тела в межпланетном пространстве определяется относительно плоскости орбиты

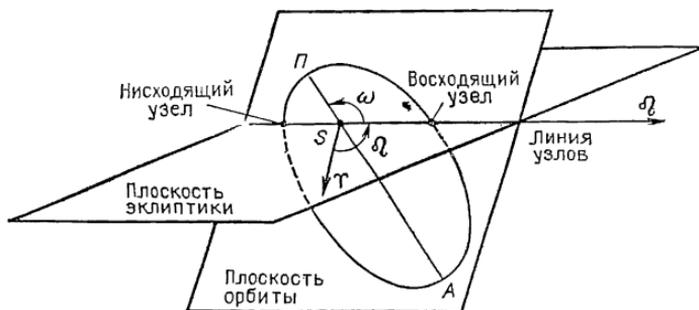


Рис. 21. Элементы орбиты

Земли, называемой плоскостью эклиптики, и относительно направления на точку весеннего равноденствия*) Υ (рис. 21).

Орбита метеорного тела пересекает плоскость эклиптики в двух точках, называемых *узлами*. Точка, в которой метеороид переходит из южной полусферы в северную, называется *восходящим узлом* орбиты, а точка, в которой метеороид переходит из северной в южную, — *нисходящим узлом* орбиты. Прямая, проходящая через узлы орбиты, называется *линией узлов*. Долгота восходящего узла Ω представляет собой угол с вершиной в Солнце, образованный направлением на восходящий узел (обозначаемый также знаком Ω) и на точку весеннего равноденствия. Долгота восходящего узла может иметь любые значения от 0 до 360° .

Наклоение i — угол между плоскостью орбиты и плоскостью эклиптики; он может иметь любые значения от 0 до 180° . Если $0^\circ \leq i \leq 90^\circ$, то тело движется вокруг Солнца S в том же направлении, что и Земля, и его движение назы-

*) Точка весеннего равноденствия в настоящее время расположена в созвездии Рыб; 20 или 21 марта центр диска Солнца проецируется на эту точку.

вается *прямым*. При $90^\circ \leq i \leq 180^\circ$ тело движется в противоположном направлении, и его движение называют *обратным*.

Следующим элементом является угловое расстояние перигелия от узла орбиты, или *аргумент перигелия* ω . Он определяет положение орбиты в ее плоскости и представляет собой угол, образованный направлениями на восходящий узел Ω и на перигелий P , с вершиной в Солнце. Аргумент перигелия отсчитывается в плоскости орбиты в направлении движения тела и может иметь любые значения от 0 до 360° . Иногда вместо аргумента перигелия берут долготу перигелия $\pi = \Omega + \omega$.

Шестым элементом орбиты является момент прохождения тела через перигелий. Обычно он вычисляется для планет и комет. Для метеорных тел (или метеорных потоков) этот элемент интереса не представляет и поэтому в каталогах метеорных орбит не указывается.

Элементы орбит метеороидов могут быть вычислены, если из наблюдений определены момент пролета и координаты радианта метеора, измерена его скорость и известны координаты пунктов наблюдений.

§ 2. МЕТЕОРНЫЕ ПОТОКИ

Наблюдаемые метеоры условились делить на два класса: 1) *поточные*, которые появляются в одно и то же время года из определенной точки или небольшого участка звездного неба — *радианта* и имеют почти одинаковые скорости; 2) *спорадические*, или случайные, которые могут наблюдаться каждую ночь и движутся из самых разнообразных направлений с различными скоростями.

Метеорные тела, порождающие спорадические метеоры, движутся в межпланетном пространстве вокруг Солнца по самым разнообразным орбитам, а метеорные тела, принадлежащие потоку, — по почти одинаковым орбитам.

Среднее число метеоров, наблюдаемых невооруженным глазом в течение часа, обычно заключено в пределах от 6 до 16. В периоды активности метеорных потоков, которые длятся от нескольких часов до нескольких суток, число метеоров достигает 50—100 в час.

По распределению метеороидов вдоль орбиты метеорные рои можно разделить на две группы. В первой из них метеороиды распределены вдоль всей орбиты более или менее равномерно, образуя замкнутые эллиптические «кольца». Если орбита Земли пересекается с таким «кольцом»,

то ежегодно, почти в одни и те же даты, из определенного радианта наблюдается метеорный поток более или менее одинаковой интенсивности. К таким метеорным потокам относятся Персеиды, Геминиды, Квадрантиды и др.

Ко второй группе относятся метеорные рои, в которых основная масса метеороидов сосредоточена на коротком участке орбиты. Земля встречается с таким участком уже не ежегодно, а через определенное число лет, но зато каждая встреча сопровождается чрезвычайно интенсивным метеорным потоком — 1000 и более метеоров в час. Такие интенсивные потоки называют метеорными дождями. Хорошо известны метеорные дожди Леонид в 1833, 1866, 1966 гг., Андромедид в 1872 и 1885 гг., Драконид в 1933 и 1946 гг. Они сыграли огромную роль в становлении и развитии астрономии (см. с. 14—16).

Метеорному потоку обычно дают название по созвездию, в котором находится его радиант. Так, например, метеоры, наблюдаемые в августе с радиантом в созвездии Персея, называются Персеидами, в октябре с радиантом в созвездии Ориона — Орионидами. Названия некоторых других потоков образованы от латинских названий созвездий, не совпадающих с русскими: Геминиды (с радиантом в созвездии Близнецов: по-латыни «гемини» — близнецы), Аквариды (в созвездии Водолея — «Аквариус»), Каприкорниды («Каприкорнус» — Козерог), Тауриды («Таурус» — Телец, т. е. бык), Цигниды («Цигнус» — Лебедь), Урсиды («Урса Минор» — Малая Медведица), Ариетиды («Ариес» — Овен, т. е. баран), Писциды («Писцес» — Рыбы). В приложениях мы встретим множество других аналогичных названий метеорных потоков, поэтому наблюдателю метеоров необходимо знать латинские названия созвездий. В некоторых случаях поток называется по имени кометы, с которой он связан. Например, Андромедиды называются также Биэлидами, Дракониды — Джакобинидами (по названию кометы Джакобини — Циннера).

Если в данном созвездии находятся несколько радиантов, то к названию потока добавляется буква греческого алфавита, соответствующая ближайшей к радианту яркой звезде этого созвездия.

Около 20 метеорных потоков, отнесенных к числу главных, отличаются от остальных относительно высокой численностью ярких метеоров. В табл. 6 приведены некоторые сведения о главных метеорных потоках.

На основе радиолокационных наблюдений было открыто большое количество дневных метеорных потоков. В табл. 6

Главные метеорные потоки

Потоки	Дата максимумы активности	Долгота и широта ☉	Период активности	Координаты радианта		Наблюдае- мый рост, км/с	Визуальные числа в максимуме	Суточное смещение радианта	
				αR	δR			$\Delta\alpha$	$\Delta\delta$
Квадрантиды	январь 3	282,7°	1—4 января	231°	+50°	41	50	—	—
Лириды	апрель 22	31,4	19—24 апреля	272	+32	48	5	+1,1°	0,0°
Эта-Аквариды	май 5	42,4	1—8 мая	336	00	65,5	20	+0,9	+0,4
Ариетиды (Д)	июнь 7	76	29 мая — 19 июля	43	+23	39	60	+0,7	+0,6
Дзета-Персеиды (Д)	июнь 7	76	1—17 июля	62	+24	29	40	+1,1	+0,4
Бета-Тауриды (Д)	июнь 29	96	24 июня — 6 июля	86	+19	30	20	+0,8	+0,4
Южные Дельта-Аквариды	июль 27	124	21 июня — 15 августа	330	-17	41	20	+0,8	+0,2
Сев. Дельта-Аквариды	июль 27	124	15 июля — 18 августа	339	00	41	10	+1,0	+0,2
Альфа-Каприкорниды	август 2	129	15 июля — 20 августа	309	-10	23	5	+0,9	+0,3
Южн. Иота-Аквариды	август 6	133	15 июля — 25 августа	338	-15	35	(10)	+1,1	+0,2
Сев. Иота-Аквариды	август 6	133	15 июля — 25 августа	331	-6	30	(10)	+1,0	+0,1
Персеиды	август 13	139	25 июля — 17 августа	46	+58	60	50	+1,3	+0,1
Каппа-Цитниды	август 20	147	18—20 августа	290	+55	26	(5)	0,0	0,0
Ориониды	октябрь 21	207	18—26 октября	95	+15	66	20	+1,2	+0,1
Южные Тауриды	ноябрь 3	220	15 сентября — 26 ноября	52	+14	29	(5)	+0,8	+0,2
Северные Тауриды	ноябрь 13	230	19 сентября — 1 декабря	54	+21	30	5	+0,8	+0,1
Леониды	ноябрь 18	235	14—20 ноября	152	+22	72	(5)	+0,7	+0,4
Геминиды	декабрь 14	262	7—15 декабря	113	+32	35	50	+1,0	+0,1
Урсиды	декабрь 22	271	17—24 декабря	217	+76	33	15	—	—

приведены сведения о трех наиболее активных из них. Они обозначены дополнительно к названию буквой Д.

В табл. 6 после названия потока, во втором и третьем столбцах, указаны дата максимума активности и соответствующая ей долгота Солнца. В следующем столбце приводится период времени, в течение которого часовые числа метеоров составляют не менее четверти часовых чисел во время максимума активности. В пятом столбце приведены координаты радианта (прямое восхождение α_R и склонение δ_R) потока во время максимума его активности. В шестом столбце приведена наблюдаемая скорость метеоров потока.

В седьмом столбце даны максимальные часовые числа метеоров потока, наблюдаемые визуально одним наблюдателем при зенитном расстоянии радианта $Z_R=45^\circ$. Из-за неравномерного распределения метеорных тел вдоль орбиты потока и так как Земля в разные годы пересекает различные участки роя, часовые числа метеоров потока, наблюдаемые в разные годы, будут различны.

По мере продвижения Земли через метеорный поток положение радианта на небе несколько смещается по направлению на восток, приблизительно на 1° в сутки по прямому восхождению α_R и несколько меньше по склонению δ_R . Суточные смещения радиантов даны в восьмом столбце таблицы по данным А. Кука.

Элементы орбит главных метеорных потоков приведены в табл. 7. Приведем наиболее интересные сведения о некоторых из этих потоков.

Квадрантиды. Метеорный поток Квадрантид был открыт в 1830 г. бельгийским астрономом А. Кетеле. Регулярные наблюдения потока, в основном визуальными методами, проводятся с 1860 г., а начиная с 1946 г. — и с помощью радиолокационных методов.

Радиант Квадрантид расположен недалеко от полюса мира, между созвездиями Дракона и Волопаса. Находящаяся здесь группа звезд восточнее ручки Большой Медведицы объединялась раньше в созвездие Стенного Квадранта, именем которого и был назван поток.

Особенностью Квадрантид является короткий период активности и большие часовые числа метеоров, которые в отдельные годы достигали 180—190 по визуальным наблюдениям.

Квадрантиды действуют ежегодно с 1 по 4 января. Эффективная продолжительность активности потока, т. е. период времени, когда часовые числа метеоров составляют не

Элементы орбит главных метеорных потоков

Поток	α , а. е.	e	q , а. е.	ω	Ω	i	π
Квадрантиды	3,08	0,683	0,977	170,0°	282,7°	72,5°	92,8°
Лириды	28	0,968	0,919	214,3	31,7	79,0	246,0
Эта-Аквариды	13	0,958	0,560	95,2	42,4	163,5	137,6
Ариетиды (Д)	1,7	0,94	0,09	30	77	19	107
Дзета-Персеиды (Д)	1,6	0,79	0,34	59	78	0	137
Бэта-Тауриды (Д)	2,2	0,85	0,34	246	276,4	6	162
Южн. Дельта-Аквариды	2,86	0,916	0,069	152,8	305,0	27,2	97,8
Сев. Дельта-Аквариды	2,62	0,97	0,07	332	139	200	111
Альфа-Каприкорниды	2,53	0,77	0,59	269	127	7	36
Южн. Иота-Аквариды	2,36	0,912	0,208	131,8	311,0	6,9	82,8
Сев. Иота-Аквариды	1,75	0,84	0,26	308	147	5	95
Персеиды	28	0,965	0,953	151,5	139,0	113,8	290,5
Каппа-Цигниды	3,09	0,68	0,99	194	145	38	339
Ориониды	15,1	0,962	0,571	82,5	28,0	163,9	110,5
Южные Тауриды	1,93	0,806	0,375	113,2	40,0	5,2	153,2
Северные Тауриды	2,59	0,861	0,359	292,3	230,0	2,4	162,3
Леониды	11,5	0,915	0,985	172,5	234,5	162,6	47,0
Геминиды	1,36	0,896	0,142	324,3	261,0	23,6	225,3
Урсиды	5,70	0,85	0,939	205,8	270,7	53,6	116,5

менее 1/2 от численности в максимуме активности, по данным радиолокационных наблюдений равна 12—16 часам. По данным фотографических наблюдений Земля пронизывает наиболее плотную часть роя Квадрантид всего лишь за 7—8 часов. Поэтому благоприятные условия его наблюдений приходится в один год на восточное полушарие Земли, а в другой — на западное.

По радиолокационным и визуальным наблюдениям было обнаружено, что момент максимума численности более слабых метеоров наступает раньше, чем более ярких. Это означает, что при пересечении роя Квадрантид Земля сначала встречает более мелкие частицы, а затем крупные.

Орбита Квадрантид является короткопериодической и имеет большой наклон к плоскости эклиптики ($i=72^\circ$).

Большие планеты, главным образом Юпитер, своим притяжением обуславливают значительные периодические изменения формы и наклона орбит частиц роя: i — от $10,8^\circ$ до $73,8^\circ$ и перигелийное расстояние q от $0,076$ а. е. до $1,156$ а. е. с периодом $3,5$ тысячи лет. Может быть, поэтому у Квадрантид неизвестна комета-родоначальница, которая, сильно приблизившись к Солнцу, могла полностью распастись. Среди известных главных метеорных потоков только δ -Аквариды, наблюдаемые в конце июля, имеют перигелийное расстояние $0,08$ а. е.

Подробное исследование эволюции орбит потока Квадрантид и условий его образования показывает, что рой имеет сложную пространственную форму и пересечение его Землей, возможно, порождает и другие метеорные потоки, одним из которых являются δ -Аквариды, а другим — Дневные Ариетиды.

Ежегодно метеорные тела роя Квадрантид крупнейе 10^{-3} г приносят на Землю около 500 кг вещества.

Лириды являются одним из метеорных потоков, давших в прошлом замечательные метеорные дожди.

Радант потока был открыт в прошлом веке. В 1835 — 1838 гг. Бенценберг в Германии и Херрик в США установили, что регулярно, 21 апреля, наблюдается метеорный поток с радиантом в созвездии Лиры. Поток характеризуется небольшим часовым числом метеоров, составляющим, даже в максимуме активности, всего 10 — 12 метеоров в час.

По разным летописям Лириды прослеживаются более чем на 2600 лет назад. В прошлом Лириды были очень интенсивными. По китайским наблюдениям 15 г. до н. э. о Лиридах говорится, что «после полуночи звезды падали, как дождь, они погасали, не достигая Земли». Одно из явлений метеорного дождя Лирид было отмечено в 1803 г. в США. Газеты сообщали, что «от обилия ярких метеоров все небо казалось в огне». 21 апреля 1922 г. метеорный дождь Лирид наблюдался на Украине. Продолжительность его была очень короткой — менее часа, а часовые числа метеоров превышали 2000 .

Метеорный поток Лирид связан с кометой 1861 I, элементы орбиты которой приведены в таблице 8. Метеорные дожди в отдельные годы и обычно малое часовое число Лирид в другие свидетельствуют о неоднородном распределении метеороидов вдоль орбиты роя.

Наименьшее расстояние между орбитами кометы и Земли составляет $0,002$ а. е. = $300\,000$ км. Метеоры потока Лирид быстрые и желтоватые по цвету. После пролета метео-

Орбиты метеорных потоков и комет-родоначальниц

Метеорные потоки и кометы	a , а. е.	e	q , а. е.	ω	Ω	i	π
Лириды	28	0,968	0,919	214,3°	31,7°	79,0°	246,0°
Комета 1861 I	55,7	0,983	0,921	213,4	31,2	79,8	244,6
η -Аквариды	13	0,958	0,560	95,2	42,4	163,5	137,6
Ориониды	15,1	0,962	0,571	82,5	28,0	163,9	110,5
Комета Галлея	18,0	0,967	0,587	110,7	56,8	162,3	167,5
Дневные β -Тауриды	2,2	0,85	0,34	246	276,4	6	162
Южные Тауриды	1,93	0,806	0,375	113,2	40,0	5,2	153,2
Северные Тауриды	2,59	0,861	0,359	292,3	230,0	2,4	162,3
Комета Энке	2,217	0,847	0,339	185,9	334,2	12,0	160,1
Боотиды	3,27	0,69	1,02	180	98	18	278
Комета Понса — Виннеке 1945 III	3,261	0,702	0,971	172,4	99,8	18,3	272,3
Персеиды	28	0,965	0,953	151,5	139,0	113,8	290,5
Комета 1862 III	24,3	0,960	0,963	152,8	138,7	113,6	291,5
Дневные Секстан- тиды	1,25	0,87	0,16	213	3,6	22	217
Геминиды	1,37	0,897	0,141	324,3	260,3	23,3	224,6
Астероид 3200 (1983 ТВ)	1,32	0,898	0,135	323,6	262,3	22,7	226,3
Андромедида	3,53	0,76	0,86	222	247	13	109
Комета Бяэлы	3,52	0,756	0,861	223,2	247,3	12,6	110,4
Дракониды	3,51	0,717	0,996	171,8	196,3	30,7	8,1
Комета Джакобини — Циннера	3,51	0,717	0,996	171,8	196,3	30,7	8,1
Лео-Минориды	58,6	0,99	0,65	106	211	124	317
Комета 1739		1,00	0,674	104,8	210,3	124,3	315,1
Фенициды	2,96	0,68	0,98	0	73	16	74
	2,96	0,67	0,99	359	74	13	72
Комета 1819 IV	2,96	0,699	0,892	350,2	79,2	9,1	69,4
Леониды	11,5	0,915	0,985	172,5	234,5	162,6	47,2
Комета Темпеля — Туттля	10,27	0,904	0,982	172,6	232,4	162,7	45,7
Урсиды	5,70	0,85	0,939	205,85	270,6	53,6	116,5
Комета Туттля 1939 X	5,70	0,821	1,023	207,0	269,8	54,6	116,8

ров часто остаются следы. До настоящего времени получено всего лишь 5—6 фотографий и несколько спектров Лирид. Период активности потока приходится на 19—24 апреля, но, возможно, Лириды действуют с 7 по 26 апреля. Поэтому для проверки продолжительности периода активности потока и изучения структуры роя весьма желательными являются визуальные наблюдения радиантов

и численности метеоров потока. Смещение радианта Лирид среди звезд приведено на рис. 22.

η -Аквариды относятся к числу немногочисленных потоков, наблюдаемых с древнейших времен. Подробное изучение древних записей наблюдений, сделанных в Корее, Китае и Японии, свидетельствуют о том, что η -Аквариды наблюдаются с 401 года.

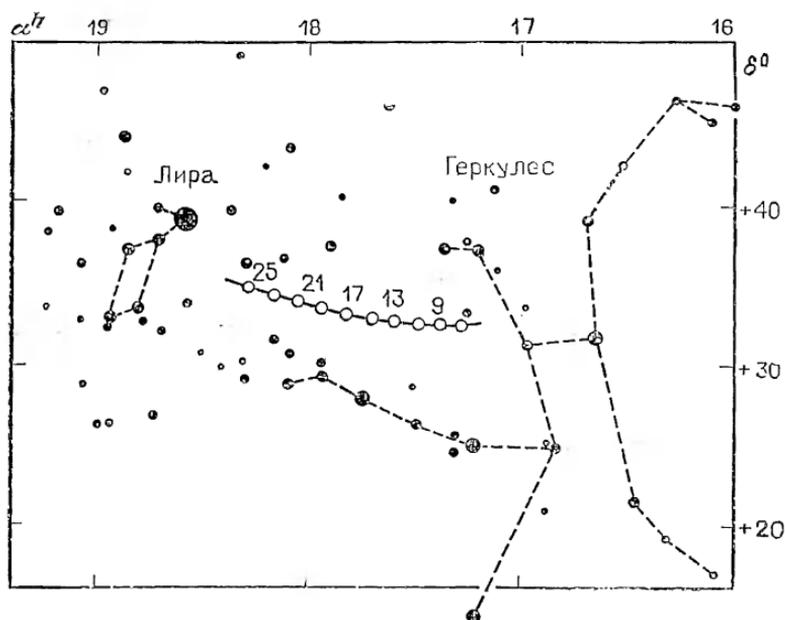


Рис. 22. Смещение радианта метеорного потока Лирид на фоне звезд. Числа указывают дни апреля. (По данным А. Н. Симоненко).

Радиант потока находится в созвездии Водолея и был открыт в 1848 г. Метеоры потока очень яркие и быстрые, после них часто остаются плотные и длинные следы.

Метеорный поток η -Акварид действует ежегодно в течение двух недель, с 27 апреля по 11 мая. Относительно плотную часть роя Земля пересекает 3—8 мая. Радиант потока в Северном полушарии восходит перед утром и кульминирует в светлое время суток. Поэтому визуальные и оптические наблюдения потока весьма затруднены. В Южном полушарии η -Аквариды являются одними из самых интенсивных.

В 1910 г. было замечено увеличение часовых чисел метеоров η -Акварид, что, возможно, было связано с прохож-

дением через перигелий в том же году кометы Галлея — родоначальницы потока. 5 мая Земля проходит на минимальном расстоянии от орбиты кометы, равном 0,064 а. е., когда и наблюдается максимум активности η -Акварид. Эфемерида радианта потока приведена на рис. 23.

Вблизи орбиты кометы Земля проходит вторично в октябре месяце, и мы наблюдаем метеорный поток Орионид. δ -Аквариды. Максимум активности потока δ -Акварид приходится на конец июля. Этот метеорный поток имеет

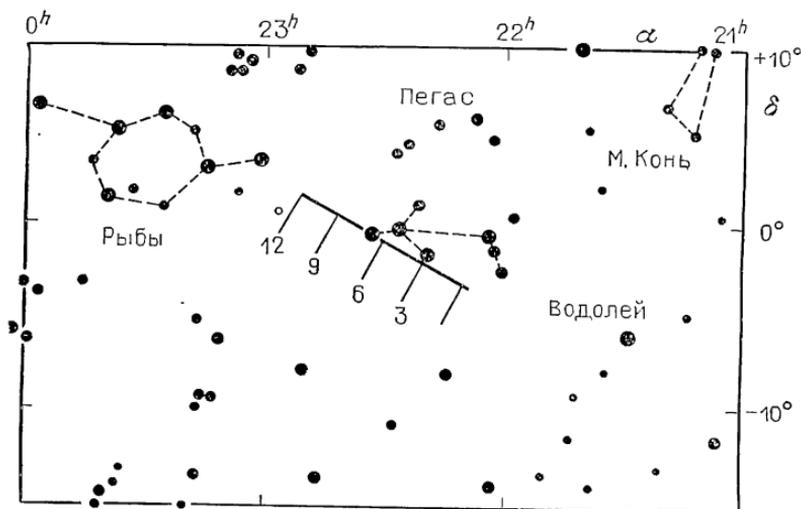


Рис. 23. Смещение радианта метеорного потока η -Акварид на фоне звезд. Числа указывают дни мая. (По данным А. Н. Симоненко)

две ветви. Так как радиант главной, южной ветви потока имеет отрицательное склонение ($\delta_r = -17^\circ$), условия наблюдений потока более благоприятны на юге нашей страны.

По радиолокационным наблюдениям в 1952 г. было обнаружено два максимума численности метеоров, один из которых (28 июля) совпадает с данными визуальных наблюдений, а второй приходится на долю слабых метеоров и наблюдается раньше. Это разделение частиц роя по размерам, объясненное Б. Линдбладом влиянием эффекта Пойнтинга — Робертсона, подтвердилось позднейшими радиолокационными наблюдениями. В табл. 9 приведены средние значения координат радианта, внеатмосферной скорости и элементов орбит Южных δ -Акварид по фото-

Сравнение орбит фотографических и радиолокационных метеоров потока Южных δ -Акварид

Метеоры	α_R	δ_R	v_g	$a, \text{ а. е.}$	e	$q, \text{ а. е.}$	Ω	ω	i
Яркие фотографические	343,4°	-15,5°	41,5	2,8	0,96	0,09	312,2°	147,2°	25,0°
Слабые фотографические	341,6	-14,9	42,4	2,8	0,97	0,08	309,2	151,1	25,0
Радиолокационные	341,2	-16,4	41,2	2,8	0,96	0,08	306,7	151,2	28,4

графическим наблюдениям ярких и слабых метеоров и радиолокационным наблюдениям в Харькове.

Из таблицы 9 видно, что в рое δ -Акварид более мелкие тела, порождающие радиометеоры 5—7^m, имеют меньшие размеры орбит и встречаются с Землей на несколько суток раньше, чем более крупные частицы.

Уникальной особенностью орбиты δ -Акварид является очень малое перигелийное расстояние, составляющее около 0,08 а. е. При приближении метеорного тела к Солнцу на такое расстояние его температура может превышать 1000 К, что больше температуры плавления и даже кипения некоторых элементов, содержащихся в метеорных телах (калий, кальций, литий, магний, натрий и др.). Это обстоятельство должно каким-то образом отражаться на структуре и физических свойствах метеорных тел, составляющих рой δ -Акварид.

Период активности северной ветви потока приходится на 15 июля—18 августа с максимумом 28 июля. Северные δ -Аквариды менее изучены. Все эти особенности делают дальнейшие наблюдения и исследования метеорного потока δ -Акварид интересными и увлекательными.

Персеиды наблюдаются более 1200 лет. Радиант Персеид расположен вблизи интересной переменной звезды Алголь в созвездии Персея. Персеиды являются одним из самых замечательных регулярно наблюдаемых потоков и богаты яркими метеорами. В период 10—13 августа Персеиды составляют около 70% всех метеоров, наблюдаемых на небе невооруженным глазом. Поток наблюдается с 25 июля по 17 августа. Следовательно, ширина роя (в месте встречи с Землей) составляет около 50 млн км.

Численность метеоров Персеид в начале и конце периода активности потока равна 1—2 в час.

Персеиды связаны с кометой 1862 III (Свифта — Туттля), имеющей период обращения 120 лет (рис. 24). В 1980—1984 гг. с интересом ожидалось возвращение кометы 1862 III к перигелию, но поиски были тщетными. Комета в ожидаемый период не была обнаружена и теперь отнесена к числу потерянных. Может быть, ее яркость значительно ослабела. Но в 1980 г. наблюдалось значительное увеличение численности метеоров потока.

На рис. 25 представлена кривая активности Персеид по многолетним радиолокационным наблюдениям за 1956—1978 гг. Форма кривой активности находится в хорошем согласии с данными визуальных наблюдений.

Часовые числа метеоров потока Персеид из года в год являются стабильными. Тем не менее примерно через каждые 12 лет наблюдаются случаи повышенной активности Персеид, характеризующиеся большими часовыми числами метеоров, что, по-видимому связано с возмущениями центральной плотной части роя Юпитером.

Смещение радианта потока, обусловленное движением Земли вокруг Солнца, показано на рис. 26.

Ориониды являются одним из красивых ежегодных метеорных потоков, связанных, как и поток η -Акварид, с кометой Галлея. В случае Орионид Земли пересекает более далекую от орбиты кометы и более разреженную часть роя, чем в случае η -Акварид. Метеоры потока Орионид яркие, белые и часто оставляют стойкие следы. Максимум активности потока наблюдается при долготе Солнца $\lambda_{\odot} = 28^{\circ}$, когда Земля оказывается на расстоянии 28 млн км от кометной орбиты (рис. 27).

Тауриды. В период с 15 сентября до 1 декабря из двух радиантов в созвездии Тельца наблюдаются метеоры потока Таурид. На основе точных фотографических наблюдений Ф. Уиппля доказал, что метеорный рой Таурид имеет короткопериодическую орбиту небольших размеров и связан с кометой Энке. Перигелий роя находится внутри орбиты Венеры, а афелий вблизи Юпитера. Вторично Земля пересекает рой Таурид летом, в конце июня — начале июля, и порождаемые этим роем метеоры дают дневной поток (β -Тауриды) с радиантом, расположенным близко к Солнцу. Лишь яркие болиды, порождаемые крупными метеороидами роя, могут наблюдаться днем.

На рис. 28 показано смещение радиантов Северных и Южных Таурид на фоне звезд.

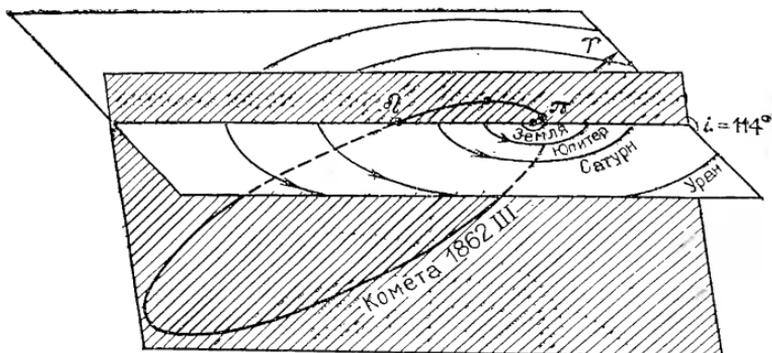


Рис. 24. Положение орбиты кометы 1862 III, родоначальницы метеорного потока Персеид, в межпланетном пространстве

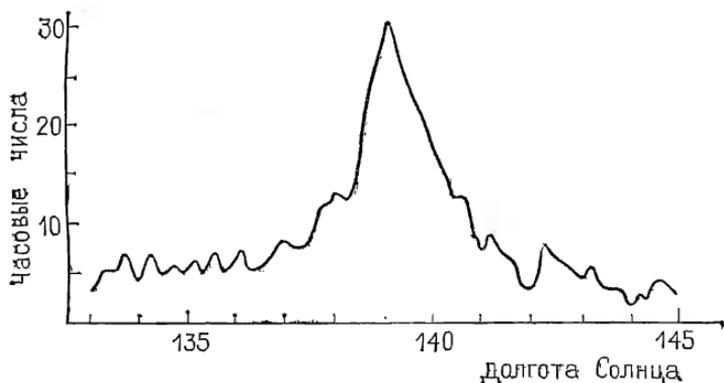


Рис. 25. Кривая активности метеорного потока Персеид по многолетним радионаблюдениям согласно Б. А. Линдбладу и М. Шимеку

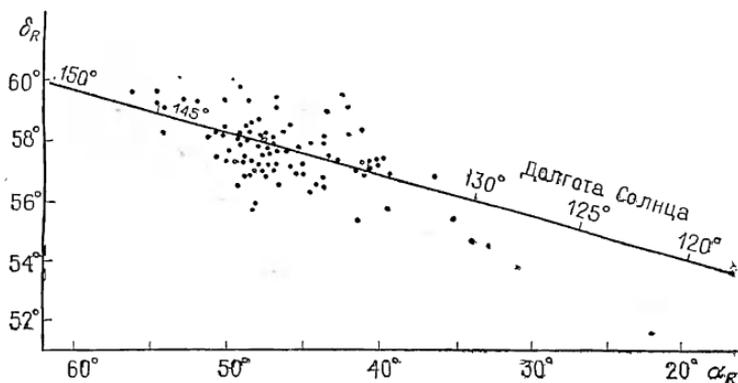


Рис. 26. Эфмериды радианта метеорного потока Персеид

Так как рой имеет некоторую толщину и его ширина около орбиты Земли составляет почти 0,2 а. е., а наклонение орбиты роя к плоскости эклиптики невелико, то вполне возможно, что рой Таурид пересекается также с орбитами Марса, Венеры и Меркурия, причем как до, так и после перигелия.



Рис. 27. Орбита кометы Галлея и метеорных потоков η-Акварид и Орионид

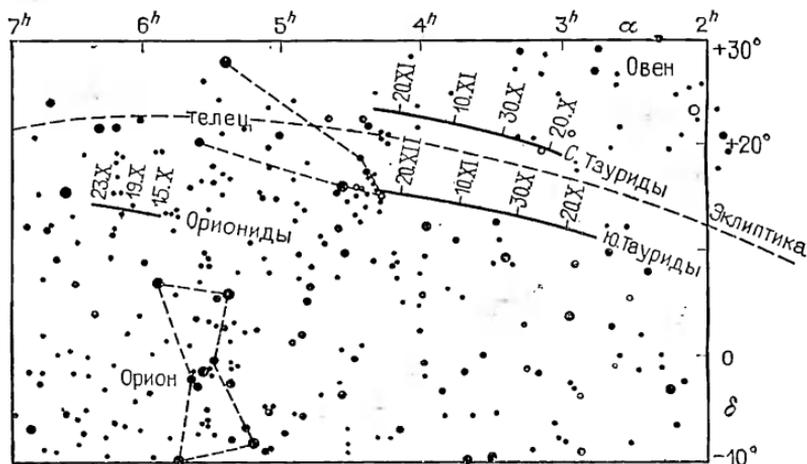


Рис. 28. Смещение радиантов метеорных потоков Северных и Южных Таурид на фоне звезд. (По данным А. Н. Симоненко)

Геминиды являются одним из наиболее богатых яркими метеорами ежегодных потоков с радиантом в созвездии Близнецов. Поток впервые наблюдался в 1862 г.

одновременно в Англии и США и с конца XIX в. постоянно находится в центре внимания исследователей.

Орбита роя имеет небольшие размеры (табл. 7). По многочисленным фотографическим и радиолокационным наблюдениям был выявлен ряд интересных особенностей этого уникального метеорного роя. Одной из них является зависимость элементов орбиты частиц от долготы Солнца λ_0 , а другой — уменьшение большой полуоси орбиты с уменьшением масс частиц.

Детальное исследование процессов образования и эволюции метеорного роя Геминид показывает, что под воздействием планетных возмущений частицы, выброшенные с различными скоростями из родительской кометы, со временем занимают объем пространства, форма которого схематически изображена на рис. 29. Эта форма показывает, что в районе орбиты Земли толщина роя значительна и составляет почти 1 а.е., в то время как ширина роя

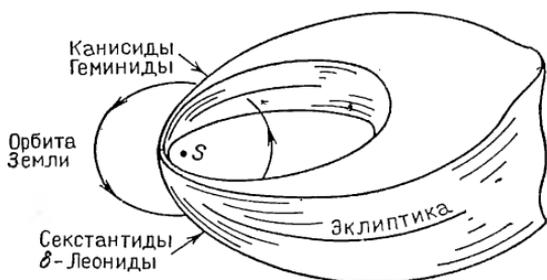


Рис. 29. Пространственная форма метеорного роя Геминид

около 0,1 а.е., Возможно, что рой Геминид порождает несколько метеорных потоков, наблюдаемых при различных долготах Солнца. Одним из них являются Канисиды, наблюдаемые одновременно с Геминидами. Радиант Канисид расположен в созвездии Малого Пса ($\alpha_R=110^\circ$, $\delta_R=+12^\circ$), геоцентрическая скорость метеоров потока — около 38 км/с. Другим потоком, связанным с Геминидами, могут быть Дневные Секстантиды, регистрируемые в конце сентября радиолокационными методами, с наблюдаемым средним радиантом $\alpha_R=155^\circ$, $\delta_R=-4^\circ$ и геоцентрической скоростью 30 км/с (рис. 30).

Урсиды. Метеорный поток Урсид с радиантом в созвездии Малой Медведицы был открыт 22 декабря 1945 г. А. Бечваржем по наблюдениям в астрономической обсер-

ватории в Скалнате Плесо (Чехословакия), когда численность метеоров по визуальным наблюдениям достигла 170 в час. Но в последующие годы часовые числа метеоров были умеренными и составляли в максимуме от 10 до 20. Большое часовое число метеоров в 1945 г. было обусловлено встречей Земли со сгущением метеороидов.

Метеорный поток Урсид изучен пока недостаточно, что обусловлено обычно неблагоприятными для оптических наблюдений погодными условиями в третьей декаде

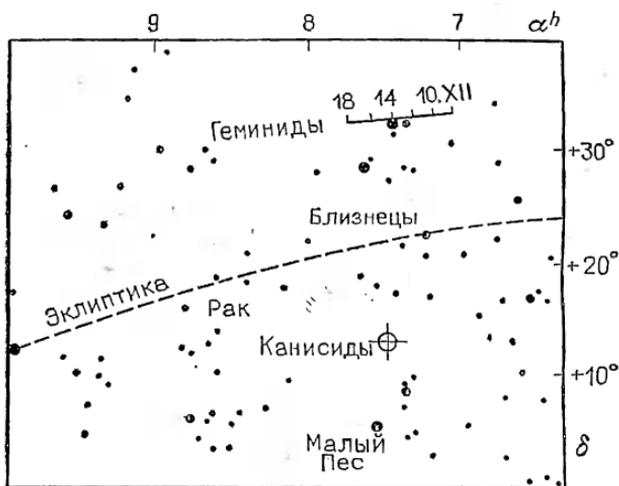


Рис. 30. Радианты метеорных потоков Геминид и Канисид на фоне звезд

декабря, трудностью определения координат радианта потока радиолокационным методом из-за его большого склонения и невозможностью наблюдения потока из южного полушария. Поэтому дальнейшие наблюдения потока различными методами представляются крайне интересными.

Дракониды. Метеорные дожди Драконид относятся к числу наиболее захватывающих метеорных явлений нашего века.

Подобно тому как в XIX в. звездный дождь Леонид привлек внимание научной общественности к визуальным наблюдениям метеоров, так и в XX в. поток Драконид, после дождя 1933 года, был первым, который в 1946 г. подробно регистрировался радиолокационным методом.

Метеорный поток Драконид связан с кометой Джакобини — Циннера, которая известна с 1900 г. и обращается вокруг Солнца с периодом около 6,5 года. Предположение о возможности наблюдения метеорного потока, связанного

го с этой кометой, было сделано еще в 1915 г. И. Дэвидсоном. Он обратил внимание на то, что эта комета проходит вблизи орбиты Земли. По элементам орбиты кометы было вычислен теоретический радиант потока, действие которого с большим интересом ожидали в 1926 г. Действительно, 10 октября 1926 г. наблюдался метеорный поток, но умеренной интенсивности, численность метеоров составила около 20 в час. По этим наблюдениям был уточнен радиант потока.

9 октября 1933 г., при прохождении Земли близко от узла кометной орбиты, произошло уникальное явление — «звездный дождь». Численность метеоров, по визуальным наблюдениям, составила 4000—6000 в час. Общая продолжительность «дождя» 4—4,5 часа.

Если бы во время наблюдений потока не мешал лунный свет, то зенитное часовое число Драконид в максимуме равнялось бы 15 000. Метеорный дождь повторился в 1946 г., как и было предсказано. Он успешно наблюдался не только визуально и фотографически, но и новым, радиолокационным методом во многих пунктах земного шара. На этот раз Земля прошла узел кометной орбиты через 15,4 суток после кометы. Поток был снова очень интенсивным, продолжительность его действия составила около 5—6 часов. По визуальным наблюдениям, максимальное часовое число метеоров достигало 4200. Если бы не лунное освещение, то во время максимума Драконид 1946 г. зенитное часовое число метеоров равнялось бы 30 000, т. е. метеорный дождь был бы в два раза интенсивнее, чем в 1933 г.

Фотографические наблюдения Драконид в 1946 г. выявили интересные особенности метеоров потока: метеоры появлялись на аномально больших высотах, имели очень короткие траектории и большие торможения в атмосфере. Эти особенности метеоров потока свидетельствовали о том, что метеорные тела Драконид очень рыхлые и имеют крайне низкую плотность.

Рой Драконид является молодым. Он занимает небольшой участок орбиты вблизи кометы. Расположение Земли и кометы Джакобини — Циннера в нисходящем узле орбиты кометы приведены в табл. 10 согласно Д. Йомансу и Ю. В. Евдокимову. В таблице даны расстояния Δ_s между орбитами кометы и Земли в нисходящем узле кометы в а. е., перигелийное расстояние q кометы в а. е., разность моментов прохождения Земли и кометы через узел орбиты кометы в сутках и сведения о наблюдениях потока.

Расположение Земли и кометы Джакобини — Циннера
в нисходящем узле орбиты кометы

Год	$\Delta \delta$	q , а. е.	$\Delta t = t_{\delta} - t_{\odot}$ сутки	Сведения о наблюдениях метеоров потока
1900	-0,0617	0,93152	-55,20	не наблюдался
1913	-0,0179	0,97601	-30,2	»
1920	-0,0140	1,07999	+137,3	»
1926	-0,0005	0,99373	-69,1	наблюдались 20 метеоров в час
1933	+0,0054	0,99953	+80,2	метеорный дождь 15 000 в час
1939	+0,0013	0,99560	-136,2	не наблюдался
1940	+0,0014	0,99560	+229,0	»
1946	+0,0015	0,99571	+15,2	метеорный дождь 30 000 в час
1952	-0,0057	0,98869	-195,5	метеорный поток 180 в час
1953	-0,0057	0,98869	+169,8	не наблюдался
1959	-0,0595	0,93596	-21,7	»
1966	-0,0621	0,93351	+190,7	»
1972	-0,0007	0,99400	+58,5	»
1978	+0,0013	0,99600	-133,2	»
1979	+0,0013	0,99606	+232,1	»
1985	+0,0329	0,02826	+26,5	метеорный дождь 1000 в час
1998	+0,04	1,03	-50	
2005	+0,04	1,04	+90	
2012	+0,03	1,03	+230	
2018	+0,02	1,01	+18	
2024	+0,01	1,01	-175	
2025	+0,01	1,01	+193	

Анализ таблицы показывает, что метеорные дожди наблюдались, если Земля проходила:

1) через узел кометной орбиты вскоре после кометы; 2) достаточно близко от кометной орбиты; 3) внутри орбиты кометы, т. е. когда разность $\Delta \delta$ расстояний кометы и Земли от Солнца мала и положительна.

В 1985 г. выполнялись первое и третье условия повторения метеорных дождей. 8 октября Земля прошла нисходящий узел орбиты кометы через 26,5 суток после кометы, но на расстоянии около 5 млн км (0,033 а. е.). Максимум потока пришелся на 10 часов мирового времени. Поэтому визуальные наблюдения могли быть проведены на востоке Советского Союза и в Японии.

Радиолокационные наблюдения метеоров потока Драконид в 1985 г. были успешно проведены в Душанбе и Казани. Обработка всех этих наблюдений даст новую важную информацию о структуре потока.

Следующие благоприятные условия наблюдений Драконид сложатся лишь в 2018 г. когда Земля пройдет внутри орбиты кометы вблизи нисходящего узла на расстоянии около 3 млн км через 18 суток после кометы. Менее благоприятными будут условия наблюдения Драконид в 1998 г., 2005 и 2012 гг., когда можно ожидать умеренную активность потока.

Леониды. Ежегодно в середине ноября можно регистрировать до 10—12 метеоров, принадлежащих потоку Леонид. Феноменальные метеорные дожди Леонид появляются примерно через каждые 33 года. Это показывает, что метеорные частицы в рое распределены вдоль всей орбиты, но на участке, близком к комете, пространственная плотность частиц во много раз больше, чем в остальной части роя. Знаменитые метеорные дожди Леонид в 1766, 1799, 1833, 1866 и 1966 гг. являются результатом встречи Земли с плотными компактными участками роя.

На основе различных хроник и летописей удалось проследить появления метеорного дождя Леонид вплоть до 902 г.

Орбита роя Леонид расположена в пространстве так, что Юпитер подходит к ней почти на 0,7 а. е., а Сатурн на 0,4 а. е. (рис. 31). Под влиянием притяжения этих двух планет-гигантов участок роя, сблизившийся с ними, отклоняется от первоначальной орбиты и в результате меняется условие встречи Земли с этим участком роя. По этой причине участки роя, давшие в прошлом метеорные дожди, после 1866 г. оказались отодвинутыми от земной орбиты, и поэтому не было метеорных дождей ни в 1899 г., ни в 1932—1933 гг.

Сама комета после 1866 г. также была потеряна и в последующих двух возвращениях не была обнаружена. Наступил 1965 год. Через столетие после открытия комета была снова найдена, заметно увеличилась активность потока Леонид. Часовое число метеоров в 1965 г. достигло 2000. Все с интересом стали ждать встречи Земли с плотной частью роя в 1966 г.

В ночь с 16 на 17 ноября 1966 г. над Арктикой и Америкой прошел очень интенсивный дождь Леонид. Во время пика активности потока, в течение 20—30 минут, численность метеоров достигала 40 в секунду (фото XIV).

В остальных районах земного шара численность метеоров была небольшой, хотя и более высокой, чем в предшествующие годы.

В 1967 г. активность Леонид в максимуме составила около 40 метеоров в час. Если даже учесть, что наблюдениям мешала яркая Луна, то часовые числа едва достигали 100 метеоров. В настоящее время ежегодно Земля пересекает весьма разреженные участки роя, и часовые числа Леонид составляют лишь несколько метеоров.

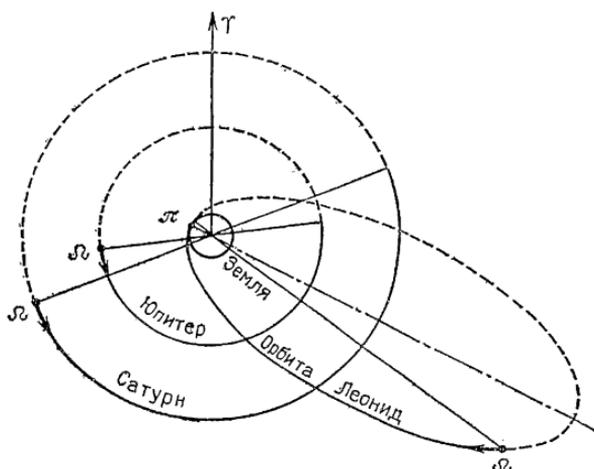


Рис. 31. Орбита метеорного роя Леонид в проекции на плоскость эклиптики

Анализ обстоятельств появления метеорных дождей Леонид показывает, что плотная часть роя значительно вытянута вдоль орбиты. Так, например, плотная часть роя, породившая дождь 1833 г., отставала от кометы Темпеля—Туттля на 300 дней, а та, что дала дождь 1966 г., — более чем на 18 месяцев. Каковы же шансы появления метеорного дождя Леонид в ближайшем будущем?

В 1997 г. Земля пройдет через узел орбиты кометы на 108 дней раньше, чем комета, а в 1998 и 1999 гг. соответственно через 257 и 622 дня после кометы, на расстоянии 0,008 а. е. от ее орбиты. Поэтому следует ожидать, что в 1998—1999 гг. рой Леонид подарит нам опять великолепные метеорные фейерверки. Возможно, за несколько лет до этого события возрастет и активность потока.

Андромедиды (Биэллidy), давшие кратковременные, но великолепные дожди 1872 и 1885 гг., явились яркой иллю-

страдией образования метеорных роев в результате распада кометных ядер. Поток Андромедид наблюдался и раньше. Его активность прослеживается до 1741 г. В отдельные годы численность метеоров достигала 400 в час. Надо полагать, что распад кометы Биэлы в 1846 г. обогатил метеорный рой свежим веществом. Наблюдались Андромедиды и после 1885 г., когда активность потока была довольно интенсивной (в 1892 г. 300 метеоров в час, в 1899 году 400 метеоров в час). После этого Андромедиды почти полностью иссякли, так как орбита роя под действием планетных возмущений, главным образом Юпитера, изменилась настолько, что не пересекается с земной. На рис. 32 показано изменение радиуса-вектора узла орбиты кометы Биэлы со временем. В 1872 и 1885 гг. радиус-вектор был равен

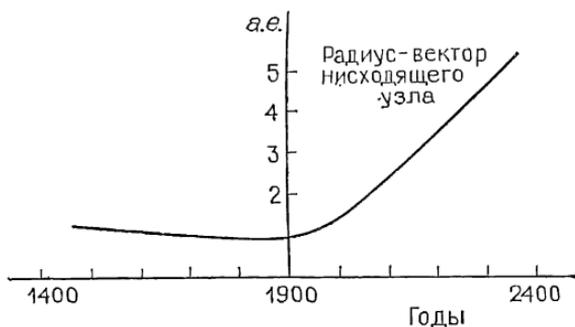


Рис. 32. Изменение радиуса-вектора узла орбиты кометы Биэлы под действием планетных возмущений

1 а. е., и поэтому происходили встречи Земли с метеорным роем. Затем радиус-вектор постепенно увеличивался, и мы перестали наблюдать метеоры, связанные с кометой Биэлы.

На основе радиолокационных наблюдений, проведенных в различных странах (СССР, США, Великобритания, Австралия и др.), к настоящему времени выявлено несколько сот дневных метеорных потоков и ассоциаций.

В табл. 6 и 7 приведены данные о трех дневных потоках (рис. 33), отличающихся большой численностью метеоров и ежегодной повторяемостью. Рассмотрим каждый из них более подробно.

Дневные Ариетиды. Радиант потока находится в созвездии Овна. По данным Б. Ловелла, средние часовые числа метеоров, регистрируемых радиометодом, для Ариетид намного выше, чем для ночного потока Геминид (рис. 34). Ловелл допускает возможность второго пересечения роем

орбиты Земли после прохождения перигелия. Предсказанный им радиант потока для второго пересечения имеет

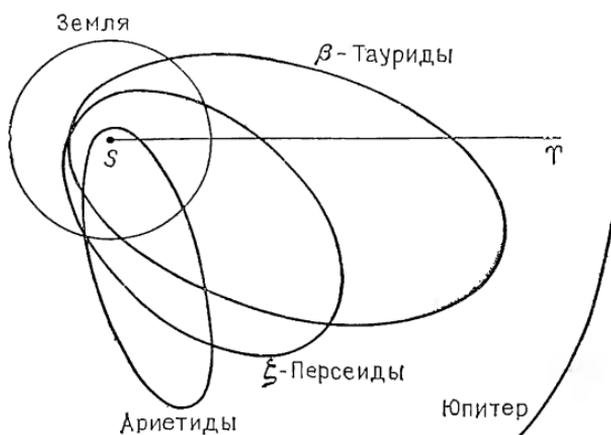


Рис. 33. Орбиты дневных метеорных потоков Ариетид, ξ -Персеид и β -Таврид в проекции на плоскость эклиптики

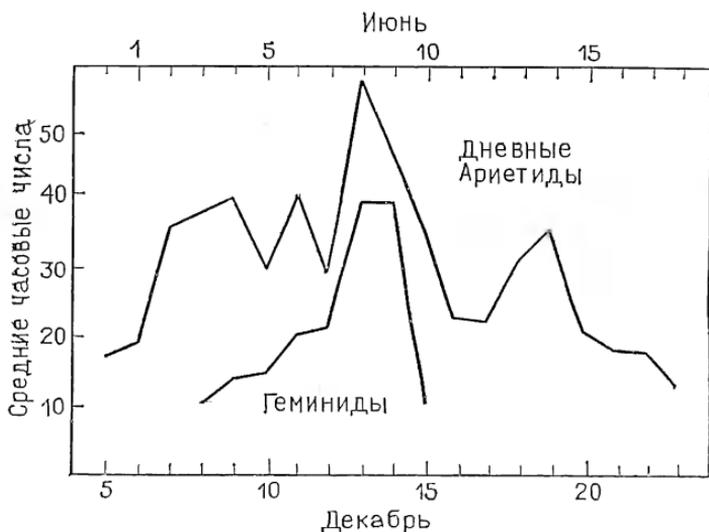


Рис. 34. Кривые численности метеорных потоков Дневных Ариетид и Геминид согласно Б. Ловеллу

следующие координаты: 28 июля, $\alpha_r=336^\circ$, $\delta_r=41^\circ$, которые очень близки к ночным δ -Акваридам. Близкими оказались и долготы перигелиев, перигелийные расстояния и эксцентриситеты орбит. Это находится в соответствии с результатами более поздних исследований, согласно которым

метеорные потоки Квадрантид, δ -Акварид и Дневных Ариетид могут порождаться одним и тем же метеорным роєм. Для дальнейшего уточнения взаимосвязи и структуры метеорного комплекса δ -Акварид, Дневных Ариетид и Квадрантид важными являются всесторонние наблюдения каждого из этих метеорных потоков.

Дзета-Персеиды активны почти в тот же период, что и Дневные Ариетиды. Максимум потока приходится на 7 июня, когда часовые числа метеоров составляют 40—50. Земля может встретить метеорный рой Дзета-Персеид второй раз 11 октября, когда может наблюдаться ночной поток с координатами радианта $\alpha_r = 28^\circ$, $\delta_r = +12^\circ$. Время действия и положение этого радианта (в созвездии Рыб) соответствует наблюдаемому потоку Северных Писцид. В таблице 11 приведены координаты радианта, скорости и элементы орбит этих потоков.

Таблица 11

Радианты и орбиты ξ -Персеид и Северных Писцид

Поток	Максимум активности	α_R	δ_R	v_g , км/с	e	q , а. е.	Ω	i	π
ξ -Персеиды	7 июня	60°	$+23^\circ$	27	0,79	0,34	59°	0°	137°
Северные Писциды	12 октября	26	14	29	0,80	0,40	291	3	130

Насколько верно допущение генетической связи ξ -Персеид и Северных Писцид, покажет дальнейшее изучение этих потоков.

β -Тауриды. Исследуя ночной поток Таурид в 1940 г., Ф. Уиппл заключил, что в конце июня — начале июля метеорный рой Таурид должен дать дневной поток, существование которого можно обнаружить по наблюдениям ярких болидов. Это предсказание блестяще подтвердилось, когда по радиолокационным наблюдениям в Джодрелл Бэнк был обнаружен поток β -Таурид. Измерения скорости, координат радианта и вычисления орбиты β -Таурид позволили сделать окончательный вывод о том, что этот поток порождается тем же самым метеорным роєм, что и ночные Тауриды, связанные с кометой Энке.

Кроме перечисленных главных метеорных потоков, к настоящему времени на основе фотографических наблю-

дений, проведенных в СССР, США, ЧССР и других странах, выявлено несколько сотен так называемых малых метеорных потоков. Их отличие от главных заключается в том, что часовые числа метеоров незначительны и индивидуальные радианты имеют большой разброс. В приложении приведен составленный по данным визуальных и фотографических наблюдений И. С. Астаповичем и А. К. Терентьевой список около 50 метеорных потоков, действующих в настоящее время (табл. I).

Многочисленные наблюдения показывают, что около 30% метеорных потоков прошлого века исчезло, но взамен них появилось почти столько же новых. Появление и исчезновение метеорных потоков обусловлено возмущающим действием больших планет. Под воздействием притяжения планет меняются условия встречи Земли с метеорными потоками: узлы орбит метеорных потоков могут настолько удалиться от орбиты Земли, что метеорный поток перестает быть наблюдаемым на Земле. Может происходить и обратное явление — орбита потока может измениться и приблизиться к земной настолько, что мы начнем наблюдать метеоры нового, ранее неизвестного потока. Метеорное небо находится в постоянном изменении, изучение закономерностей этих изменений — одна из интересных задач метеорной астрономии.

§ 3. СВЯЗЬ МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ С КОМЕТАМИ

К концу XIX столетия была установлена связь с кометами четырех метеорных потоков (Персеиды, Лириды, Леониды и Андромедиды), которые наблюдались ежегодно или давали эффектное явление «звездного дождя». С тех пор гипотеза о кометном происхождении метеорных роев стала господствующей. В дальнейшем было установлено родство других комет и метеорных потоков. В таблице 8 была приведена сводка элементов орбит известных метеорных потоков и связанных с ними комет. Для некоторых из этих пар, комета — метеорный поток, совпадение элементов орбит настолько хорошее (особенно для молодых потоков, таких, как Дракониды и комета Джакобини — Циннера), что они почти не отличаются друг от друга, а у других могут значительно отличаться. Это отличие обусловлено рядом причин, главными из которых являются условия выделения метеорных тел из ядер комет, возмущающее действие притяжения больших планет и негравитационные эффекты.

Что же представляют собой кометы, каков механизм выделения из них метеорных тел?

Кометы являются одними из интересных и загадочных небесных объектов и известны человечеству с древнейших времен. Яркие кометы хорошо видны невооруженным глазом. Необычный вид и неожиданность появления комет отличали их от других небесных светил и вызывали всеобщий интерес, в прошлом часто связанный с неоправданным страхом перед ними, из-за незнания их действительной природы. Кометы считались предвестницами различных болезней, наводнений, войн, голода и других несчастий.

Само слово «комета» происходит от греческого «кометис», что означает «длинноволосый» (от «коме» — волосы). В древние времена, в соответствии с воззрениями Аристотеля, кометы, как и метеоры, относили к атмосферным явлениям. Только в XVI в. Тихо Браге, наблюдая комету 1577 г., доказал, что она расположена от нас дальше, чем Луна, и опроверг древние представления. Движение комет по небу впервые объяснил Эдмонд Галлей, опубликовавший в 1705 г. первый каталог кометных орбит. Определив орбиты 24 ярких комет, наблюдавшихся с 1337 до 1698 г., Галлей обратил внимание, что кометы 1531, 1607 и 1682 г. имеют орбиты удивительно близкие друг к другу. Отсюда он заключил, что это должна быть одна и та же комета, движущаяся вокруг Солнца с периодом около 76 лет и предсказал следующее ее появление в 1758 г. Галлей не дождался этого времени и не смог увидеть, как подтвердилось его смелое предсказание. В декабре 1758 г. комета действительно была обнаружена, блестяще подтверждая закон всемирного тяготения Ньютона. Эта интересная яркая комета, исследование движения которой в течение более двух столетий способствовало развитию важного раздела астрономии — небесной механики, была названа кометой Галлея. Последнее прохождение через перигелий этой кометы в 1986 г. было ее тридцатым зарегистрированным в истории появлением. Всесторонние наблюдения этой кометы, проведенные в 1982—1986 гг. как различными наземными, так и космическими средствами с помощью советских космических аппаратов (КА) «Вега-1», «Вега-2», европейского КА «Джотто» и двух японских КА, пролили новый свет на природу этих уникальных небесных тел.

К настоящему времени определены орбиты 659 комет, появившихся за последние 2068 лет, с 86 г. до н. э. до

1982 г. Только 114 комет являются короткопериодическими (период обращения вокруг Солнца составляет менее 200 лет), из них 73 наблюдались в двух и более появлениях, а 41 — лишь в одном появлении. Остальные 545 комет относятся к долгопериодическим. Движение комет вокруг Солнца может быть как прямым, так и обратным, например, движение кометы Галлея является обратным и наклон ее орбиты составляет $i=162^\circ$.

Согласно современным воззрениям ядро кометы состоит из конгломерата тугоплавких каменных частиц, водяного льда и замороженных газов, главными из которых являются метан, аммиак и углекислота. На долю пылевых частиц приходится около $1/3$ массы ядра кометы. По мнению Ф. Уиппла, ядра комет образуются на очень больших гелиоцентрических расстояниях при столкновениях твердых частиц и молекул между собой с очень малыми скоростями. Поперечники ядер комет заключены в пределах 1—10 км. С помощью КА «Вега-1», «Вега-2» и «Джотто» в 1986 г. установлено, что ядро кометы Галлея по форме напоминает картофелину поперечником 7 км и длиной 11 км.

Вдали от Солнца комета по своему внешнему виду ничем особенным не отличается от слабых звезд. Когда кометное ядро приблизится к Солнцу на расстояние около 2 а. е., его поверхность под действием солнечной радиации нагревается и начинается интенсивное испарение летучих веществ кометы. Комета приобретает вид туманного пятнышка — комы с центральным уплотнением, которое называется видимым ядром. Такой обычно и открывают комету. Испарившиеся газы, увлекая пылевые частицы, образуют голову кометы. По мере дальнейшего приближения к Солнцу диаметр головы кометы растет и, под усиливающимся воздействием давления света и корпускулярных потоков Солнца, газы и пыль покидают голову кометы и образуют различного типа хвосты, направленные в противоположную от Солнца сторону (фото XV).

Наряду с мелкими пылинками из ядра кометы выбрасываются и крупные частицы размером более 0,1—1 мм, на которые действие лучевого давления мало. Эти частицы продолжают двигаться почти по той же орбите, что и комета, и образуют метеорный рой.

При каждом прохождении кометы вблизи Солнца значительная часть ее вещества испаряется и извергается, пополняя новыми частицами метеорный рой. Подсчитано,

что ядро знаменитой кометы Галлея за 30 прохождений через перигелий уменьшилось более чем на 1 км.

По интенсивности газовыделения кометы принято делить на «новые» и «старые». К первым относятся кометы, проникающие во внутренние области Солнечной системы впервые или очень редко, а ко вторым — короткопериодические кометы, многократно проходившие очень близко от Солнца. Вследствие частых и близких прохождений около Солнца на поверхности кометы образуется теплоизоляционный слой каменных веществ значительной толщины, который защищает находящийся под ним лед от быстрого испарения. Такую, как бы «высохшую», комету трудно отличить от астероидов — каменных тел размерами в сотни километров и меньше, движущихся в огромном количестве в основном между орбитами Марса и Юпитера. Возможно, что некоторые астероиды, принадлежащие к группам Аполлона, Амура и Атона, с «кометным» характером орбит, являются «высохшими» кометами. Такая точка зрения нашла свое подтверждение, когда в 1983 г. с помощью ИСЗ «IRAS» был открыт слабый астероид (около 16-й звездной величины), получивший номер 3200 (первичное обозначение 1983 ТВ). Орбита астероида 3200 оказалась почти совпадающей с орбитой известного метеорного потока Геминид (табл. 8). До этого не было известно родительское тело Геминид. Так как все метеорные рои являются продуктами разрушения кометных ядер, то логично было заключить, что астероид 3200 является одной из «высохших» комет.

§ 4. ОБРАЗОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ МЕТЕОРНЫХ РОЕВ

Идея образования метеорных роев в результате выброса вещества из ядер комет впервые была высказана Ф. А. Бредихиным в 1877 г. В соответствии с современной ледяной моделью ядра кометы, при приближении к Солнцу твердые частицы выбрасываются из ядра потоками сублимирующих газов. Скорость выброса частиц зависит от радиуса частицы ρ (см), ее плотности δ (г/см³), расстояния кометы от Солнца r (а. е.) и радиуса ядра кометы R_c (км) следующим образом:

$$c = \left(\frac{R_c}{\rho\delta} \right)^{1/2} \cdot \frac{6,6}{r^{9/8}} \text{ м/с.} \quad (36)$$

Из формулы (36) следует, что чем больше ядро кометы,

тем с большей скоростью выбрасывается частица данных размеров и плотности.

Очевидно, выброс твердых частиц наиболее интенсивно происходит вблизи перигелия — при наименьшем расстоянии кометы от Солнца. Выброс твердых частиц происходит во все стороны. Скорости выброшенных частиц будут складываться со скоростью кометы. Частицы, выброшенные по направлению, противоположному движению кометы, будут двигаться по орбитам с меньшей большой полуосью, чем ядро кометы; периоды их обращения вокруг Солнца будут короче и со временем они станут двигаться впереди ядра кометы. А частицы, выброшенные в противоположную сторону, будут иметь большие периоды обращения и двигаться позади кометного ядра. Различия в периодах обращения частиц вокруг Солнца приводят к тому, что через некоторое время частицы рассеются вдоль орбиты кометы, образуя замкнутый рой. Если через P_{\min} и P_{\max} обозначить соответственно минимальный и максимальный периоды обращения двух частиц, то время замыкания роя может быть определено по формуле

$$T = \frac{P_{\max}^2}{P_{\max} - P_{\min}} .$$

Время, необходимое для замыкания роя, зависит от радиуса кометного ядра, размеров и плотности выбрасываемых частиц, перигелийного расстояния и большой полуоси кометной орбиты. Например, если выброс происходит в перигелии, $R_c = 5$ км, масса частицы 10^{-3} г и плотность $3,5$ г/см³, то на замыкание роя Геминид требуется 6,4 года, а для роя Персеид 650 лет. Для замыкания этих роев частицами массой в 1 г, порождающими яркие метеоры, требуется в 2,5 раза большее время.

В первой стадии эволюции роя вследствие того, что дисперсия скоростей выброса частиц невелика, вблизи кометы образуется компактное облако метеорных частиц, при встрече которого с Землей наблюдается метеорный дождь, как это было с Леонидами (1799, 1833), Драковидами (1933, 1946) и другими потоками. Продолжительность активности потока составляет всего несколько часов, периодичность повторения дождя определяется периодом обращения кометы вокруг Солнца.

Во второй стадии дисперсия скоростей метеорных тел приводит к тому, что происходит медленное рассеяние метеорных частиц вдоль всей орбиты. Так как метеорные частицы возвращаются к месту своего выброса из ядра

кометы, то рои являются более концентрированными около перигелия, чем около афелия. При прохождении Земли через рой наблюдается метеорный поток небольшой продолжительности с компактной площадью радиации. Кривые численности метеоров от года к году относительно одинаковы. Примерами являются Квадрантиды и Лириды.

В следующей стадии рой утолщается и становится довольно широким, а период активности потока продолжительным — порядка недели и более, радиант потока — диффузным. В этой стадии находятся Персеиды, Тауриды.

Далее под действием притяжения больших планет рой приобретает сложную форму. Рой утолщается и уменьшается пространственная плотность частиц роя. С данным роем Земля может встретиться в нескольких точках своей орбиты, т. е. образуются метеорные потоки-близнецы, наблюдаемые в разное время года. Примером является пространственная форма метеорного роя Геминид, которую он приобретает под действием планетных возмущений (рис. 29).

На эволюцию орбит мелких частиц метеорных роев значительное влияние оказывает поглощение ими солнечной радиации и последующее ее изотропное переизлучение, которое известно под названием эффекта Пойнтинга—Робертсона. Под его влиянием большая полуось и эксцентриситет орбиты уменьшаются со временем. В конце концов частица падает на Солнце. Время, по истечении которого частица упадет на Солнце, тем короче, чем меньше ее размеры. Для частицы, движущейся вокруг Солнца по окружности, это время равно:

$$\tau = 7 \cdot 10^8 \rho \delta r_0^2 \text{ лет,}$$

где r_0 — начальный радиус круговой орбиты в а. е., ρ и δ выражены соответственно в см и г/см³. Каменная частица, имеющая плотность $\delta = 3,5$ г/см³, радиус $\rho = 10^{-3}$ см и движущаяся по орбите с $r_0 = 1$ а. е., упадет на Солнце через 24 тысячи лет, а имеющая такой же радиус, но плотность пемзы (0,6 г/см³) — через 4000 лет. Продолжительность жизни частицы, движущейся по эллиптической орбите с большой полуосью $a = 1$ а. е., еще короче.

При уменьшении размеров орбиты вследствие эффекта Пойнтинга — Робертсона под действием испарения радиус частицы уменьшится до критического, т. е. до такого, когда выполняется условие $\rho \delta \leq 5,76 \cdot 10^{-5}$, где ρ и δ измеряются в единицах СГС. Это означает, что отношение силы светового давления к силе притяжения Солнца,

определяемое формулой

$$\beta = \frac{5,76 \cdot 10^{-5}}{\rho \delta},$$

становится больше 1, и давлением света частица будет выметаться за пределы Солнечной системы. Такие частицы, движущиеся по гиперболическим орбитам, называют β -метеороидами.

На первом этапе, под влиянием эффекта Пойнтинга — Робертсона, в метеорном рое происходит сортировка частиц по размерам: более мелкие частицы располагаются ближе к Солнцу, чем крупные. Проявление влияния эффекта Пойнтинга — Робертсона можно видеть на примере метеорного потока Геминид.

Дальнейшее влияние эффекта Пойнтинга — Робертсона приводит к тому, что мельчайшие частицы постепенно покидают пределы роя, пополняя ряды спорадических метеорных частиц.

Другим эффективным механизмом, истощающим метеорный рой, являются катастрофические столкновения метеороидов со спорадическими метеорными частицами. По имеющимся расчетам метеорные тела с массой около 10^{-3} г и по структуре аналогичные пемзе или базальту в рое Геминид должны разрушиться через $2 \cdot 10^4$ лет. Метеорные частицы, покинувшие рой в результате катастрофических столкновений, также пополняют ряды спорадических метеороидов.

Пространственную плотность метеорных тел в роях уменьшают также планеты. При каждом своем прохождении через рой планеты выметают определенное количество вещества роя.

Влияние притяжения больших планет, эффект Пойнтинга — Робертсона и всевозможные столкновения частиц роя со спорадическими метеороидами настолько увеличивают дисперсию элементов орбит частиц роя и уменьшают его пространственную плотность, что со временем активность потока существенно понизится, а встреча разрозненных метеороидов роя с Землей будет восприниматься как спорадический фон.

§ 5. СТРУКТУРА МЕТЕОРНЫХ РОЕВ

Под структурой метеорного роя обычно понимают распределение метеорных тел по массам вдоль и поперек орбиты роя и пространственную плотность метеорных роев.

О ширине роя можно судить по периоду действия метеорного потока. Продолжительность действия потока характеризует длину пути, проходимого Землей сквозь метеорный рой. Умножая эту длину на $\sin \epsilon'$, получим ширину роя. Здесь ϵ' — элонгация истинного радианта от апекса. Для того чтобы Земля пересекла рой Персеид, необходим почти месяц. Это означает, что поперечник роя составляет около 50 млн км. А на пересечение роя Квадрантид уходит всего 10 часов, т. е. его ширина равна около 1 млн км.

Каждый год Земля пересекается с новыми участками эллиптического кольца метеорного роя. Следовательно, для того чтобы сделать достоверные выводы о продольном строении роя, необходимо иметь многолетние наблюдения, охватывающие по времени период обращения роя вокруг Солнца. Для отдельных метеорных роев этот период составляет всего несколько лет, для других — несколько десятков лет.

Данные о структуре метеорных роев могут быть получены на основе изучения численности метеоров в потоках и определения закона распределения метеорных тел по массам.

При определении функции светимости для метеорных потоков необходимо учесть, что наблюдаемая численность метеоров зависит от зенитного расстояния радианта. Учет этой зависимости с достаточной степенью точности осуществляется по формуле

$$F(m) = \frac{F_Z(m)}{\cos z_R},$$

где z_R — зенитное расстояние радианта метеорного потока. Обычно z_R определяется для каждого часа наблюдений.

Так как внеатмосферная масса метеорного тела M и максимальная абсолютная звездная величина m порождаемого им метеора связаны соотношением

$$m = d - 2,5 \lg M,$$

где d — постоянная, то из функции светимости метеоров можно получить закон распределения метеорных тел в рое по массам:

$$F(M) = F(1) M^{1-s}. \quad (37)$$

Здесь $F(1)$ — число метеорных тел массивнее 1 г, s — показатель закона распределения метеорных тел по массам,

который связан с параметром κ функции светимости простым соотношением

$$s = 1 + 2,5 \lg \kappa.$$

По визуальным наблюдениям для метеорных потоков значение κ заключено в пределах от 1,7 до 4,4, что соответствует значениям s от 1,6 до 2,6.

Параметр s показывает, как изменяется число метеорных тел в зависимости от их масс. Параметр s различен не только для разных метеорных роев, но и для различных участков одного и того же метеорного роя. Изменение

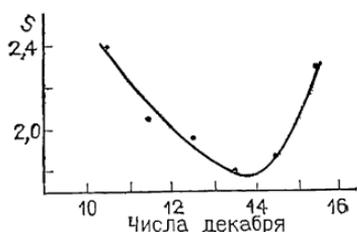


Рис. 35. Изменение параметра s за период активности метеорного потока Геминид по радиолокационным наблюдениям в Душанбе

параметра s для метеорного роя Геминид иллюстрирует рис. 35. Из него следует, что в начале периода активности Геминид $s=2$, а затем уменьшается до 1,7. Это означает, что при встрече с роем Геминид Земля проходит области роя, в которых отношение числа крупных частиц к числу более мелких постепенно возрастает.

Число метеорных частиц, соударяющихся в единицу времени с поверхностью единичной площади, перпендикулярной к направлению на радиант, называют плотностью потока метеорных частиц роя. Интегральная плотность потока $\Phi(M)$ метеорных частиц массивнее M равна

$$\Phi(M) = \Phi(1) M^{1-s} [\text{частиц} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}], \quad (38)$$

где $\Phi(1)$ — плотность потока метеорных частиц массивнее 1 г.

Очевидно, плотность потока метеорных частиц массивнее M_0 , порождающих метеоры нулевой звездной величины и ярче, равна

$$\Phi(M_0) = N(0) = \Phi(1) M_0^{1-s}.$$

где $N(0)$ — по-прежнему интегральная плотность потока метеоров 0-й звездной величины и ярче, M_0 — масса метеорной частицы, порождающей при вертикальном движении ($z_r=0$) со скоростью v метеор нулевой звездной величины. Зависимость M_0 от v (км/с) в соответствии с

формулой (26) имеет следующий вид:

$$M_0 = 2,5 \cdot 10^5 \cdot v^{-4} \text{ (г) для ярких метеоров } (m < 0^m),$$

$$M_0 = 6,3 \cdot 10^2 \cdot v^{-2} \text{ (г) для слабых метеоров } (m > 0^m). \quad (39)$$

Определив из наблюдений для изучаемого метеорного роя плотность потока $N(0)$ метеоров нулевой звездной величины и ярче, а из зависимости (39) значение M_0 , соответствующее скорости v , вычисляем интегральную плотность потока метеорных частиц массивнее 1 г для данного роя:

$$\Phi(1) = \frac{N(0)}{M_0^{1-s}} \text{ [частиц/(м}^2 \cdot \text{с}^1)].$$

Если определена плотность потока частиц, то нетрудно определить и число частиц массивнее M , приходящихся на единицу объема метеорного роя, называемое пространственной плотностью метеорных частиц роя:

$$D(M) = \frac{\Phi(M)}{v} \text{ частиц/м}^3.$$

В табл. 12 приведены значения параметра распределения метеоров по звездным величинам κ , показателя закона распределения метеорных частиц по массам s и пространственная плотность частиц массивнее $M_{4,3}$ для некоторых метеорных роев, полученные Б. Ю. Левиным на основе данных визуальных наблюдений. Согласно Б. Ю. Левину $M_{4,3} = 1,3 \cdot 10^{-3}$ г. В последнем столбце таблицы приведено среднее расстояние Δ между частицами в метеорном рое,

$$\Delta = \sqrt[3]{D^{-1}} \text{ [км]}.$$

Плотность потока, интегральная пространственная плотность и среднее взаимное расстояние метеорных частиц массивнее $2 \cdot 10^{-4}$ г, полученные В. Н. Лебединцом для ряда метеорных потоков, приведены в табл. 13.

Как видно из табл. 12 и 13, пространственная плотность метеорных частиц увеличивается при переходе к более мелким частицам. Пространственная плотность метеорных тел крайне различна также для метеорных роев, дающих одинаковые часовые числа метеоров. Так, Персеиды имеют почти одинаковые наблюдаемые часовые числа с Геминидами. Однако пространственная плотность метеорных тел в рое Персеид оказывается почти в 10 раз меньше, чем у роя Геминид. В рое Персеид одна частица

Таблица 12

Пространственная плотность частиц в метеорных роях

Метеорный поток	α	δ	$\Phi (M_{4,3}),$ км ⁻² ·с ⁻¹	$D (M_{4,3}),$ км ⁻³	$\Delta (M_{4,3}),$ км
Квадрантиды	2,5	2,0	19·10 ⁻⁷	44·10 ⁻⁹	280
Лириды	1,7	1,6	4·10 ⁻⁷	8·10 ⁻⁹	500
η -Аквариды	2,3	1,9	5·10 ⁻⁷	7·10 ⁻⁹	520
δ -Аквариды	3,7	2,4	2,5·10 ⁻⁷	6·10 ⁻⁹	550
Персеиды	2,5	2,0	9·10 ⁻⁷	15·10 ⁻⁹	400
Ордиониды	4,0	2,5	0,7·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁹	1000
Тауриды	3,0	2,2	9·10 ⁻⁷	28·10 ⁻⁹	330
Леониды	2,4	2,0	0,8·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁹	1000
Геминиды	3,4	2,3	48·10 ⁻⁷	132·10 ⁻⁹	200
Урсиды (1945)	—	—	133·10 ⁻⁷	380·10 ⁻⁹	140
Леониды (1866)		2,0	0,58·10 ⁻⁴	0,8·10 ⁻⁶	108
Андромедиды (1872, 1885)		2,0	30·10 ⁻⁴	140·10 ⁻⁶	19
Дракониды (1933)			43·10 ⁻⁴	180·10 ⁻⁶	18
Дракониды (1946)			86·10 ⁻⁴	360·10 ⁻⁶	14
Спорадические метеороиды	3,0	2,2	110·10 ⁻⁷	1100·10 ⁻⁹	97

Таблица 13

Плотность потока метеорных частиц с массами более 2·10⁻⁴ г по радиолокационным наблюдениям в Харькове

Метеорный поток	$\Phi (2 \cdot 10^{-4}),$ км ⁻² ·с ⁻¹	$D (2 \cdot 10^{-4}),$ км ⁻³	$\Delta (2 \cdot 10^{-4}),$ км
Квадрантиды	2,6·10 ⁻⁵	0,6·10 ⁻⁶	120
Лириды (1958)	2,8·10 ⁻⁵	1,0·10 ⁻⁶	100
Ариетиды	5,4·10 ⁻⁵	1,4·10 ⁻⁶	110
Южные δ -Аквариды	7,5·10 ⁻⁵	1,8·10 ⁻⁶	82
Геминиды	3,4·10 ⁻⁵	0,9·10 ⁻⁶	104
Спорадические метеороиды	1,1·10 ⁻⁴	12·10 ⁻⁶	44

массивнее 10⁻³ г приходится на 6,7·10⁷ км³, т. е. одна частица массивнее 10⁻³ г приходится на куб с ребром 400 км. В начале и конце активности Персеид простран-

ственная плотность роя Персеид почти в 100 раз меньше, чем во время максимума активности, и составляет около 10^{-10} км⁻³, т. е. одна частица массивнее 10^{-3} г приходится на куб с ребром ~ 2000 км.

Среди главных метеорных роев наибольшую пространственную плотность имеют Геминиды. Для них одна частица массивнее 10^{-3} г приходится на $7,5 \cdot 10^6$ км³, т. е. одна частица на куб с ребром почти 200 км. Наименьшую пространственную плотность имеют Ориониды, для которых одна частица массивнее 10^{-3} г приходится на куб с ребром 1000 км.

Пространственная плотность метеорных тел намного больше в тех роях, которые порождают метеорные дожди.

Согласно исследованиям Б. Ю. Левина, основанным на данных визуальных наблюдений, пространственная плотность метеорных тел массивнее 10^{-3} г в компактной части роя Драконид, давшей в 1946 г. метеорный дождь с часовым числом метеоров 30 000, составляет $3,6 \cdot 10^{-4}$ частиц/км³, т. е. одна метеорная частица приходится на куб с ребром 14 км. В рое Драконид пространственная плотность частиц в 3000 раз больше, чем в метеорном рое Геминид.

Следует подчеркнуть, что некоторые метеорные рои являются догоняющими Землю, и, следовательно, имея малую геоцентрическую скорость, могут дать лишь незначительные часовые числа метеоров, наблюдаемых визуально. Но они могут иметь относительно большую пространственную плотность метеорных тел. Вот почему весьма важным является тщательное изучение и таких слабых метеорных потоков. Так, например, визуальное часовое число метеоров потока Корвид, приведенное к зениту, в максимуме активности (26 июня) составило лишь 13 метеоров. Геоцентрическая скорость метеоров потока около 10 км/с. Однако пространственная плотность метеорных тел массивнее 10^{-3} г в этом рое составляет $(2-9) \cdot 10^{-7}$ частиц/км³, т. е. превышает пространственную плотность таких активных потоков, как Квадрантиды и Геминиды. Этот пример показывает, что видимая активность метеорного потока прежде всего зависит от условий встречи метеорных тел роя с Землей.

Знание пространственной плотности метеорных тел в рое позволяет оценить плотность вещества в метеорных роях. Для этого необходимо определить среднюю массу \bar{M} метеорных тел массивнее некоторой минимальной M_{min} . Она может быть вычислена по одной из следующих

формул:

$$\bar{M}_1 = M_{\min} \cdot \frac{s-1}{s-2} \quad \text{при } s > 2,$$

$$\bar{M} = M_{\min} \cdot \ln \frac{M_2}{M_{\min}} \quad \text{при } s = 2,$$

$$\bar{M} = M_{\min} \frac{s-1}{2-s} \left(\frac{M_2}{M_{\min}} \right)^{2-s} \quad \text{при } s < 2,$$

где M_2 — масса самого крупного метеорного тела.

Если считать, что в рое самыми крупными являются метеорные тела массой 10^3 г, то средняя масса тел массивнее $M_{\min} = 10^{-3}$ г при $s=2$ равна

$$\bar{M} = 10^{-3} \ln 10^6 = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ г.}$$

Плотность вещества в рое вычисляется по формуле

$$\rho(M_{\min}) = D(M_{\min}) \cdot \bar{M}.$$

Для Квадрантид, например, согласно данным табл. 12

$$\rho(10^{-3}) = 4,4 \cdot 10^{-23} \cdot 10^{-2} = 6 \cdot 10^{-25} \text{ г/см}^3.$$

Для большинства метеорных роев плотность вещества для тел массивнее 10^{-3} г составляет 10^{-24} — 10^{-26} г/см³, а для компактных роев, например, породивших интенсивные метеорные дожди Андромедид и Драконид, превышает 10^{-21} г/см³.

§ 6. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ПЛОТНОСТЬ СПОРАДИЧЕСКИХ МЕТЕОРОИДОВ И ПРИТОК МЕТЕОРНОГО ВЕЩЕСТВА НА ЗЕМЛЮ

Спорадические метеороиды движутся по случайным орбитам и заполняют межпланетное пространство. Они имеют различное происхождение. Б. Ю. Левин выделяет четыре источника метеорных тел, порождающих спорадические метеоры:

1) метеорные тела, отделившиеся от метеорных роев в процессе распада этих роев;

2) псевдоспорадические метеорные тела, входящие в состав разреженных метеорных роев или роев, имеющих относительно малую геоцентрическую скорость и потому дающих метеорный поток весьма низкой численности; так, если бы метеорный рой Персеид двигался по орбите кометы Биэлы (Андромедиды), то он давал бы всего один метеор за 2—3 часа, а такие метеоры могли быть отнесены к классу спорадических;

3) метеорные тела, возникающие при дроблении астероидов;

4) очень мелкие метеорные тела, приходящие под воздействием эффекта Пойнтинга — Робертсона из внешних областей Солнечной системы в район орбиты Земли.

Считая кометы основным источником метеорных тел, американский ученый Ф. Уиппл предложил модель около-солнечного облака метеорных частиц в виде диска радиусом в 3,5 а.е. и толщиной 2,5 а.е. с центром в Солнце. Расчеты показывают, что средний приход вещества, поддерживающий метеорное облако в квазиравновесном состоянии, составляет около десяти тонн в секунду. Уиппл считает, что эти 10 т/с могут быть поставлены за счет вещества, которое выбрасывается из ядер короткопериодических комет, находящихся внутри орбиты Юпитера.

На основе подсчета полного числа метеоров, наблюдаемых за сутки в атмосфере Земли, можно оценить как плотность потока спорадических метеорных тел и суммарную массу метеорного вещества, выпадающего ежедневно на Землю, так и пространственную плотность спорадических метеорных тел в окрестности земной орбиты. Эти оценки представляют большой интерес для космогонии Солнечной системы и геофизики.

Полученный Б. Ю. Левиным на основе визуальных наблюдений параметр распределения спорадических метеоров по звездным величинам $k=3$ соответствует значению $s=2,2$ закона распределения метеорных тел по массам, что весьма близко к данным современных исследований метеоров.

На основе фотографических и радиолокационных наблюдений метеоров в Душанбе было найдено, что в интервале масс от 10^{-3} г до 10^2 г плотность потока спорадических метеорных тел равна

$$\Phi(M) = 2 \cdot 10^{-14} M^{-1,1} \text{ частиц}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot 2\pi). \quad (40)$$

Постоянная $2 \cdot 10^{-14}$ есть плотность потока метеорных тел массивнее 1 г, а $s=2,1$.

На рис. 36 представлена плотность потока метеорных тел по данным различных методов исследований.

Если известна плотность потока метеорных тел массивнее M , то приток вещества, образуемый этими телами на единицу площади за единицу времени, будет равен

$$\psi(M) = \frac{s-1}{s-2} \Phi(M) \cdot M \quad [\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})].$$

Если воспользоваться значением плотности потока спорадических метеорных тел, определяемым формулой (40),

то оказывается, что метеорные тела с массой от 10^{-6} г и более приносят $8 \cdot 10^{-16}$ кг вещества на м^2 за 1 с, или 35 т вещества в сутки на всю Землю.

Частицы с массами менее 10^{-13} г выметаются за пределы Солнечной системы давлением света. А частицы с массами от 10^{-13} до 10^{-6} г, в соответствии с результатами Д. Хьюза, полученными по данным экспериментов, проведенных с помощью искусственных спутников Земли, дают приток около 9 т вещества в сутки. Таким образом, прирост массы Земли за счет спорадических метеороидов составляет 44 т в сутки, или около 16 тыс. т в год.

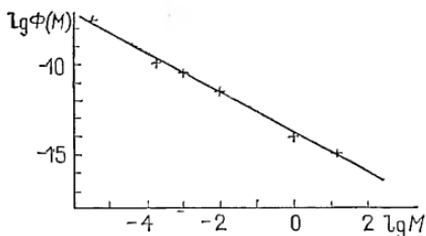


Рис. 36. Интегральная плотность потока спорадических метеорных тел в зависимости от их массы по данным различных наблюдений (крестики)

Плотность потока метеорных тел массивнее M позволяет определить пространственную плотность спорадических метеороидов.

Если определена интегральная плотность потока метеорных частиц массивнее M , то пространственная плотность таких частиц может быть легко вычислена по формуле

$$D(M) = \frac{4\Phi(M)}{\langle v_{\infty} \rangle},$$

где $\langle v_{\infty} \rangle$ — средняя скорость входа метеорных тел в земную атмосферу.

С учетом соотношения (40) пространственная плотность спорадических метеорных тел массивнее 10^{-6} г при $\langle v_{\infty} \rangle = 40$ км/с составляет $8 \cdot 10^{-3}$ частиц/км³, а для частиц массивнее 10^{-3} г равна $4 \cdot 10^{-6}$ частиц/км³. Это означает, что одна частица массивнее 10^{-3} г приходится в среднем на объем 250 000 км³, т. е. на куб с ребром в 63 км. А метеорная частица массивнее 10^{-6} г в среднем

приходится на 125 км^3 , т. е. одна частица на куб с ребром в 5 км.

Из приведенных данных следует, что пространственная плотность метеорных тел даже в центральных областях роев (табл. 12 и 13) на порядок меньше, чем средняя пространственная плотность метеорных тел в окрестностях земной орбиты. Только лишь в компактных участках метеорных роев, давших метеорные дожди, пространственная плотность метеорных тел значительно превышает пространственную плотность спорадических метеорных тел.

Средняя масса частиц спорадического фона массивнее 10^{-6} г равна $1,1 \cdot 10^{-5}$ г. Отсюда для плотности вещества в околоземном пространстве получим значение около 10^{-22} г/см³.

§ 7. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ОРБИТ СПОРАДИЧЕСКИХ МЕТЕОРОВ

За последние 20—30 лет на основе базисных фотографических и радиолокационных наблюдений были составлены каталоги радиантов и орбит десятков тысяч индивидуальных метеоров. Фотографическими методами регистрировались метеоры ярче +4-й звездной величины, а радиолокационными — до +12-й звездной величины. Приведем некоторые особенности распределения элементов орбит спорадических метеоров.

Большая полуось a. Распределения больших полуосей орбит (рис. 37) для ярких и слабых метеоров, по фотографическим наблюдениям, а также радиометеоров +5—+7-й звездной величины показывают, что значение a для ярких метеоров +1—6^m в среднем составляет ~ 5 а. е. У метеоров -1—+3^m чаще встречаются орбиты с $a \approx 3,3$ а. е. У метеоров, регистрируемых радиометодом, максимум распределения приходится на $a \approx 2$ а. е. Таким образом, с увеличением звездной величины метеоров среднее значение большой полуоси их орбит уменьшается, т. е. по мере перехода от более крупных метеорных тел к сравнительно мелким относительно количество короткопериодических орбит увеличивается. Возможно, это является следствием действия эффекта Пойнтинга — Робертсона.

В распределении элементов орбит спорадических метеоров особое место занимает класс частиц, движущихся по сверхкороткопериодическим орбитам с большой полуосью, близкой к 1 а. е. и даже меньше. Изучение свойств,

происхождения и эволюции таких частиц представляет особый интерес.

Эксцентриситет e . Распределение орбит метеоров по эксцентриситету показывает, что в среднем крупные метеорные частицы движутся по более вытянутым орбитам,

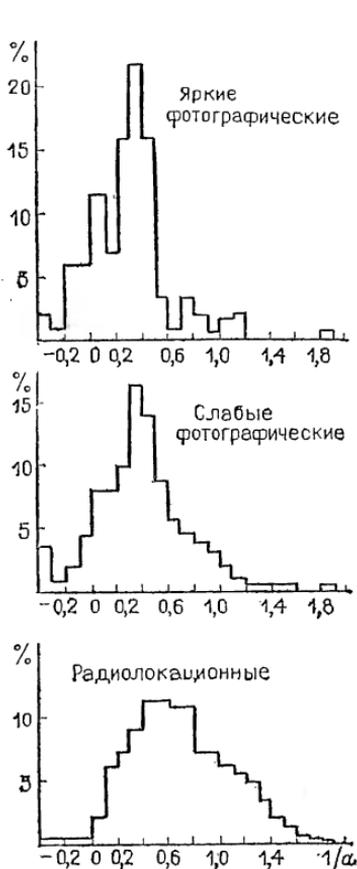


Рис. 37. Распределение обратных значений больших полуосей орбит спорадических метеороидов

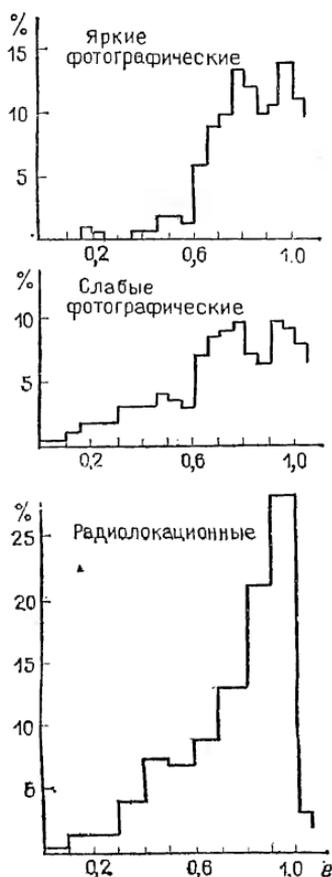


Рис. 38. Распределение эксцентриситетов орбит спорадических метеороидов

чем мелкие. Если для слабых метеоров $0 - +7^m$ доля орбит с $0 \leq e \leq 0,6$ составляет 23–25%, то для ярких метеоров доля орбит в том же интервале эксцентриситетов составляет всего лишь около 8% (рис. 38).

Перигелийное расстояние q . В распределении орбит крупных метеорных частиц по перигелийному расстоянию

выделяется острый максимум при $0,9 < q < 1$ а. е. При $q < 0,5$ а. е. количество ярких метеоров резко сокращается и имеется всего лишь несколько процентов метеорных тел с $q < 0,1$ а. е., у которых короткие периоды обращения и

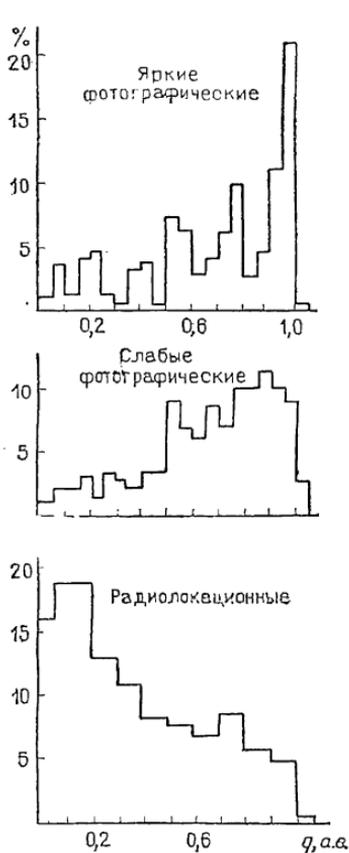


Рис. 39. Распределение перигелийных расстояний орбит спорадических метеороидов

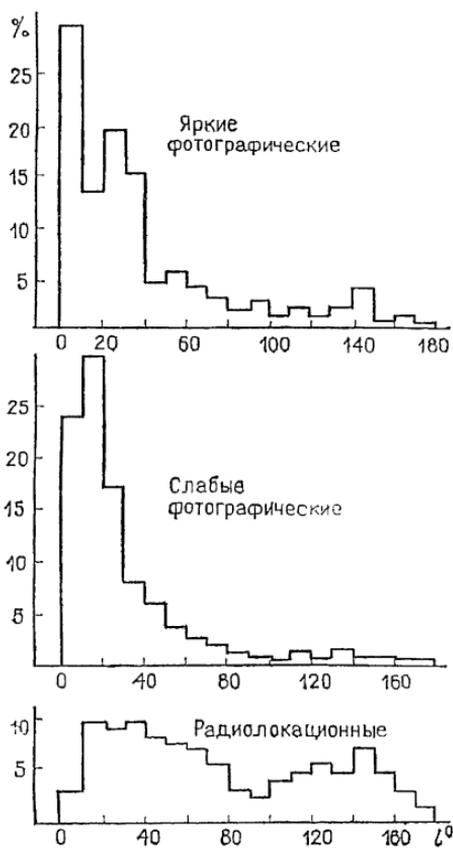


Рис. 40. Распределение наклонов орбит спорадических метеороидов

малые наклоны орбит (менее 35°). Малочисленность метеорных тел с $q < 0,1$ а. е. подтверждает предположение о роли солнечного излучения (теплового и корпускулярного) в резком уменьшении количества метеорных тел с подобными орбитами (рис. 39).

Наклонение орбит i . Распределение наклонов орбит показывает, что метеороиды, порождающие метеоры ярче $+3^m$, движутся по орбитам, концентрирующимся к пло-

скости эклиптики, и имеют наклоны менее 40° . В области $40^\circ < i < 180^\circ$ распределение метеорных тел почти равномерное. По данным фотографических наблюдений, в распределении наклонов орбит наблюдаются два широких максимума, при $10^\circ < i < 70^\circ$ и $100^\circ < i < 160^\circ$, и минимум при $i \approx 90^\circ$ (рис. 40).

Результаты изучения орбит спорадических метеорных тел показывают, что в подавляющем большинстве они являются остатками метеорных роев, рассеянных действием различных гравитационных и негравитационных возмущений и, следовательно, имеют кометное происхождение. Но по характеру орбит (размеру, форме и положению в пространстве) часть спорадических метеороидов, хотя и малая, близка к астероидам.

Интересный критерий классификации орбит был предложен Ф. Уипплом в 1954 г.:

$$k = \lg \left[\frac{a(1+e)}{1-e} \right] - 1,$$

где a — большая полуось, e — эксцентриситет орбиты. Оказалось, что $k > 0$ для комет и $k < 0$ для астероидов. Орбиты всех комет (за исключением 13) и всех астероидов (за исключением трех) удовлетворяют этому критерию.

По данным фотографических наблюдений, подавляющее большинство спорадических метеороидов имеют кометное происхождение.

Другой простой критерий разделения орбит на кометные и астероидные был предложен Л. Кресаком. Этот критерий имеет следующий вид:

$$Pe \cong 2,5.$$

Здесь $P = a^{3/2}$ — период обращения вокруг Солнца в годах и e — эксцентриситет. Для астероидов $Pe < 2,5$, а для комет $Pe > 2,5$. Этому критерию удовлетворяют орбиты всех комет (за исключением кометы Швасмана—Вахмана I) и всех астероидов (за исключением Гидальго 944).

На рис. 41 представлено распределение по Pe для комет, астероидов и спорадических метеорных тел. Хорошо видно, что спорадические метеорные тела попадают как в область с $Pe > 2,5$, так и в область $Pe < 2,5$.

Метеорное вещество в межпланетном пространстве, рассматриваемое как продукт распада более крупных тел в Солнечной системе (комет и астероидов) или как первоначальное вещество Солнечной системы, постоянно эволюционирует. По имеющимся подсчетам, за период суще-

ствования нашей планетной системы метеорное вещество в окрестностях Солнца должно было обновиться уже много раз.

Вопросы происхождения и эволюции метеорных тел и их систем ждут своего решения. Для этого необходимо

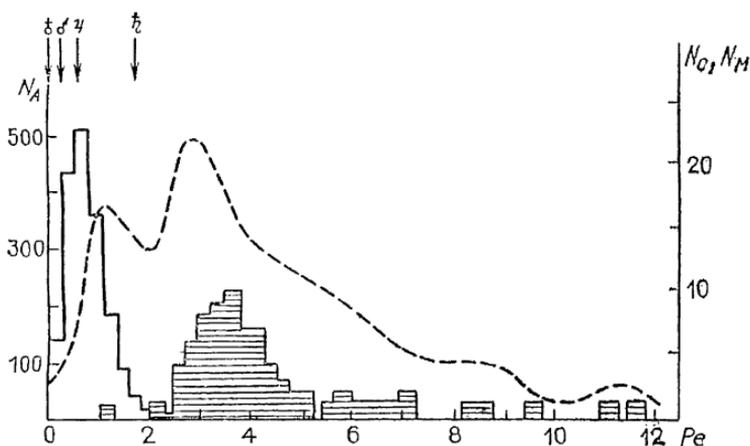


Рис. 41. Распределение орбит астероидов (сплошная линия), комет (заштрихованная область) и спорадических метеоров (штриховая линия) по Pe

проведение дальнейших однородных и больших рядов наблюдений метеоров различными методами, а также теоретические изыскания. В это дело любители астрономии могут внести значительный вклад.

§ 8. «МЕТЕОРНАЯ ОПАСНОСТЬ» ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ (КА)

В наше время искусственные спутники Земли и автоматические станции, различные космические аппараты (КА) проникли во многие отрасли человеческой деятельности. Изучение природных ресурсов и метеорология, навигация и геодезия, телевидение и связь, технология и сельское хозяйство — вот далеко не полный перечень областей, в которых применяются достижения космонавтики. Теперь с космонавтикой связаны многие стороны нашей жизни, хозяйственной деятельности и дальнейшее развитие науки. За космонавтикой большое будущее. Она открывает человечеству возможность освоения материальных и энергетических богатств Вселенной.

По мере развития космонавтики требуется все большее количество КА различного назначения. Очевидно, будут все более продолжительными и космические полеты. Возникает необходимость в надежной работе КА в течение многих лет.

До запуска первых искусственных спутников Земли (ИСЗ) и полета человека в космическое пространство серьезное беспокойство вызывал вопрос об опасности встречи ИСЗ или космического корабля с крупным метеорным телом, хотя из данных наблюдательной метеорной астрономии было известно, что вероятность такого события крайне мала.

Приведенные в предыдущих параграфах данные о плотности потока и пространственной плотности метеорных тел, а также многолетняя практика космических полетов показывают, что подавляющее большинство соударений с КА приходится на долю мельчайших частиц.

Соударение метеорной частицы с поверхностью оболочки космического аппарата сопровождается разогревом, плавлением и испарением вещества оболочки в месте удара, т. е. образованием на оболочке крохотной выбоины, глубина которой d согласно Ф. Уипплу составляет

$$d = \left(\frac{9}{\pi \delta_0 Q} \right)^{1/3} E^{1/3},$$

где δ_0 — плотность вещества оболочки, Q — энергия, затрачиваемая на удаление 1 г вещества оболочки и припи-
маемая равной теплоте его плавления, $E = \frac{Mv^2}{2}$ — кинетическая энергия метеорной частицы, имеющей массу M и скорость v .

Например, если оболочка изготовлена из алюминия, плотность которого $\delta_0 = 2,7$ г/см³, а теплота плавления $Q = 1,1 \cdot 10^{10}$ эрг/г, то

$$\lg d = 0,33 \lg E - 3,3. \quad (41)$$

Согласно этому соотношению сферическая метеорная частица радиусом ρ и плотностью $\delta = 2$ г/см³ при скорости $v = 40$ км/с на поверхности оболочки образует микрократер, глубина которого составляет

$$d \approx 20 \rho,$$

т. е. в 20 раз превышает радиус самой частицы.

Из данных о плотности потока спорадических метеорных тел следует, что если столкновение поверхности в

1 м² с частицей крупнее 1 мм может произойти в среднем один раз в несколько десятков лет, то соударение с мельчайшими частицами микронного размера происходит в миллионы и десятки миллионов раз чаще. Можно ожидать, что площадь в 1 см² космического аппарата будет получать примерно 1 удар в неделю частицы массой в 10⁻⁶ г. Подобная «бомбардировка» не повлечет за собой серьезного износа металлической оболочки космического корабля, но незащищенные поверхности зеркал и линз оптических приборов (или солнечных батарей) и других приборов под воздействием метеороидного «пескоструйного эффекта», или, иначе, метеорной эрозии, через некоторое время могут оказаться непригодными и потребуют замены. Микрометеориты представляют особую опасность для тонкоплечных наддувных конструкций.

Образование мелких царапин и кратеров на поверхности иллюминаторов орбитальных космических станций «Салют» неоднократно наблюдалось космонавтами при длительных полетах. Космонавт Г. М. Гречко рассказывает: «...В основном наши «противники» — микрометеориты, хотя и они при столкновении способны оставить следы на обшивке станции. Самый большой микрометеорит, с которым пересеклись наши пути, образовал воронку на глубину полстекла. Но у нас на станции стекла двойные, а в корабле даже тройные...» («Комсомольская правда» 25 октября 1985 г.).

Так как плотность потока спорадических метеорных тел равна $\Phi(M) = 2 \cdot 10^{-14} M^{-1,1}$ частиц/м²·с·(2π ср), то оболочку КА, имеющую эффективную поверхность S (м²), в течение суток (86 400 с) ударяется следующее число метеорных тел массивнее M :

$$\Phi = 1,73 \cdot 10^{-9} M^{-1,1} \cdot S. \quad (42)$$

Из соотношения (41) при $v=40$ км/с имеем следующую формулу для определения массы частицы M (г), пробивающей оболочку корабля толщиной d (см):

$$M = 10^{-3} d^3. \quad (43)$$

Из (42) и (43) находим число частиц $\Phi_{пр}$, пробивающих оболочку КА за сутки:

$$\Phi_{пр} = 3,5 \cdot 10^{-6} d^{-3,3} S.$$

Если предположить, что оболочка космического аппарата сделана из алюминия толщиной $d=0,5$ см, а ее пло-

щадь равна $S=100 \text{ м}^2$, то нужно ждать в среднем один пробивающий удар за 290 суток.

На рис. 42 представлена гистограмма распределения геоцентрических скоростей спорадических метеоров согласно П. Миллману. Вертикальными линиями здесь указаны

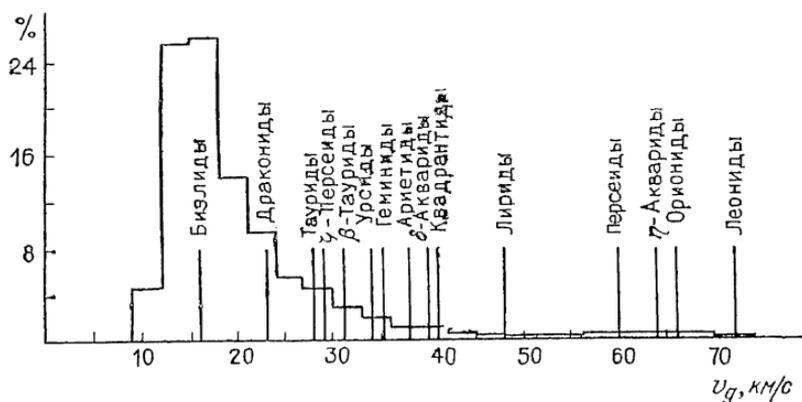


Рис. 42. Относительное распределение метеороидов по геоцентрической скорости согласно П. Миллману

средние геоцентрические скорости 15 активных метеорных потоков.

Так как энергия соударения метеорной частицы об оболочку КА пропорциональна квадрату скорости, то очевидно, что для заданной массы столкновение с метеороидом роя Леонид или δ -Акварид более эффективно, чем со спорадическим метеороидом средней скорости.

В окрестностях орбиты Земли около 98—99% метеорных тел, имеющих массы менее 100 г, имеют кометное происхождение. Поэтому данные о метеороидах астероидного происхождения в этом интервале масс являются весьма скудными. Неизвестен также закон распределения пространственной плотности метеороидов по мере продвижения от внутренних областей Солнечной системы, включающих орбиты Меркурия и Венеры, к орбитам Марса и Юпитера. Из наблюдений зодиакального света и теоретических расчетов следует, что численность мелких кометных частиц уменьшается по мере удаления от Солнца. Логично предположить, что максимальная пространственная плотность метеорных тел астероидного происхождения достигается там, где расположены орбиты подавляющего большинства астероидов, т. е. между орбитами Мар-

са и Юпитера. Полагая, что вблизи Земли отношение плотности потока астероидных и кометных метеороидов составляет 1 : 100, П. Миллман получил вероятную картину распределения пространственной плотности метеороидов на различных расстояниях от Солнца (рис. 43), которую качественно подтвердили измерения численности

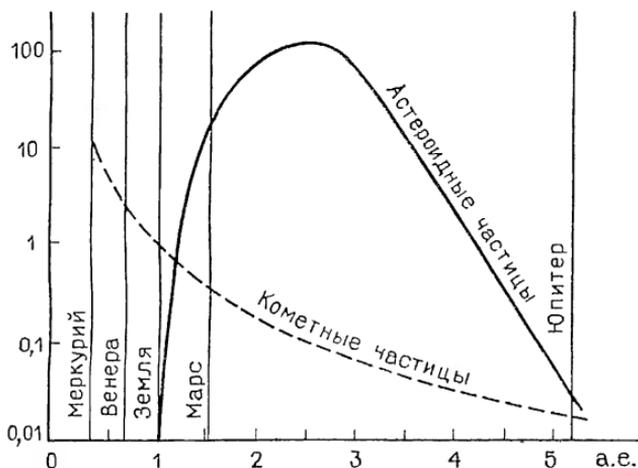


Рис. 43. Вероятное относительное распределение пространственной плотности метеороидов в зависимости от расстояния до Солнца согласно П. Миллману

соударений космического аппарата «Маринер-4» на его пути к Марсу.

Компактные облака метеорных тел, порождающие при встрече с Землей метеорные дожди, имеют довольно большие пространственные плотности, в сотни и тысячи раз превышающие среднюю пространственную плотность спорадических метеорных тел, или даже больше, если рассматривать метеороиды крупнее, чем 1 г.

Так как столкновения с метеорными частицами массивнее 0,1 г чрезвычайно редки, а защита космического аппарата от пробоев мелкими метеорными частицами относительно проста, то метеорные рои не представляют серьезной угрозы для безопасности КА. Но если возможно, необходимо избегать встреч с очень компактными участками роев, такими, как Леониды, наблюдавшиеся в 1966 г., или Дракониды в 1946 г.

К сожалению, мы ничего не знаем о метеорных роях, орбиты которых не пересекают орбиту Земли. Можно предположить, что любая комета порождает метеорный

рой, движущийся по ее орбите. Поэтому космическим кораблям по возможности следует обходить известные кометные орбиты.

Так как с увеличением длительности космических полетов вероятность встречи КА с частицами субмиллиметровых размеров увеличивается, то для защиты КА от метеороидных ударов принимаются специальные меры. Эффективной оказалась установка перед основной стенкой КА относительно тонкостенного металлического экрана — «метеороидного бампера». Метеороид, пробивая такой экран, разрушается, теряет свою скорость и для основной оболочки — стенки КА — уже не представляет опасности. П. Миллман, например, считает, что внешняя оболочка толщиной 0,05 см, расположенная на расстоянии 2 см от основной стенки толщиной 0,5 см, увеличит эффективность защиты космического корабля почти на порядок, и необходимо ожидать один пробой корабля, имеющего эффективную поверхность 1000—1500 м², через каждые 10 лет полета.

Противометеороидный экран толщиной 0,06 см из алюминия был установлен на орбитальной космической станции «Скайлэб». Подобные экраны защищали и основные отсеки космической станции «Салют-7». Эти экраны могут выполнять и другие функции, например защищать КА от перегрева, отражая потоки солнечного тепла, и от бомбардировки солнечными протонами.

Вероятность пробоя КА ударом метеороида крайне мала, но отлична от нуля. Соответствующая конструкция корабля может уменьшить вероятность его серьезного повреждения метеороидом до такой степени, что эта опасность становится ничтожно малой по сравнению с другими факторами межпланетных путешествий.

ВИЗУАЛЬНЫЕ И ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ
НАБЛЮДЕНИЯ МЕТЕОРОВ

Наблюдения метеоров представляют широкое поле деятельности для любителей астрономии. Ими был собран большой наблюдательный материал о метеорах, на основе которого выполнены ценные научные работы, внесен значительный вклад в развитие науки о метеорах. А некоторые виды наблюдений метеоров попросту и сейчас невозможно провести без участия любителей. Это, прежде всего, наблюдения болидов и поиски вероятно выпавших после них метеоритов. Визуальные наблюдения численности поточных и спорадических метеоров позволяют изучить структуру метеорных потоков и оценить приток метеорного вещества па Землю. Широкому кругу любителей астрономии доступны и некоторые простые виды фотографических наблюдений метеоров.

При визуальных наблюдениях метеоров предполагается, что наблюдатель в достаточной мере знаком с созвездиями и умеет ориентироваться на звездном небе, используя для этого звездные атласы, например, А. А. Михайлова. Для визуальных наблюдений метеоров требуется также знание блеска звезд. Удобны для этой цели копии звездных карт, на которых около каждой звезды указаны ее звездная величина и цвет. Для телескопических наблюдений метеоров необходимы карты, содержащие звезды до 8—10-й звездной величины, например большой атлас А. А. Михайлова или атлас Бечваржа.

Приведем звездные величины некоторых светил, знание которых полезно для начинающего наблюдателя:

Солнце	— 27,8
Луна в полнолунии	— 12,6
Луна в I и III четверти	— 9
Венера	— 3— —4
Юпитер	— 2,5
Сириус	— 1,5
Капелла, Вега, Арктур	0
Альдебаран, Спика	1

α Большой Медведицы	2
α Андромеды	2
Полярная звезда	2,5
μ Большой Медведицы, γ Персея,	
ζ Большого Пса	3
ι Персея, ρ Лебеда, ι Пегаса	4

Самые слабые звезды, видимые невооруженным глазом в безлунную ночь около зенита, имеют 6-ю звездную величину.

Визуальные и простые фотографические наблюдения метеоров, проведенные любителями астрономии со скромным оборудованием, имеют научное значение, если они проведены по заранее продуманной программе и методике с целью решения конкретной задачи. К таким наблюдениям относятся многократный счет метеоров, базисное фотографирование и спектрографирование метеоров. Особую ценность имеют систематические однородные наблюдения, проведенные коллективно в течение продолжительных периодов времени.

Большое значение для успешных наблюдений имеет место их проведения и оборудование наблюдательной площадки. Современные города являются источником сильного рассеянного освещения. Поэтому большинство астрономических наблюдений, в том числе метеорных, невозможно проводить в черте города. Наблюдательный пункт должен быть выбран желательнее подальше от города, вдали от источников сильного освещения. Если проводятся базисные наблюдения, то второй корреспондирующий пункт выбирается на расстоянии 30—40 км от основного. Основной пункт должен быть оборудован рамками для счета метеоров, топчанами, спальными мешками и матрацами для наблюдателей и, по возможности, биноклярными трубками со штативами для наблюдений слабых метеоров и метеорных следов, установками для фотографических наблюдений. Необходимо иметь звездные карты и радиоприемник для проверки часов по сигналам точного времени. Одежда наблюдателей должна быть достаточно теплой, по сезону, и удобной для наблюдений.

§ 1. ВИЗУАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ МЕТЕОРОВ

По визуальным наблюдениям метеоров ярче +5-й звездной величины или ярче +8—9-й звездной величины с помощью небольших оптических приборов (бинокли и др.) можно решать ряд интересных задач.

К первой группе задач относятся определение функции светимости метеоров и распределение метеорных тел по массам, изучение суточной и сезонной вариации численности метеоров, пространственной плотности метеорных тел, притока метеорного вещества на Землю и т. д. Эта группа вопросов решается с помощью так называемого многократного (или квалифицированного) счета метеоров.

Вторую группу задач составляют поиск и подтверждение теоретических кометных радиантов, определение положения и смещения радиантов слабых потоков, выявление новых радиантов и определение степени активности исчезающих потоков. Эти задачи требуют нанесения путей метеоров на карты звездного неба в гномонической (центральной) проекции для определения координат радиантов графическим путем.

Многократный счет метеоров проводится группой из четырех—семи человек, один из которых выполняет обязанности секретаря. Группа наблюдает за околозенитной областью неба диаметром около 60° и регистрирует все метеоры, появляющиеся в этой области. Счет метеоров ведется через круглые рамки, установленные над головой каждого наблюдателя на такой высоте, чтобы диаметр поля зрения составлял 60° , а центры кругов проецировались в зенит. В качестве круглых рамок можно использовать гимнастические обручи. Наблюдатели располагаются параллельно друг другу, головой под своим кругом так, чтобы каждый наблюдал одну и ту же область неба, ограниченную обручем (рис. 44).

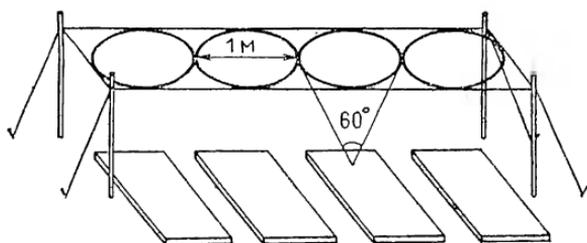


Рис. 44. Положение рамок для квалифицированного счета метеоров

Порядок проведения многократного счета метеоров приблизительно такой. При появлении метеора в ограниченной рамкой области неба наблюдатель сообщает секретарю голосом или нажатием кнопки специального электрического сигнала, что он заметил метеор. Секретарь,

варегистрировав момент пролета метеора по часам с точностью до 1 мин, отмечает в журнале, какими наблюдателями замечен метеор (например, по вспышке лампочки под соответствующим номером наблюдателя на табло), и сообщает наблюдателям номер метеора. Каждый, кто заметил этот метеор («вслепую», не отрывая глаз от неба), на полоске бумаги, сложенной гармошкой, рядом с номером, сообщенным секретарем, записывает следующие данные:

1. Максимальную звездную величину m метеора (с точностью до 0,5 звездной величины), которая оценивается путем сравнения с находящимися близко звездами. Средний блеск метеора m определяется по данным большинства наблюдателей.

2. Направление полета метеора, определяемое по правилу «циферблата». За 0 часов (или 12^ч) принимается направление к северу, 3^ч— к востоку, 6^ч— к югу, 9^ч— к западу и т. п. Если метеор пролетит через зенит, то его направление определяется сразу же. В других случаях направление полета метеора определяется путем мысленного параллельного снесения его к зениту.

3. Положение метеора относительно рамки: если видимый путь метеора полностью помещился в контролируемой части неба, то он отмечается метками (+ +); если начало пути метеора находится вне, а конец внутри круга, то (— +); если начало пути внутри круга, а конец вне круга, то (+ —); если метеор пересек весь круг и его начало и конец пути лежат вне круга, то (— —) (рис. 45).

4. Принадлежность метеора к потоку отмечается буквой (например, Г — геминид). Метеор спорадического фона отмечается буквой «с».

Принадлежность метеора к потоку определяется по направлению полета метеора. При действии известного потока необходимо знать положение его радианта на небе в данный момент и характерные особенности метеоров этого потока. Метеоры, принадлежащие одному и тому же потоку, имеют близкие физические свойства, что проявляется в их цвете и очерченности.

Для определения принадлежности метеора к потоку необходимо иметь достаточный опыт определения радиантов из наблюдений разных потоков.

Принадлежность метеора к потоку может быть сообщена наблюдателями секретарю поочередно после пролета каждого метеора, если позволяет промежуток времени до полета следующего метеора.

Если численность метеоров очень большая, что случается при пике активности некоторых потоков, то регистрации подлежат только блеск и принадлежность метеора. При необходимости уменьшается площадь наблюдаемой области неба, например до диаметра 30° .

5. Зенитное расстояние z середины метеора, если наблюдается не околозенитная область неба.

При возможности, кроме перечисленных данных, желательно регистрировать следующие параметры метеора:

6. Угловую скорость ω по числовой шкале: 1 — мгновенный, очень быстрый, 2 — быстрый, 3 — средний, 4 — медленный, 5 — очень медленный, стационарный.

7. Цвет метеора: к — красный, о — оранжевый, ж — желтый, з — зеленый, г — голубой, с — синий, б — белый, ф — фиолетовый.

8. Угловую длину l в градусах, которая оценивается путем сравнения с угловыми расстояниями между известными звездами. Например, угловое расстояние между звездами α и β Большой Медведицы равно $5,5^\circ$ и т. д.

9. Продолжительность полета метеора t в секундах и их долях. Для оценки этой величины наблюдателю необходимо предварительно тренироваться в отсчете малых промежутков времени.

10. Особенности метеора (вспышки, распад на части, след) указываются в примечании.

При многократном счете метеоров очень важно точно регистрировать моменты начала и конца каждого интервала наблюдений и перерывов для отдыха. Обычно наблюдения проводятся непрерывно в течение 50 или 60 мин, после чего делается перерыв на 10—15 минут.

Если позволяют условия наблюдений (отсутствии облачности, лунного освещения), то общее время наблюдений в течение одной ночи должно составлять не менее 2—3 часов. Очевидно, наблюдения метеорного потока будут наиболее эффективными в часы, близкие к времени кульминации его радианта.

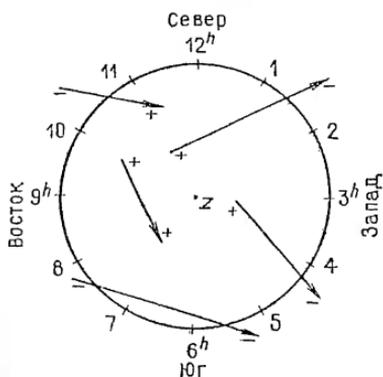


Рис. 45. Определение положения и направлений полета метеоров относительно проекции рамки на небесную сферу

Предварительная обработка наблюдений, если их объем невелик, должна быть проведена сразу же после наблюдений или же на следующий день. Данные всех наблюдателей аккуратно заносятся в журнал многократного счета метеоров, в которых непременно указываются следующие общие данные:

1. Дата наблюдений; год, месяц, число.
2. Моменты начала и конца наблюдений (с указанием перерывов и по какому времени — всемирному, московскому или местному декретному).
3. Поправка часов по сигналам точного времени («+», если часы отстают, и «-», если часы спешат).
4. Место наблюдений (точное название, географические координаты: широта φ и долгота λ , высота над уровнем моря).

5. Фамилии, имена, отчества наблюдателей, их адреса и обозначения.

6. Данные о рамках: диаметр, высота, поле зрения.

7. Предельная звездная величина видимых в зените звезд (отмечается для каждого часового интервала наблюдений).

8. Условия наблюдения (наличие постороннего освещения, дымки и облачности на небе) и их изменения.

9. Состояние наблюдателей (бодрое, усталое и т. д.).

Результаты наблюдений должны быть внесены в таблицу А, форма которой приводится ниже.

Обработка полученного наблюдательного материала может быть проведена самостоятельно или под руководством специалиста.

Первичной задачей обработки многократного счета метеоров является определение полного числа метеоров каждой звездной величины (например, 2-й — от $+1,5^m$ до $+2,5^m$, 3-й — от $2,5^m$ до $3,5^m$ и т. д.), появившихся за определенный интервал времени на патрулируемом участке неба.

Один наблюдатель не в состоянии заметить все метеоры, пролетающие в поле его зрения. Способность наблюдателя замечать метеоры понижается по мере перехода к более слабым метеорам и от центра к периферии observable области неба.

Для определения полного числа N_m метеоров каждой звездной величины m , появившихся за определенный интервал времени на ограниченном участке неба, необходимо учесть коэффициент замечаемости метеоров.

Коэффициент замечаемости метеоров, выражающий отношение числа зарегистрированных метеоров ко всем

появившимся в данной области, больше для группы наблюдателей, чем для индивидуального наблюдателя. Многолетний опыт наблюдателей Московского отделения ВАГО показывает, что без существенного ущерба для результатов обработки наблюдений можно принять коэффициент внимания у всех наблюдателей одинаковым, но различным для разных звездных величин. В табл. 14 приведены результаты определения коэффициента замечаемости метеоров для разных звездных величин при наблюдении области неба диаметром $60-70^\circ$ для одного наблюдателя в среднем и группы из шести наблюдателей по данным В. В. Мартыненко (Крымское отделение ВАГО).

Из этой таблицы видно, что группа наблюдателей регистрирует все метеоры ярче 2-й звездной величины, 98% метеоров +3-й величины, 83% — +4-й величины и 16% — +5-й величины.

И. Т. Зоткин предлагает следующий способ определения N_m . Пусть $n_1, n_2, n_3, \dots, n_k$ — числа метеоров звездной величины m , замеченных каждым наблюдателем, а S — число физически различных метеоров звездной величины m , замеченных всей группой из k наблюдателей. Тогда полное число метеоров N_m звездной величины m в наблюдаемой области неба находится из уравнения

$$(N_m - S) N_m^{k-1} = (N_m - n_1)(N_m - n_2) \dots (N_m - n_k),$$

которое решается путем подбора с помощью микрокалькулятора.

Определить полное число метеоров можно и с использованием формулы З. Квиза и вспомогательных таблиц, составленных Р. Л. Хотинком (табл. III приложения). Предположим, что коэффициент замечаемости p у всех наблюдателей одинаков. Тогда групповой коэффициент замечаемости η равен

$$\eta = 1 - (1-p)^k,$$

где k — число наблюдателей.

Если $z = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_k$, где n_1, n_2, \dots, n_k — число метеоров звездной величины m , замеченных каждым наблюдателем за время t , а S — число физически различных метеоров m величины, замеченных группой, то полное число метеоров звездной величины m определяется по формуле

$$N_m = \frac{z}{kp} \quad \text{или} \quad N_m = \frac{S}{\eta}, \quad (44)$$

Таблица А

Номер	Момент пролета	Наблюдатели и их оценки блеска			m	Направление	Положение	Принадл. к потоку	Z	φ	Цвет	l	t	Примечания
		Е. О.	К. Н.	В. Г.										
1	22 ^ч 01 ^м	2,0	1,5	2,5	2,0	3	+	с	25	3	б	11	0,3	Вспышка
2	22 13	—	3,0	2,5	3,0	11	+	г	0	2	о	15	0,4	

Таблица 14

Коэффициент замечаемости метеоров

Блеск метеора (m)	-1,0 m	0,0 m	+1,0 m	+2,0 m	+3,0 m	+4,0 m	+5,0 m
	Коэффициент замечаемости { одного наблюдателя группы из шести наблюдателей	1,00	0,98	0,80	0,62	0,43	0,25
1,00		1,00	1,00	1,00	0,98	0,83	0,46

откуда следует формула Квиза

$$\frac{S}{z} = \frac{\eta}{kp} = \frac{1 - (1-p)^k}{kp}.$$

Таблица III приложения позволяет по наблюдаемому значению $\frac{S}{z}$ и известному k легко найти значение индивидуального p и группового η — коэффициентов замечаемости, а следовательно, и полное число метеоров изучаемого потока или спорадического фона для каждой звездной величины и для каждого часа наблюдений.

Численность метеоров обычно характеризуется исправленным за коэффициент внимания числом метеоров, замечаемых невооруженным глазом одним наблюдателем за час.

Приведем пример определения коэффициентов внимания p и η и истинного числа метеоров.

Пусть пять наблюдателей за ночь отметили 66 метеоров +3-й звездной величины, из которых 51 метеор принадлежал изучаемому потоку Геминид, а остальные 15 — спорадические. При этом $n_1=29$, $n_2=23$, $n_3=21$, $n_4=34$ и $n_5=33$. Необходимо определить коэффициенты внимания p и η , а также истинное число метеоров 3-й величины потока и спорадического фона.

Из условий задачи $k=5$, $S=66$ и $z=140$ имеем $\frac{S}{z} = 0,4714$. Из таблицы III приложения в столбце $k=5$ находим ближайшее к $\frac{S}{z} = 0,4714$ значение $\frac{S}{z} = 0,4695$ и соответствующие ему $\eta=0,9155$ и $p=0,39$.

Пользуясь этими значениями, найдем полное число метеоров +3-й величины по формулам (43):

$$N_3 = \frac{140}{5 \cdot 0,39} = 72,$$

или

$$N_3 = \frac{66}{0,9155} = 72,$$

т. е. группа из пяти наблюдателей отметила 92% метеоров +3-й величины. Истинное число метеоров +3-й звездной величины потока Геминид будет

$$N_3 = \frac{51}{0,9155} = 56,$$

а истинное число спорадических метеоров

$$N_s = \frac{15}{0,9155} = 16.$$

Аналогичные вычисления проводятся для определения истинного числа метеоров и других звездных величин.

Число метеоров изучаемого потока, пролетающих в поле зрения наблюдателя, зависит от высоты радианта потока над горизонтом, которая меняется в течение ночи. Поэтому полное число метеоров потока может быть получено путем деления истинного числа метеоров, т. е. исправленного за коэффициент внимания, на косинус зенитного расстояния радианта.

Полное число метеоров различных звездных величин позволяет определить функцию светимости наблюдаемого потока (или спорадического фона).

Определение функции светимости метеоров иллюстрирует следующий пример. По визуальным наблюдениям было получено распределение метеоров потока Персеид по звездным величинам. В табл. 15 приведены $N_{\text{набл.}}$ — наблюдаемые, N_m — исправленные за замечаемость (коэффициент η табл. 14) числа метеоров каждой звездной величины, $F(m)$ — число метеоров m -й звездной величины и ярче и $\lg F(m)$.

Если отложить логарифмы $F(m)$ в функции m (рис. 46), то получится прямая, наклон которой определяет κ .

Для нашего примера получим $\lg F(0) = 1,30$, или $F(0) = 20$, и $\lg \kappa = 0,28$, или $\kappa = 1,9$, т. е. функция светимости метеоров потока Персеид имеет вид

$$F(m) = 20\kappa^m.$$

Полученный результат показывает, что в рассматриваемом

Таблица 15

Определение функции светимости метеоров потока Персеид

m	$< 0^m$	0^m	$+1^m$	$+2^m$	$+3^m$	$+4^m$	$+5^m$
$N_{\text{набл}}$	9	11	20	39	46	104	35
N_m	9	11	20	39	47	125	217
$F(m)$	—	20	40	79	126	251	468
$\lg F(m)$	—	1,30	1,60	1,90	2,10	2,40	2,67

случае число метеоров при переходе от одной звездной величины к другой изменяется в $\kappa=1,9$ раза, а показатель закона распределения метеорных тел по массам $s=1,7$.

Наблюдения метеорных потоков, проведенные различными группами наблюдателей одновременно в разных пунктах нашей страны, удаленных друг от друга на большие расстояния по долготе, позволяют детально изучать структуру метеорных роев. Большой вклад в решение этой задачи могут внести любители астрономии.

Наблюдения радиантов.

Визуальные наблюдения метеоров проводятся как для поисков новых или теоретически предсказанных кометных радиантов, так и для определения положения и смещения радиантов малых метеорных потоков, часовые числа которых незначительны и составляют всего два-

три метеора в час. Они проводятся также для изучения активности исчезающих потоков. Эти задачи могут быть решены нанесением путей метеоров на звездные карты. Определение радиантов требует предварительной тренировки на богатых яркими метеорами потоках, таких, как Персеиды, Геминиды, Квадрантиды, Лириды.

Для определения радиантов по визуальным наблюдениям необходимы копии карт звездного неба, часы, карандаш, фонарик для освещения (его яркость должна быть сильно ослаблена цветным светофильтром), журнал для записи данных наблюдений метеоров и линейка.

В зависимости от положения наблюдаемой области неба (околозенитная или иная) наблюдатель принимает удобное положение (лежа или полусидя на топчане или в шезлонге, кресле с наклонной спинкой). Задача сводится к тому, чтобы по возможности точнее нанести видимые пути метеоров на карту.

Приступая к наблюдению избранной области неба, необходимо отметить время начала наблюдения в журнале. В ожидании полета метеора наблюдатель обзревает область неба блуждающим взглядом. После пролета метеора необходимо как можно точнее запомнить его путь среди звезд. Для этого рекомендуется пользоваться линейкой,

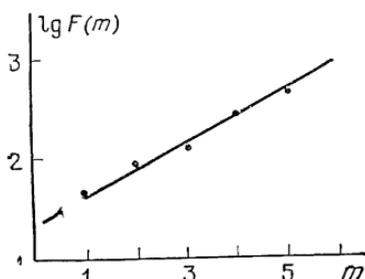


Рис. 46. Интегральная функция светимости метеорного потока Персеид

которую нужно держать на вытянутой руке, располагая ее вдоль линии полета метеора. После этого видимый путь метеора наносится карандашом на карту в виде стрелки, указывающей направление полета, и около нее ставится номер метеора (рис. 47). В журнале наблюдений записываются следующие данные: номер и момент пролета метеора с точностью до минуты, звездная величина метеора с точностью до $0,5^m$, угловая длина в градусах, цвет.

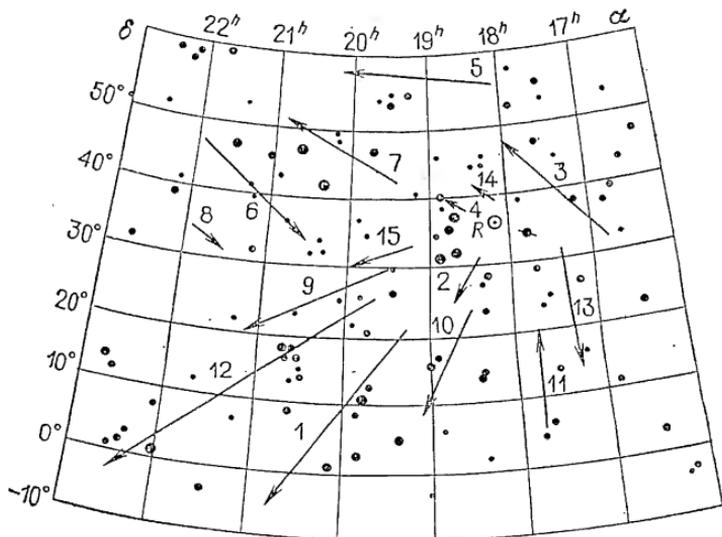


Рис. 47. Нанесение путей метеоров на карту звездного неба для определения координат радианта

Для определения радианта прежде всего снимаем с карт экваториальные координаты начала (α_n, δ_n) и конца (α_k, δ_k) видимого пути каждого метеора.

Путь метеора среди звезд является отрезком большого круга небесной сферы. Большим кругом небесной сферы называют круг, образованный пересечением любой плоскости, проходящей через наблюдателя, с небесной сферой. Полусом большого круга называется точка, которая отстоит от любой точки этого круга на 90° . Например, горизонтальная плоскость пересекает небесную сферу по большому кругу, полюсом которого является точка зенита.

Координаты полюса большого метеорного круга (α_n, δ_n) могут быть вычислены по известным (α_n, δ_n) и (α_k, δ_k)

с помощью формул

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg} \alpha_{\Pi} &= \frac{\sin \alpha_{\text{H}} \operatorname{ctg} \delta_{\text{H}} - \sin \alpha_{\text{K}} \operatorname{ctg} \delta_{\text{K}}}{\cos \alpha_{\text{H}} \operatorname{ctg} \delta_{\text{H}} - \cos \alpha_{\text{K}} \operatorname{ctg} \delta_{\text{K}}}, \\ \operatorname{tg} \delta_{\Pi} &= -\operatorname{ctg} \delta_{\text{H}} \cos(\alpha_{\Pi} - \alpha_{\text{H}}) = -\operatorname{ctg} \delta_{\text{K}} \cos(\alpha_{\Pi} - \alpha_{\text{K}}). \end{aligned} \quad (45)$$

Если за время наблюдений на звездную карту были нанесены пути хотя бы двух поточных метеоров, то координаты радианта метеорного потока (α_R, δ_R) определяются по тем же формулам, что и координаты полюса, но в формулах (45) вместо координат начал и концов метеоров необходимо подставить полученные координаты полюсов больших кругов каждой пары метеоров. Полученные по каждой паре метеоров координаты радианта наносятся на карту, и находится среднее значение (α_R, δ_R) .

Радант считается реальным, если он определен по наблюдениям не менее трех метеоров, наблюдавшихся в течение одной ночи. Следует иметь в виду, что для метеоров, принадлежащих данному потоку, отношение угловой длины метеора l к угловому расстоянию начала видимого пути метеора от радианта ψ приблизительно постоянно ($l/\psi \approx \text{const}$) и, как правило, меньше единицы. Точность определения положения радианта сильно зависит от тренированности и опыта наблюдателя.

Радант индивидуального метеора можно определить по наблюдениям из двух пунктов, удаленных друг от друга на достаточное расстояние. Из-за параллактического смещения путь метеора среди звезд, видимый из разных пунктов, будет различным и у него будут различающиеся полюсы больших кругов. Радант находится по этим полюсам с помощью тех же формул (45).

Если блеск метеора определяется не путем сравнения с блеском ближайших звезд, то необходимо учесть поправку за поглощение атмосферы, которая зависит от прозрачности атмосферы и зенитного расстояния Z метеора. Эта поправка равна $\Delta m = -0,2(\sec Z - 1)$. Опытные наблюдатели оценивают блеск метеора с погрешностью до 0,2–0,3^m.

Продолжительные наблюдения в течение четырех-шести часов одной ночи более целесообразны, чем один-два часа в течение нескольких ночей. Во время наблюдений необходимы регулярные перерывы для отдыха на 10–15 мин.

Определение суточного смещения положения радианта метеорного потока, происходящего вследствие движения Земли по своей орбите, проводится по наблюдениям пото-

ка в течение нескольких ночей. Подобные наблюдения позволяют, кроме того, детально исследовать и структуру потока.

По результатам определения радиантов составляется каталог, который должен содержать дату, координаты радианта, часовые числа метеоров и их изменение (если наблюдения проводятся в течение нескольких ночей), суточное смещение радианта, продолжительность действия потока.

Наблюдения телескопических метеоров (телеметеоров). К визуальным относятся и наблюдения более слабых ($m \geq 6$) метеоров, проводимые с помощью оптических средств — телескопов типа кометоискателей, биноклей с более чем шестикратным увеличением, бинокляров «Асемби», трубок АТ-1 и т. п., имеющих достаточно большое поле зрения и большую светосилу. Метеоры, наблюдаемые визуально с помощью оптических средств, часто называют телеметеорами.

Наблюдения слабых метеоров с помощью бинокля или телескопа проводятся как для определения радианта потока и его суточного смещения, так и для квалифицированного счета. При наблюдениях с биноклем необходимо пользоваться атласом и картами такого масштаба, чтобы они были приблизительно одинаковы с наблюдаемым масштабом звездного неба. Большой звездный атлас А. А. Михайлова и «Атлас неба» А. Бечваржа зарекомендовали себя как самые удобные при подобных наблюдениях.

Основными задачами наблюдений телеметеоров могут быть следующие:

а) определение численности и функции светимости метеорных потоков и спорадического фона;

б) определение суточных и сезонных вариаций численности телеметеоров для различных участков небесной сферы;

в) определение радиантов; отметим, что телескопические наблюдения позволяют определить положение метеоров и радиантов метеорных потоков на небе точнее, чем обычные визуальные наблюдения.

Качественное выполнение перечисленных задач требует групповых наблюдений.

Необходимо подчеркнуть, что для наблюдений телеметеоров необходимо больше терпения и усидчивости, так как из-за малости поля зрения применяемого инструмента часовые числа метеоров могут быть очень небольшими

(3—4 для спорадических метеоров и 5—10 в период действия главных потоков).

Предельная величина звезд, видимых визуально с помощью оптического прибора, зависит от диаметра объектива D и определяется по формуле

$$m=2,1+5 \lg D,$$

где D измеряется в мм. Предельная звездная величина метеоров, наблюдаемых в телескоп, в среднем меньше на 2^m и определяется по формуле

$$m=5 \lg D.$$

Следовательно, с помощью морского призмного бинокля ($D=50$ мм) можно наблюдать метеоры до 8—9^m, т. е. почти в 40 раз слабее, чем невооруженным глазом.

В журнале наблюдений телеметеоров записываются те же характеристики метеоров, что и при квалифицированном счете метеоров и при обычных визуальных определениях радиантов. Однако при телескопических наблюдениях оценка угловой длины метеоров l производится в десятых долях диаметра поля зрения инструмента. Если диаметр поля зрения инструмента выражен в градусах, то угловая длина метеора также оценивается в градусах. При наблюдениях телеметеоров необходимо учитывать, какое изображение дает применяемый инструмент: прямое, обратное или зеркальное.

§ 2. ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ МЕТЕОРОВ

Фотографические наблюдения являются одним из важных методов изучения метеоров. Они дают наибольший объем информации о каждом метеоре: положение, скорость и звездную величину в любой точке видимой траектории.

Фотографирование метеоров может быть проведено практически любым фотоаппаратом. Малыми камерами обычно фотографируются яркие метеоры — болиды, имеющие значительные линейные размеры. Поэтому эффективность их фотографирования пропорциональна D^2/F^2 , где D — диаметр объектива, а F — его фокусное расстояние. Вероятность фотографирования метеоров увеличивается при использовании фотокамер со светосильными объективами (относительные отверстия более 1:2,8) и при применении фотопленки высокой чувствительности (250 ед. ГОСТ и более). Отметим, что освещенность E (в люксах),

создаваемая метеором на площадке, перпендикулярной его лучам, связана со звездной величиной метеора m соотношением

$$E = 10^{-6} \cdot 2,512^{1-m},$$

которое может быть использовано при выборе объектива и фотопленки. Желательно, чтобы объективы для съемок метеоров имели достаточно широкое поле зрения — не менее $30-40^\circ$. Длиннофокусные камеры позволяют получать многоинформативные фотографии метеоров, по которым можно судить о физических особенностях метеорных тел и процессах их взаимодействия с земной атмосферой.

При достаточно темном небе продолжительность экспозиции может составлять $30-60$ мин. Фотографировать лучше всего область неба с центром, имеющим зенитное расстояние $30-40^\circ$. Тогда обозреваемая площадь в метеорной зоне, а следовательно, и количество регистрируемых метеоров, будет в несколько раз больше, чем при фотографировании околоразенитной области. Фотографирование области неба около горизонта малоэффективно, так как наблюдаемые там метеоры очень далеки и поэтому очень слабы. При фотографировании поточных метеоров необходимо нацеливать фотоаппарат на область неба, находящуюся на расстоянии $20-30^\circ$ от радианта, так как околорадиантные метеоры очень короткие и их фотографические изображения могут затеряться среди суточных следов звезд, а метеоры, слишком далекие от радианта, хотя и имеют длинный видимый путь, очень быстры, и следовательно, их фотографические изображения будут очень слабыми.

При фотографировании метеоров существенным является не только число сфотографированных метеоров, но и качество их изображения, а также масштаб.

Для решения многих задач метеорной астрономии — таких, как получение точной информации об атмосферной траектории, высотах, скорости, торможении, радианте, массе и орбите метеорного тела — наиболее ценными являются базисные фотографические наблюдения, когда фотографирование метеоров проводится одновременно из двух пунктов, удаленных друг от друга. Расстояние между пунктами не должно быть слишком мало, так как в этом случае точность определения параллакса метеора снижается, а следовательно, и параметры метеора (расстояние, высоты, скорости, радиант) определяются с большей погрешностью. Но оно не должно быть и слишком

ком велико, так как метеор, находящийся в поле зрения камеры одного наблюдателя, может оказаться частично или полностью вне поля зрения другого. Оптимальным является расстояние между пунктами в 30—40 км. Это расстояние и его азимут должны быть точно измерены методами геодезии. На обоих пунктах камеры должны быть ориентированы так, чтобы они фотографировали одну и ту же область на высоте 80—100 км. Необходима одновременность начала и конца экспозиций на обоих пунктах, что обеспечивается заранее составленным расписанием наблюдений.

Для определения скорости метеора в одном из пунктов перед объективом камеры устанавливается специальный затвор — обтюратор. Обтюратор представляет собой диск с вырезами или лопасти, вращаемые электродвигателем (лучше синхронным) с определенной скоростью и периодически (несколько десятков раз в секунду) закрывающие объектив.

Очень важно обеспечить постоянство скорости вращения обтюлятора. Необходимо в течение экспозиции контролировать скорость вращения обтюлятора, например, с помощью счетчика оборотов, присоединяемого к валу обтюлятора через редуктор. В течение экспозиции показания счетчика снимаются и записываются в журнале наблюдений либо регистрируются на хронографе.

С целью повышения точности обработки метеорных снимков во время экспозиции через каждые 15—20 минут объективы камер перекрываются на 10—30 секунд специальной заслонкой или листом картона. Моменты открытия и закрытия объектива (в начале и конце экспозиции, а также во время экспозиции) должны тщательно регистрироваться по часам с возможно большей точностью. В результате перекрытия объективов на суточных следах звезд получают перерывы — «марки времени», которые служат опорными точками при измерении и обработке метеорных снимков (фото II). Наблюдатель должен как можно точнее регистрировать моменты появления ярких метеоров, пролетающих в поле зрения камеры (или камер). Момент пролета каждого яркого метеора, приблизительное его положение среди звезд и блеск записываются в журнале наблюдений.

Если на одном из пунктов фотографирование производится сразу двумя камерами, одна из которых установлена неподвижно, а другая на параллактической монтировке с часовым механизмом, то сочетание обработки фотографий

метеора, полученных с помощью этих камер, также обеспечивает довольно надежное определение момента пролета метеора.

Для обработки метеорных снимков, полученных с двух пунктов, необходимо знать долготу и широту обоих пунктов.

При обработке метеорных снимков можно руководствоваться методикой, изложенной в литературе, указанной в конце книги, либо обращаться за помощью в специальные научные учреждения, адреса которых приведены в приложении.

§ 3. СПЕКТРОГРАФИРОВАНИЕ МЕТЕОРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИН ВОЛН СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Получение фотографий метеорных спектров также является одной из интереснейших областей деятельности любителей астрономии. Каждый метеорный спектр имеет большую научную ценность, так как, обрабатывая его, можно получить информацию о химическом составе вторгнувшегося в земную атмосферу космического тела и о природе свечения его вещества.

Для получения спектра метеора необходима объективная призма или дифракционная решетка, устанавливаемая перед объективом широкоугольной камеры, имеющей большое относительное отверстие. Желательно, чтобы фокусное расстояние объектива было не менее 15 см, а поле зрения $30 \times 30^\circ$. Для увеличения шанса фотографирования спектра метеора можно использовать и агрегаты из 4—5 камер, покрывающих соответственно большую площадь неба.

Объективная призма должна полностью перекрывать весь объектив камеры и иметь преломляющий угол около $30-45^\circ$. При меньших преломляющих углах дисперсия будет очень мала, а при значительно больших из-за чрезмерной потери света вследствие поглощения и отражения яркость будет сильно ослаблена и уменьшается вероятность получения спектра метеора.

Установка призмы перед объективом производится так, чтобы для оптической оси камеры соблюдалось условие угла наименьшего отклонения.

Фокусировка спектрографа должна быть произведена довольно тщательно путем фотографирования спектров ярких звезд. Камеру ориентируют так, чтобы преломляющее ребро призмы было параллельно направлению суточного движения звезд.

Качество спектра будет хорошим, если направление полета метеора параллельно преломляющему ребру призмы и направление дисперсии перпендикулярно к линии полета метеора. Поэтому для получения спектра поточных метеоров камера ориентируется таким образом, чтобы направление дисперсии спектра стало перпендикулярно к линии, соединяющей центр поля зрения и радиант.

В последние годы для фотографирования спектров метеоров все большее применение находят дифракционные решетки с числом штрихов 80—400 на мм, рассчитанные таким образом, чтобы максимальное количество света концентрировалось в спектре первого порядка. По сравнению с призмой решетка имеет преимущество: одновременно со спектром она позволяет получить прямое изображение метеора и дает большую дисперсию. Спектры, полученные с помощью дифракционных решеток, имеют большее число линий.

Чувствительность спектрографической камеры в среднем на две звездные величины слабее, чем у той же самой камеры без призмы или решетки. Это происходит главным образом из-за разделения света между монохроматическими изображениями метеора: на спектре метеора мы видим совокупность его параллельных монохроматических изображений.

Получив снимок метеорного спектра, можно приступить к определению длин волн спектральных линий. Для этого пользуются теми же методами, что и при отождествлении линий обычных спектрограмм.

Одним из простейших методов определения длин волн линий метеорного спектра является графический. Прежде всего на негативе выбирают спектры звезд, расположенные по возможности ближе к спектру метеора. Лучше выбрать звезды спектрального класса А, так как в их спектрах можно легко отождествить линии водородных серий Бальмера и при некотором опыте, даже без помощи атласов звездных спектров. Сначала устанавливают на столике измерительного прибора фотопленку со спектром (зажатую между двумя стеклами) так, чтобы одна из осей прибора совпала с направлением дисперсии. Затем измеряют расстояния между отождествленными спектральными линиями. По измерениям и известным длинам волн отождествленных линий спектра звезды строятся дисперсионная кривая: длины волн спектральных линий наносятся на график в зависимости от отсчетов измерительного прибора. Затем измеряют спектр метеора, сначала отыскав на нем

известные линии H и K ионизованного кальция или дублета натрия. Приняв одну из этих линий, для которой отсчет равен нулю, за начало координат, определяют расстояния (отсчеты) до всех других линий. Если, например, линия H ионизованного кальция в спектре метеора принята за нуль, а в спектре звезды сравнения та же линия имеет отсчет n_1 , то какая-либо линия в спектре метеора с отсчетом n в системе отсчета, в которой построена дисперсионная кривая, будет иметь отсчет $n_2 = n_1 + n$. По этому отсчету n_2 из дисперсионной кривой определяется длина волны линии метеорного спектра. Аналогично определяются длины волн и всех других измеренных линий метеорного спектра.

После определения длин волн линий метеорного спектра необходимо их отождествить с известными линиями химических элементов. Для этой цели можно пользоваться «Таблицами спектральных линий» А. И. Зайделя.

Другой способ определения длин волн линий метеорного спектра заключается в использовании вместо графика дисперсионной кривой формулы

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{C}{k - n},$$

где постоянные λ_0 , C и k могут быть легко вычислены по измерениям трех линий спектра звезды или метеора с известными длинами волн. Так, если эти линии имеют длины волн λ_1 , λ_2 и λ_3 и соответствующие отсчеты n_1 , n_2 и n_3 , то

$$\lambda_0 = \frac{\frac{n_1}{n_3} (\lambda_2 - \lambda_3) - (\lambda_2 - \lambda_1) \lambda_3}{\frac{n_1}{n_3} (\lambda_2 - \lambda_3) - (\lambda_2 - \lambda_1)},$$

$$k = \frac{-n_1}{\frac{\lambda_2 - \lambda_0}{\lambda_1 - \lambda_0} - 1} = \frac{-n_3}{\frac{\lambda_2 - \lambda_0}{\lambda_3 - \lambda_0}},$$

$$C = (\lambda_1 - \lambda_0) (n_0 - n_1) = (\lambda_2 - \lambda_0) (n_0 - n_2) = (\lambda_3 - \lambda_0) (n_0 - n_3).$$

Если спектр получен с помощью дифракционной решетки, то, учитывая медленное изменение дисперсии вдоль спектра, для определения длин волн измеренных линий можно использовать простую интерполяционную формулу

$$\lambda = \lambda_1 + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{n_2 - n_1} (n - n_1),$$

где λ_1 , λ_2 и n_1 , n_2 — соответственно длины волн и отсчеты

известных линий спектра метеора, а n — отсчеты неизвестных линий.

Для длинных участков дифракционных спектров рекомендуется пользоваться формулой

$$\lambda = \lambda_1 + a(n - n_1) + b(n - n_1)^2,$$

где постоянные a и b должны быть заранее определены по известным линиям.

Подробный пример обработки спектра метеора, полученного с помощью объективной призмы, приведен в постоянной части «Астрономического календаря» (7-е изд., — М.: Наука, 1981. — С. 308—313).

§ 4. НАБЛЮДЕНИЯ БОЛИДОВ И ПОИСК МЕТЕОРИТОВ

Если метеорное тело имеет достаточную массу и плотность, а его внеатмосферная скорость не превышает ~ 22 км/с, то $1/10$ — $1/2$ его начальной массы может выпасть на поверхность Земли. Эту часть метеорного тела называют метеоритом. Метеориты являются, вероятно, обломками малых планет — астероидов, в огромном количестве обращающихся, наряду с другими телами Солнечной системы, вокруг Солнца.

Изучение метеоритов способствует раскрытию тайн происхождения Земли, Луны, других планет и их спутников.

Метеориты бывают каменные, железные и железо-каменные. Многие из минералов, входящих в состав метеоритов, не встречаются на поверхности Земли. Одной из важнейших особенностей железных метеоритов является присутствие в них чрезвычайно крупных кристаллов железа.

До начала космических исследований метеориты представляли собой единственные образцы внеземного вещества, доступные для исследований в лабораторных условиях. В 1969 г. стало возможным изучение образцов лунного грунта в лабораторных условиях. В наши дни автоматические межпланетные космические аппараты изучают непосредственно вещество поверхностных слоев Венеры и Марса. Тем не менее метеориты представляют огромную ценность для науки.

Каждый человек, обнаруживший метеорит, должен сообщить об этом в Комитет по метеоритам Академии наук СССР (117313 Москва, ул. Марии Ульяновой, д. 3, корп. 1) или в республиканские Комиссии по метеоритам. За каж-

дый переданный в АН СССР метеорит нашедшему выдается денежная премия.

Следует отметить, что отличить метеорит, особенно каменный, от обычных горных пород не так легко, в особенности если он долго пролежал в почве.

Недавно выпавшие метеориты, не успевшие подвергнуться действию воды и воздуха, имеют следующие особенности: со всех сторон они покрыты тонкой (до 1—2 мм) черновато-бурой корой плавления, которая особенно хорошо заметна на краю излома метеоритов. Кора плавления свежес выпавших железных метеоритов имеет слабый синеватый оттенок. Если метеорит упал давно, то в результате окисления и выветривания кора плавления принимает красновато-бурю окраску. Такие каменные метеориты легко крошатся и раскалываются на части. При этом можно заметить, что внутри метеорит пропитан ржавчиной.

Чаще метеориты имеют неправильную обломочную форму. Но некоторые отличаются своей конусообразной формой (фото XVI). Еще одной отличительной особенностью метеоритов является наличие на их поверхности вмятин, называемых регмаглиптами и напоминающих отпечатки пальцев на мягкой глине или пластилине (фото XVII).

Каменные метеориты часто еще в воздухе распадаются на части и падают группами в виде метеоритных дождей. Поэтому после находки метеорита необходимо внимательно осмотреть его, и если он имеет неправильную, обломочную форму, а в особенности если на нем имеются следы свежего раскола, то необходимо продолжать тщательные поиски других его осколков в окружающей местности на значительно большей площади (до нескольких кв. км). Площадь, на которую выпадают метеоритные дожди, имеет приблизительно эллиптическую форму и называется эллипсом рассеивания. Площадь эллипса рассеивания измеряется десятками и даже сотнями квадратных километров. Направление большей оси эллипса рассеивания совпадает с направлением движения болида, полет которого предшествовал выпадению метеорита.

Количество выпадающих на Землю метеоритов весом до десятков кг составляет около тысячи за год.

Большинство метеоритов падает в безлюдные места — в пустыни, моря и океаны, которые занимают большую часть земной поверхности. И только ничтожная их часть становится объектом исследований ученых.

Так как заранее неизвестно, где и когда упадет метеорит, то для получения максимальной информации о выпавшем метеорите используются подробные показания очевидцев об условиях, месте падения и о самом метеорите. Особенно большое научное значение имеет срочное исследование только что выпавших метеоритов.

Очень важно подробно описать полет болида. Подробные данные о полете болида позволяют, во-первых, определить орбиту метеороида в межпланетном пространстве и установить условия его встречи с Землей и, во-вторых, если метеорит еще не найден, по показаниям очевидцев, находившихся в разных пунктах, установить место падения метеорита и организовать его поиски.

На что обратить внимание и какие данные важны прежде всего? Описание обстоятельств полета болида и последующего выпадения метеорита желательно дать по следующей схеме.

1. Дата, время и место наблюдения (название населенного пункта, где наблюдался болид; желательно указать координаты пункта наблюдения).

2. Видимый путь болида среди звезд или относительно окружающих предметов. Для определения видимого пути болида необходимо измерить координаты точек появления и исчезновения болида. Из-

мерение азимута начала и конца болида может быть произведено с помощью компаса. Приблизительную угловую высоту начала и конца болида можно определить с помощью обычного транспортира с подвешенным к нему на нитке грузиком (рис. 48) или же при помощи пальцев вытянутой руки. Растопыренные большой и указательный пальцы на расстоянии вытянутой руки состав-



Рис. 48. Определение азимуты и угловых высот точек начала и конца траектории болида

ляют угол примерно 17° . Угол наклона видимого пути болида на небе относительно горизонта может быть также измерен с помощью транспортира или другого угломерного прибора. Если болид наблюдался ночью, то его путь может быть нанесен на звездную карту так же, как при определении радиантов по визуальным наблюдениям. Рисунок пути болида может быть выполнен относительно земных предметов (деревьев, строений), если болид наблюдался днем.

3. Продолжительность полета болида.

4. Размеры, форма и яркость болида. Размеры болида (угловой диаметр) определяются по сравнению с полным

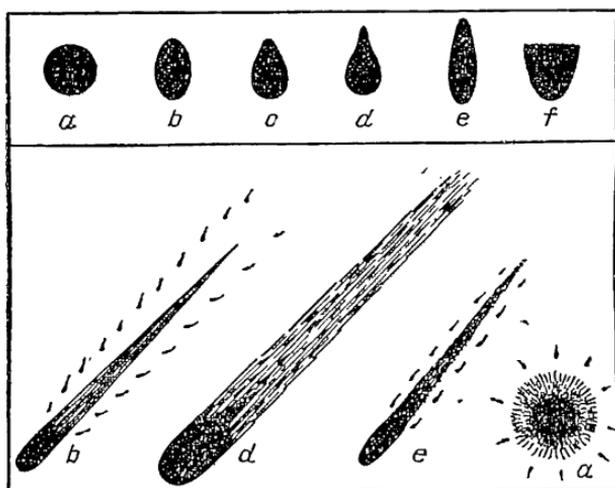


Рис. 49. Типичные формы головы болидов

диском Луны или Солнца, угловой диаметр которых составляет $0,5^\circ$. Оценка яркости болида производится также сравнением с Солнцем, Луной или Венерой. Необходимо оценить длину хвоста болида по сравнению с его головой.

Важно как можно точнее определить форму болида. Для голов болидов типичными являются следующие формы: шарообразная, овальная, грушевидная, каплеобразная и веретенообразная (рис. 49).

5. Цвет болида и его хвоста. Изменение окраски болида во время его пути.

6. Характер и степень освещения местности, производимого ярким болидом, в сравнении со степенью освещенности в полнолуние, сумерки и т. п.

7. След болида обычно вначале является прямолинейным. Постепенно он начинает искривляться различным образом и смещаться по небу. Ослабевая и разрываясь на части, след принимает вид отдельных клочьев. Так как след болида виден продолжительное время (десятки минут), то очень полезно сфотографировать его. Чем больше кадров будет сделано, тем лучше. Фотографирование следует проводить с одного и того же места так, чтобы на снимках получилось изображение горизонта с какими-либо ориентирами.

Следует помнить, что в нижней части следа, оставленного болидом, обычно наблюдается темное, иногда черное сгущение, называемое облачком в области задержки. Обычно оно располагается над зенитом места падения метеорита. Следовательно, по положению этого облачка можно приблизительно определить место падения метеорита.

8. Звуковые явления. При полете болида и непосредственно после него необходимо прислушаться, были ли слышны какие-либо звуки, определить их характер, число ударов, силу и характер грохота, гула и т. п. При полете ярких болидов неоднократно отмечалось, что еще во время полета болида слышны слабые звуки, напоминающие шуршание, шелест листьев, слабый треск и т. д. Некоторые ученые полагают, что эти звуки вызываются электрическими явлениями. Болиды, сопровождающиеся подобными звуками, называются электрофонными.

Ответить нужно только на те вопросы, которые не вызывают у очевидца сомнений или затруднений.

Все эти сведения вместе с указанием фамилии, имени и отчества очевидца, рода его занятий и почтовым адресом, с приложением сделанных зарисовок и негативов фотографий следа болида нужно присылать в Комитет по метеоритам Академии наук СССР.

Очень тщательно должно быть обследовано и описано место падения метеорита. Если облачко задержки болида было расположено вблизи зенита очевидца и были слышны звуки (свист, жужжание, гул, «уханье» и удар метеорита об землю — «клевок»), сопровождающие метеорит после области задержки и слышимые на расстоянии 2—3 км от места падения, то необходимо вести поиск упавшего метеорита путем обстоятельного осмотра местности.

Метеориты массой в несколько килограммов при своем падении образуют небольшие ямки, а массой в сотни граммов могут лежать на поверхности почвы. Поиски

метеорита могут затрудняться тем, что кора плавления метеорита черная и его трудно отличить от комьев земли, он может находиться в траве или кустарниках и т. п. Бывают случаи, когда метеориты падают на крыши домов, сараев и других строений, иногда пробивают их, оставляя разные метки. В подобных случаях необходимо подробное описание характера разрушения: направление (азимут) и угол падения метеорита (относительно вертикального направления).

Подробное описание результатов обследования места падения метеорита должно содержать следующую информацию:

дата, время и название места падения метеорита;

дата обследования места падения;

подробное описание места падения (план, рисунки, фотографии);

описание почвы и характера изменений, произведенных падением метеорита;

после подробного описания обстановки падения метеорита и самого метеорита необходимо указать фамилии, имена и отчества очевидцев, род их занятий и почтовые адреса.

Подробная инструкция о наблюдении падений, поиске и сборе метеоритов приведена в постоянной части Астрономического календаря (1981 г.). Исчерпывающие данные об уже найденных метеоритах можно найти в специальной литературе, посвященной этому вопросу.

Здесь можно лишь указать, что на территории нашей страны имеется несколько уникальных мест падений метеоритов. К их числу относится метеоритный кратер Каали поперечником около 100 метров на острове Сааремаа в Эстонской ССР. Возраст кратера оценивается более чем в две тысячи лет. Вокруг главного кратера обнаружено шесть воронок — мелких кратеров диаметром от 15 до 30 м. В некоторых кратерах обнаружены небольшие осколки железного метеорита. Этим доказано метеоритное происхождение этих кратеров.

12 февраля 1947 г. на Дальнем Востоке произошло выпадение уникального Сихотэ-Алинского железного метеоритного дождя. Изучение обстановки падения и сбор метеоритных осколков продолжают до настоящего времени. По оценкам специалистов, глыба весом около 100 тонн, раздробившись во время движения в атмосфере на многочисленные осколки, рассеялась железным дождем. В результате образовалось множество кратеров и

воронки диаметром до 30 метров и глубиной до 6 метров. На месте падения было собрано 27 тонн метеоритного вещества. Самый крупный из найденных осколков Сихотэ-Алинского метеорита имел массу 1745 кг, а самый маленький — всего лишь 0,19 г. Общее количество осколков оценивается в сто тысяч, а площадь рассеивания 15—18 км². Длина большой оси эллипса рассеивания составляет немногим более десятка километров, а ширина 4—1,5 км.

На основе показаний очевидцев академиком В. Г. Фесенковым была вычислена орбита Сихотэ-Алинского метеорита. Оказалось, что до встречи с Землей он был одним из астероидов.

Чрезвычайно редкий случай встречи Земли с ядром кометы представляет собой выдающееся Тунгусское явление 30 июня 1908 г., сопровождавшееся мощным взрывом; выделившаяся при этом энергия была эквивалентна взрыву ~12 млн т тротила. В районе Тунгусского явления ударной волной был повален лес в радиусе нескольких десятков километров. Тунгусское явление сопровождалось необычными природными явлениями: землетрясением, возмущением магнитного поля Земли, аномальным свечением неба в ночные часы и другими.

Яркие болиды и падения метеоритов являются неожиданными явлениями и привлекают внимание очевидцев, даже несколько не причастных к астрономии. От их внимания и точности в каждом наблюдении зависит, в какой мере можно будет научно исследовать такие явления.

В СССР метеориты объявлены государственной собственностью, и каждый, кто видел падение метеорита либо нашел его, должен уведомить ближайшую астрономическую обсерваторию либо отделение Всесоюзного астрономо-геодезического общества и сообщить все, что ему известно об этом явлении. Каждый метеорит представляет собой большую научную ценность.

ГЛАВНЫЕ МЕТЕОРНЫЕ ПОТОКИ, ИЗВЕСТНЫЕ ПО ВИЗУАЛЬНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

Название потока	Эпоха активности	Дата максимума	Максимальное η_h	Видимый радиант		Видимая геосентр. скорость v , км/с	Год открытия потока
				α	δ		
Квадрантиды	27/XII—7/I	3/I	до 35	230°	+55°	35	1839
Авригиды	8—12/II	9/II	5	75	+42	—	—
Виргиниды	13—21/II	—	4	205	-41	29	1899
Гидриды	21—23/II	—	4	132	+6	—	—
Боотиды	Март	10/III	5	220	+10	—	1899
Виргиниды-I	12—22/III	12/III	4	192	+12	30	1899
Виргиниды-II	26/III—7/IV	11/IV	6	194	-7	31	1899
α -Виргиниды	Апрель	11/IV	7	210	-10	29	1899
Геркулелиды-I	9—23/IV	12/IV	5	273	+17	60	1899
Вульлекулиды	14—23/IV	—	до 5	317	+30	—	—
Аквилиды	19—23/IV	—	до 5	285	+6	—	—
Сагиттиды-I	19—23/IV	—	до 6	312	+22	35	—
Лириды	18—24/IV	21/IV	10	270	+33	48	1869
η (ν)-Аквариды	21/IV—12/V	4/V	12	334	-4	66	1848
Корониды	21—31/V	—	6	232	+34	—	—
γ -Скорпиониды	май—июнь	8—9/VI	7	228	-28	средн.	1930
Сагиттариды	июнь—июль	14/VI	8	270	-30	25—30	—
Боотиды	27—30/VI	27/VI	2	212	+58	30	1916
Цефеиды-I	11—21/VI	17/VI	до 7	313	+60	45	1899
α -Циглиды	17/VI—31/VII	?	6—7	310°	+45°	средн.	1899

Корвалы	до и после 27/VI	27/VI	3	192	-19	—	1948
Каприкорниды	10/VI—20/VIII	15/VI	9	345	-15	30	1899
δ-Аквариды, Сев. Южн.	23/VII 22/VIII	28/VII	4 12	334 338	-5 -17	40	1871
Кассиопейды	17/VII—15/VIII	28/VII	до 18	44	+63	60	1869
Южн. Писциды	18/VII—12/VIII	2/VIII	до 10	345	-30	40	1934
Пегасиды	18—31/VIII	—	до 9	341	+21	ок. 50	XX B.
Персеиды	9/VI—17/VIII	11—12/VIII	60	45	+57	61	1834
γ-Цигиды	10—25/VIII	ок. 20/VIII	до 11	290	+53	25	1838
Цефеиды	10—24/VIII	20/VIII	до 8	311	+62	быстр.	1899
Камелопартиды	10—25/VIII	20/VIII	7	70	+65	70	1925
Авргида	14—31/VIII	30/VIII	до 8	89	+41	69	1930
Писциды	1—24/IX	11/IX	до 5	349	+3	27	—
Пегасиды	2—6/IX	5/IX	9	1	+15	ок. 60	—
Дракоиды	8—10/X	10/X	?	262	+56	23	1926
Писциды	7—20/X	10?/X	4	22	+18	ок. 20	1948
Ориониды	14—26/X	22/X	45	94	+15	66	1869
Ариетиды Южн.	11—27/X	20?/X	до 11	ок. 32	+20	ок. 20	1940
Цетиды	13—24/X	20/X	до 10	45	+10	оч. медл.	—
Тауриды Сев.	18/X—30/XI	14?/XI	до 5	56	+22	ок. 26	1869
Тауриды Южн.	29/X—25/XI	нач. XI	10	55	+14	30	—
Ариетиды	ноябрь	12/XI	11	42	+20	29	1949
Андромедиды	10—27/XI	ок. 12/XI	?	24	+44	оч. медл.	1867
Леониды	8—18/XI	17/XI	5—15	152	+22	72	1832
Монопертиды	21—22/XI	21/XI	?	110	-5	ок. 35	1935
Геминиды	25/XI—18/XII	13/XII	до 100	112	+33	ок. 35	1862
α-Дракоиды I	9—13/XII	—	4	210	+72	ок. 60	1899
Канкриды	2—12/XII	12/XII	до 6	121	+25	ок. 35	1899
Урса-Минориды	22—25/XII	22/XII	до 2	233	+83	35—40	1945

КОМЕТНЫЕ РАДИАНТЫ

Таблица II

Комета	Дата	λ_{\odot}	α_R	δ_R	v_g	Δ_{\min}	Примечание
1930 VI	Июнь 9	78,0°	221°	+47°	13	0,002	
1618 II	Июнь 15	83,4	278	-1	37	0,04	
1910 I	Июнь 19	87,2	313	-9	58	0,03	
1864 II	Июнь 22	90,4	9	+5	71	0,004	
1684	Июнь 23	91,7	63	-46	40	0,02	
1874 II	Июнь 25	92,9	19	-12	70	0,05	
1898 X	Июнь 28	96,2	15	+29	66	0,02	
1909 II	Июль 3	100,7	208	+53	15	0,02	
1908 III	Июль 6	103,4	5	+23	69	0,05	
1770 I	Июль 6	103,9	276	-20	21	0,01	
1964 VIII	Июль 9	106,8	31	+9	70	0,04	
1886 III	Июль 11	108,9	21	-42	56	0,05	
1946 II	Июль 16	113,6	20	+2	71	0,04	
1770 II	Июль 18	115,4	353	+13	66	0,05	
568	Июль 26	123,0	263	-34	17	0,02	
1939 III	Авг. 3	130,4	17	-12	63	0,02	
1951 II	Авг. 3	130,6	21	-38	50	0,04	
1737 II	Авг. 8	135,8	119	+79	40	0,02	
1852 II	Авг. 11	138,4	42	-13	65	0,01	
1833	Авг. 12	139,4	137	+10	31	0,01	
1925 XI	Авг. 12	139,5	61	+40	67	0,03	Д
1962 III	Авг. 12	138,8	45	+57	60	0,02	
1862 II	Авг. 14	140,8	44	+12	71	0,02	
1870 I	Авг. 16	142,6	29	+48	62	0,03	
1808 I	Авг. 20	147,8	92	+7	61	0,04	С
1871 IV	Авг. 22	148,4	4	+48	55	0,04	
1900 II	Авг. 22	148,8	66	-54	38	0,03	
1499	Авг. 29	155,7	325	-64	20	0,03	
1911 II	Сент. 1	158,6	91	+39	66	0,01	
1558	Сент. 2	159,5	31	-9	56	0,05	
1864 II	Сент. 3	160,2	58	+21	71	0,03	
1854 III	Сент. 12	168,8	53	-15	57	0,02	
1763	Сент. 22	178,8	45	-24	46	0,02	
1790 I	Сент. 24	180,9	115	+38	67	0,04	
1977 XIV	Сент. 25	181,8	238	+68	32	0,01	
961	Окт. 3	189,6	65	-16	54	0,05	
1976 I	Янв. 1	280,9	197	+48	54	0,05	
1969 IX	Янв. 2	281,1	231	-57	47	0,01	С
1792 II	Янв. 7	286,3	216	+15	64	0,05	
1759 III	Янв. 16	295,9	210	-15	71	0,05	
1840 I	Янв. 20	300,3	128	-29	39	0,04	
1672	Янв. 22	301,9	259	+21	49	0,03	
1833	Янв. 30	310,0	138	+25	31	0,03	
1718	Янв. 31	310,9	210	-32	69	0,03	
1939 III	Фев. 3	313,6	254	-5	63	0,04	
1857 I	Фев. 3	314,4	263	+23	51	0,01	
1092	Фев. 6	317,4	103	-35	23	0,001	
868	Фев. 8	319,4	186	+36	45	0,03	

Комета	Дата	λ_{\odot}	α_R	δ_R	v_g	Δ_{\min}	Примечание
1947 III	Фев. 11	322,4	237	+11	66	0,04	
1743 I	Фев. 12	323,0	353	-7	19	0,04	
1858 IV	Фев. 15	326,0	273	+13	55	0,04	Д
1854 IV	Фев. 15	326,7	306	+38	31	0,02	С
574	Фев. 16	327,1	110	-60	31	0,02	
1976 IV	Март 1	339,9	11	-63	33	0,01	С
1845 III	Март 1	340,6	285	-4	61	0,03	С
1231	Март 16	355,2	32	+26	16	0,05	С
1862 IV	Март 18	357,5	252	+1	66	0,01	С
1763	Март 20	358,9	314	+22	46	0,01	С
1954 X	Март 23	2,3	254	+57	34	0,01	
1969 VII	Март 29	7,9	29	-4	22	0,01	Д
1907,2	Март 30	9,7	309	-60	59	0,004	
1917 II	Апр. 2	11,9	300	-9	68	0,01	
1882 I	Апр. 16	26,0	358	-14	50	0,01	С
1957 IX	Апр. 18	27,8	330	-24	66	0,02	
1861 I	Апр. 21	31,2	272	+34	47	0,003	
1972 II	Апр. 23	32,6	107	-45	15	0,001	
1702	Апр. 25	34,9	44	+9	25	0,03	Д
1911 VI	Апр. 26	36,0	321	+24	57	0,08	
530	Май 2	41,5	335	-2	67	0,001	
1967 II	Июнь 5	74,1	66	+29	33	0,003	Д
1927 IX	Июнь 8	77,4	32	+33	50	0,04	С
1978	Окт. 8	195,1	263	+56	21	0,0003	
1946 V	Окт. 10	196,3	264	+55	20	0,0001	
1864 IV	Окт. 17	203,4	211	+42	35	0,03	С
-86	Окт. 18	205,0	91	+17	66	0,05	
1779	Окт. 20	206,2	39	-29	30	0,02	
1739	Окт. 25	211,7	162	+36	61	0,05	
1132	Окт. 26	212,8	172	+43	57	0,04	
1906 V	Окт. 27	213,8	263	-33	11	0,02	С
1849 I	Окт. 30	216,7	130	+76	49	0,02	
1097	Нояб. 2	219,9	205	+49	46	0,05	
1959 VI	Нояб. 10	227,9	93	+48	56	0,17	
1366	Нояб. 7	224,3	145	+25	70	0,01	
1743 I	Нояб. 11	228,6	21	+4	19	0,01	
1974 XV	Нояб. 12	229,5	145	-14	67	0,04	
1965 IV	Нояб. 16	233,9	152	+22	70	0,01	
1967 II	Нояб. 19	236,1	61	+10	33	0,05	
1944 I	Нояб. 21	239,0	132	-9	67	0,04	
1852 III	Нояб. 27	244,3	24	+42	17	0,01	
1973 XII	Дек. 4	251,5	230	-14	42	0,03	Д
1806 I	Дек. 5	253,2	24	+48	16	0,001	
1770 I	Дек. 6	253,7	261	-23	21	0,02	Д
1962 IV	Дек. 11	259,1	111	-24	45	0,001	
1881 V	Дек. 17	265,3	280	-36	21	0,04	Д
1846 VII	Дек. 19	266,8	204	+4	66	0,04	
1608	Дек. 28	275,8	133	+21	50	0,01	

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЗАМЕЧАЕМОСТИ ПРИ МНОГОКРАТНОМ СЧЕТЕ МЕТЕОРОВ

p	Число наблюдателей K											
	3		4		5		6		7		8	
	s/z	η	s/z	η	s/z	η	s/z	η	s/z	η	s/z	η
0,01	0,9900	0,0297	0,9850	0,0394	0,9800	0,0490	0,9750	0,0585	0,9700	0,0679	0,9662	0,0773
0,02	0,9800	0,0588	0,9700	0,0776	0,9610	0,0961	0,9517	0,1142	0,9421	0,1319	0,9325	0,1492
0,03	0,9700	0,0873	0,9558	0,1147	0,9420	0,1413	0,9278	0,1670	0,9143	0,1920	0,9012	0,2163
0,04	0,9608	0,1153	0,9419	0,1507	0,9230	0,1846	0,9050	0,2172	0,8879	0,2486	0,8709	0,2787
0,05	0,9507	0,1426	0,9275	0,1855	0,9048	0,2262	0,8830	0,2649	0,8620	0,3017	0,8415	0,3366
0,06	0,9411	0,1694	0,9138	0,2193	0,8870	0,2661	0,8614	0,3101	0,8369	0,3515	0,8133	0,3904
0,07	0,9314	0,1956	0,9000	0,2520	0,8694	0,3043	0,8405	0,3530	0,8129	0,3983	0,7864	0,4404
0,08	0,9221	0,2213	0,8862	0,2836	0,8522	0,3409	0,8200	0,3936	0,7896	0,4422	0,7606	0,4868
0,09	0,9126	0,2464	0,8731	0,3143	0,8356	0,3760	0,8002	0,4321	0,7670	0,4832	0,7358	0,5298
0,10	0,9033	0,2710	0,8598	0,3439	0,8190	0,4095	0,7810	0,4686	0,7453	0,5217	0,7119	0,5695
0,11	0,8939	0,2950	0,8468	0,3726	0,8029	0,4416	0,7621	0,5030	0,7243	0,5577	0,6890	0,6063
0,12	0,8847	0,3185	0,8340	0,4003	0,7872	0,4723	0,7439	0,5356	0,7039	0,5913	0,6671	0,6404
0,13	0,8756	0,3415	0,8213	0,4271	0,7717	0,5016	0,7262	0,5664	0,6843	0,6227	0,6460	0,6718
0,14	0,8667	0,3640	0,8089	0,4530	0,7566	0,5296	0,7088	0,5954	0,6654	0,6521	0,6257	0,7008
0,15	0,8576	0,3859	0,7967	0,4780	0,7417	0,5563	0,6921	0,6229	0,6470	0,6794	0,6062	0,7275
0,16	0,8455	0,4073	0,7845	0,5021	0,7272	0,5818	0,6757	0,6487	0,6294	0,7049	0,5876	0,7521
0,17	0,8396	0,4282	0,7726	0,5254	0,7131	0,6061	0,6599	0,6731	0,6123	0,7286	0,5697	0,7748
0,18	0,8307	0,4486	0,7610	0,5479	0,6992	0,6293	0,6444	0,6960	0,5958	0,7507	0,5525	0,7956
0,19	0,8221	0,4686	0,7493	0,5695	0,6856	0,6513	0,6295	0,7176	0,5798	0,7712	0,5360	0,8147
0,20	0,8133	0,4880	0,7380	0,5904	0,6723	0,6723	0,6149	0,7379	0,5645	0,7903	0,5201	0,8322
0,21	0,8048	0,5070	0,7268	0,6105	0,6593	0,6923	0,6007	0,7569	0,5496	0,8079	0,5049	0,8483
0,22	0,7961	0,5254	0,7157	0,6298	0,6466	0,7113	0,5870	0,7748	0,5353	0,8244	0,4903	0,8630
0,23	0,7877	0,5435	0,7049	0,6485	0,6342	0,7293	0,5736	0,7916	0,5214	0,8395	0,4763	0,8764

0, 24	0, 7792	0, 5610	0, 6942	0, 6664	0, 6221	0, 7465	0, 5606	0, 8073	0, 5081	0, 8536	0, 4629	0, 8887
0, 25	0, 7708	0, 5781	0, 6732	0, 6836	0, 6102	0, 7627	0, 5480	0, 8220	0, 4951	0, 8665	0, 4500	0, 8999
0, 26	0, 7626	0, 5948	0, 6732	0, 7001	0, 5985	0, 7781	0, 5358	0, 8358	0, 4827	0, 8785	0, 4375	0, 9101
0, 27	0, 7543	0, 6110	0, 6630	0, 7160	0, 5872	0, 7927	0, 5239	0, 8487	0, 4706	0, 8895	0, 4256	0, 9194
0, 28	0, 7462	0, 6268	0, 6529	0, 7313	0, 5761	0, 8065	0, 5123	0, 8607	0, 4590	0, 8997	0, 4142	0, 9278
0, 29	0, 7380	0, 6421	0, 6430	0, 7459	0, 5652	0, 8196	0, 5011	0, 8719	0, 4478	0, 9091	0, 4032	0, 9354
0, 30	0, 7300	0, 6570	0, 6332	0, 7599	0, 5546	0, 8319	0, 4902	0, 8824	0, 4369	0, 9176	0, 3927	0, 9424
0, 31	0, 7220	0, 6715	0, 6236	0, 7733	0, 5443	0, 8436	0, 4796	0, 8921	0, 4265	0, 9255	0, 3825	0, 9486
0, 32	0, 7142	0, 6856	0, 6142	0, 7862	0, 5341	0, 8546	0, 4693	0, 9011	0, 4164	0, 9328	0, 3728	0, 9543
0, 33	0, 7063	0, 6992	0, 6049	0, 7985	0, 5242	0, 8650	0, 4593	0, 9095	0, 4067	0, 9394	0, 3634	0, 9594
0, 34	0, 6985	0, 7125	0, 5958	0, 8103	0, 5146	0, 8748	0, 4497	0, 9174	0, 3973	0, 9455	0, 3544	0, 9640
0, 35	0, 6909	0, 7254	0, 5868	0, 8215	0, 5051	0, 8840	0, 4403	0, 9246	0, 3882	0, 9510	0, 3458	0, 9681
0, 36	0, 6832	0, 7379	0, 5779	0, 8322	0, 4959	0, 8926	0, 4312	0, 9313	0, 3794	0, 9560	0, 3375	0, 9719
0, 37	0, 6757	0, 7500	0, 5693	0, 8425	0, 4869	0, 9008	0, 4223	0, 9375	0, 3709	0, 9606	0, 3295	0, 9752
0, 38	0, 6682	0, 7617	0, 5607	0, 8522	0, 4781	0, 9084	0, 4137	0, 9432	0, 3627	0, 9648	0, 3218	0, 9782
0, 39	0, 6607	0, 7730	0, 5522	0, 8615	0, 4695	0, 9155	0, 4053	0, 9485	0, 3548	0, 9686	0, 3144	0, 9808
0, 40	0, 6533	0, 7840	0, 5440	0, 8704	0, 4611	0, 9222	0, 3972	0, 9534	0, 3471	0, 9720	0, 3072	0, 9832
0, 45	0, 6175	0, 8336	0, 5047	0, 9085	0, 4221	0, 9497	0, 3601	0, 9723	0, 3126	0, 9848	0, 2754	0, 9916
0, 50	0, 5833	0, 8750	0, 4688	0, 9375	0, 3875	0, 9688	0, 3281	0, 9844	0, 2835	0, 9922	0, 2490	0, 9961
0, 55	0, 5508	0, 9089	0, 4359	0, 9590	0, 3569	0, 9816	0, 3005	0, 9917	0, 2588	0, 9963	0, 2269	0, 9983
0, 60	0, 5200	0, 9360	0, 4060	0, 9744	0, 3299	0, 9898	0, 2766	0, 9959	0, 2377	0, 9984	0, 2082	0, 9993
0, 65	0, 4908	0, 9571	0, 3788	0, 9850	0, 3061	0, 9948	0, 2559	0, 9998	0, 2196	0, 9994	0, 1923	0, 9998
0, 70	0, 4633	0, 9730	0, 3542	0, 9919	0, 2850	0, 9976	0, 2379	0, 9993	0, 2040	0, 9998	0, 1786	0, 9999
0, 75	0, 4133	0, 9920	0, 3120	0, 9984	0, 2499	0, 9997	0, 2083	1, 0000	0, 1786	1, 0000	0, 1562	1, 0000
0, 85	0, 3908	0, 9966	0, 2940	0, 9995	0, 2353	0, 9999	0, 1961	1, 0000	0, 1681	1, 0000	0, 1471	1, 0000
0, 90	0, 3700	0, 9990	0, 2778	0, 9999	0, 2222	1, 0000	0, 1852	1, 0000	0, 1587	1, 0000	0, 1389	1, 0000
0, 95	0, 3508	0, 9999	0, 2632	1, 0000	0, 2105	1, 0000	0, 1754	1, 0000	0, 1504	1, 0000	9, 1316	1, 9000
1, 00	0, 3333	1, 0000	0, 2500	1, 0000	0, 2000	1, 0000	0, 1667	1, 0000	0, 1429	1, 0000	0, 1250	1, 0000

АДРЕСА УЧРЕЖДЕНИЙ,
КУДА МОЖНО ОБРАЩАТЬСЯ ПО ВОПРОСАМ
ОБРАБОТКИ НАБЛЮДЕНИЙ МЕТЕОРОВ

1. 747000 Ашхабад, ул. Гоголя, 15, Физико-технический институт АН Туркменской ССР.
2. 734670 Душанбе, ул. Свириденко, 22, Институт астрофизики АН Таджикской ССР.
3. 252053 Киев, ул. Обсерваторная, 3, Астрономическая обсерватория Киевского гос. университета.
4. 270014 Одесса, парк Шевченко, Астрономическая обсерватория Одесского гос. университета.
5. 103001 Москва К-1, Садовая-Кудринская, 24, Московское отделение ВАГО
6. 333007 Симферополь, ул. Беспалова, 39, кв. 16, Крымское отделение ВАГО.
7. 634034 Томск, ул. Учебная, 39, Томское отделение ВАГО.
8. 422526, разъезд Обсерватория Татарской АССР, Зеленодольского района, Астрономическая обсерватория им. В. П. Энгельгардта.
9. 117313 Москва В-313, ул. Марши Ульяновой, 3, Комитет по метеоритам АН СССР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акишин А. И., Новиков Л. С.* Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов.— М.: Знание, 1983, 64 с.
- Астапович И. С.* Метеорные явления в атмосфере Земли.— М.: Физматгиз, 1958, 640 с.
- Астрономический календарь: Постоянная часть.— 7-е изд.— М.: Наука, 1981, 704 с.
- Бабаджанов П. Б.* Метеоры и астероиды // Будущее науки.— 1980.— С. 96—106.
- Бабаджанов П. Б., Крамер Е. Н.* Методика и некоторые результаты фотографических исследований метеоров.— М.: Изд-во АН СССР, 1963, 144 с.
- Бронштэн В. А.* Физика метеорных явлений.— М.: Наука, 1981, 416 с.
- Бронштэн В. А.* Серебристые облака и их наблюдение.— М.: Наука, 1984, 128 с.
- Батсон Ф.* Между планетами.— М.: Гостехиздат, 1947, 227 с.
- Воронцов-Вельяминов Б. А.* Очерки о Вселенной.— М.: Наука, 1976, 720 с.
- Гетман В. С.* Метеоры и метеориты.— М.: Знание, 1984, 64 с.
- Еремеева А. И.* Рождение научной метеоритики.— М.: Наука, 1982, 253 с.
- Зоткин И. Т.* Наблюдение метеоров.— М.: Наука, 1972, 54 с.
- Зоткин И. Т., Симоненко А. Н., Федынский В. В., Хотинков Р. Л., Крамер Е. Н.* Фотографические болидные сети // Метеоритика.— 1976.— Вып. 35.— С. 3—18.
- Катасев Л. А.* Исследование метеоров в атмосфере Земли фотографическим методом.— Л.: Гидрометеоздат, 1966, 334 с.
- Кащеев Б. Л., Лебединец В. Н., Лагутин М. Ф.* Метеорные явления в атмосфере Земли.— М.: Наука, 1967, 260 с.
- Кринов Е. Л.* Инструкция по наблюдению падений, поискам и сбору метеоритов.— М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950, 33 с.
- Кринов Е. Л.* Вестники Вселенной.— М.: Географгиз, 1963, 144 с.
- Куликовский П. Г.* Справочник любителя астрономии.— М.: Наука, 1971, 632 с.
- Лебединец В. Н.* Аэрозоль в верхней атмосфере и космическая пыль.— Л.: Гидрометеоздат, 1981, 272 с.
- Лебединец В. Н.* Пыль в верхней атмосфере и космическом пространстве. Метеоры.— Л.: Гидрометеоздат, 1980, 250 с.
- Левин Б. Ю.* Физическая теория метеоров и метеорное вещество в Солнечной системе.— М.: Изд-во АН СССР, 1956, 293 с.
- Ловелл Б.* Метеорная астрономия.— М.: Физматгиз, 1958, 487 с.
- Ловелл Б., Клегг Д.* Радиоастрономия.— М.: ИЛ, 1953, 240 с.

Мак-Кинли Д. Методы метеорной астрономии.— М.: Мир, 1964, 330 с.

Марленский А. Д. Учебный звездный атлас.— М.: Просвещение, 1965.

Маргыненок В. В. Задачи и методы любительских наблюдений метеоров.— М.: Наука, 1967, 80 с.

Михайлов А. А. Звездный атлас (до 5,5^m).— М.: Изд-во АН СССР, 1965.

Михайлов А. А. Звездный атлас (до 8,25^m).— М.: Наука, 1969.

Назарова Т. Н. Микрометеоритное вещество вблизи Земли // Пыль в атмосфере и околоземном космическом пространстве.— М.: Наука, 1973.— С. 8—13.

Паннекук А. История астрономии.— М.: Наука, 1966, 592 с.

Сивонов Г. Н. Диспетчерская связь при наблюдении метеоров // Земля и Вселенная.— 1976.— № 6.— С. 66—67.

Симоненко А. Н. Обработка фотографий метеоров.— М.: Изд-во АН СССР, 1963, 40 с.

Симоненко А. Н. Метеориты — осколки астероидов.— М.: Наука, 1979, 224 с.

Федынский В. В. Метеоры.— М.: Гостехиздат, 1956, 112 с.

Хотинок Р. Л. О визуальных наблюдениях численности метеоров (Методические указания по обработке наблюдений).— М.: 1985, 14 с.

Цесевич В. П. Что и как наблюдать на небе.— 6-е изд.— М.: Наука, 1984, 302 с.

Энциклопедический словарь юного астронома.— 2-е изд.— М.: Просвещение, 1986, 320 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Глава I. КРАТКИЙ ОЧЕРК РАЗВИТИЯ НАУКИ О МЕТЕОРАХ	9
Глава II. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ МЕТЕОРОВ	28
§ 1. Фотографические метеорные патрули	29
§ 2. Метод мгновенной экспозиции	32
§ 3. Фотографические болидные сети	33
§ 4. Радиолокационные наблюдения метеоров	37
§ 5. Телевизионные наблюдения	44
§ 6. Регистрация метеорных частиц с помощью высот- ных ракет и космических аппаратов	46
Глава III. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О МЕТЕ- ОРАХ	49
§ 1. Численность и блеск метеоров	49
§ 2. Суточные и сезонные вариации численности метео- ров	53
§ 3. Высоты и скорости метеоров	55
§ 4. Яркие метеоры и их следы	60
§ 5. Атмосферные течения в метеорной зоне	63
§ 6. Спектры метеоров	66
§ 7. Структура и плотность метеороидов	70
Глава IV. МЕТЕОРОИДЫ В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ	73
§ 1. Атмосфера Земли — среда метеорных явлений	73
§ 2. Движение метеорных тел в земной атмосфере. Ос- новные уравнения физической теории метеоров	78
§ 3. Кривые свечения и ионизации метеоров	81
§ 4. Зависимость максимальной абсолютной звездной величины метеора от массы и скорости метеороида	85
§ 5. Микрометеороиды	88
Глава V. МЕТЕОРНОЕ ВЕЩЕСТВО В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ	89
§ 1. Элементы орбит	89
§ 2. Метеорные потоки	92
§ 3. Связь метеорных потоков с кометами	114

§ 4. Образование и эволюция метеорных роев	117
§ 5. Структура метеорных роев	120
§ 6. Пространственная плотность спорадических метеороидов и приток метеорного вещества на Землю	126
§ 7. Распределение элементов орбит спорадических метеоров	129
§ 8. «Метеорная опасность» для космических аппаратов (КА)	133
Глава VI. ВИЗУАЛЬНЫЕ И ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ МЕТЕОРОВ	139
§ 1. Визуальные наблюдения метеоров	149
§ 2. Фотографические наблюдения метеоров	152
§ 3. Спектрографирование метеоров и определение длин волн спектральных линий	156
§ 4. Наблюдения болидов и поиск метеоритов	159
ПРИЛОЖЕНИЯ	166
Таблица I. Главные метеорные потоки, известные по визуальным наблюдениям	166
Таблица II. Кометные радианты	168
Таблица III. Коэффициенты замечаемости при многократном счете метеоров	170
Адреса учреждений, куда можно обращаться по вопросам обработки наблюдений метеоров	172
Список литературы	173



Эдмонд Галлей
(1656—1742)



Эрнст Флоренс Фридрих Хладни
(1756—1827)



А. Гумбольдт и Э. Бонплан наблюдают дождь Леонид 1799 г.



Джованни Скиапарелли
(1835—1910)



Федор Александрович Бредихин
(1831—1904)

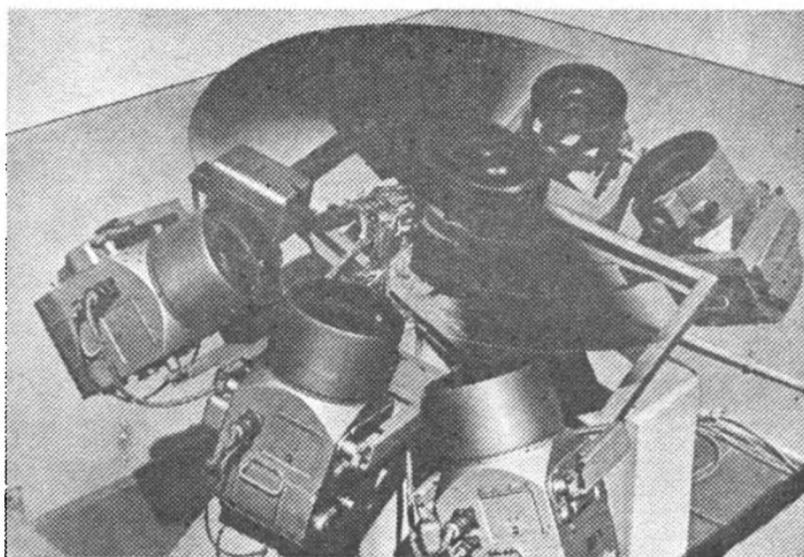


Фото I. Агрегат метеорного патруля с обтюратором. Институт астрофизики АН Таджикской ССР

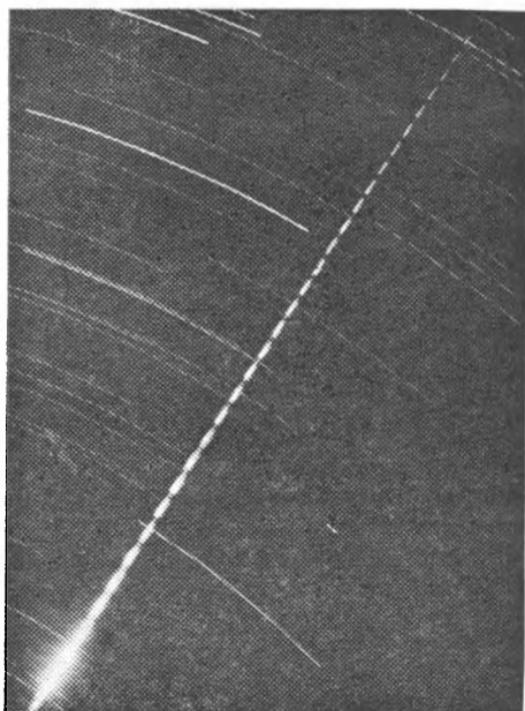


Фото II. Снимок метеора, полученный с помощью агрегата с обтюратором. В конце пути отчетливо заметно замыкание обтюраторных прерывов. На суточных следах звезд видны прерывы — марки времени

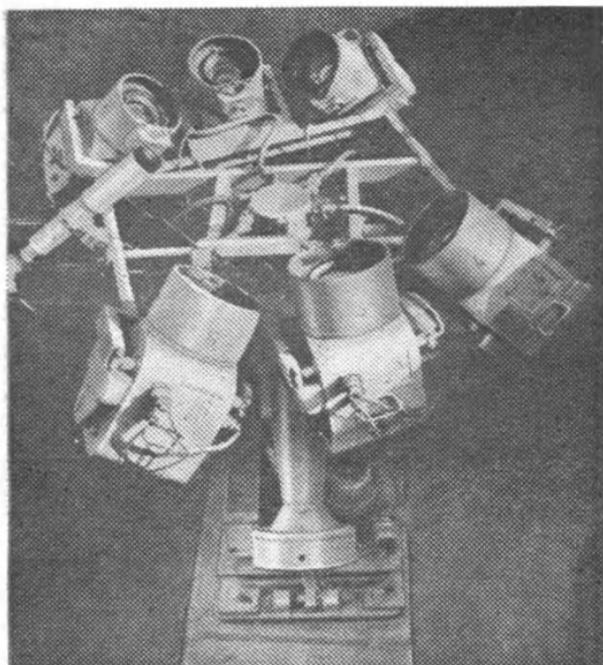


Фото III. Агрегат метеорного патруля на параллактической монтировке. Институт астрофизики АН Таджикской ССР



Фото IV. Снимок метеора, полученный с помощью агрегата метеорного патруля на параллактической монтировке

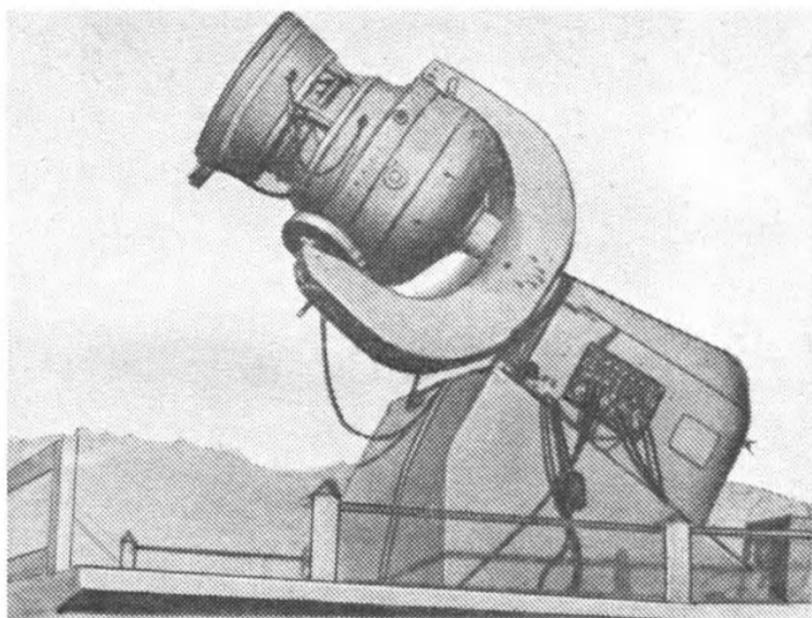


Фото V. Камера Супер-Шмидт для фотографирования метеоров

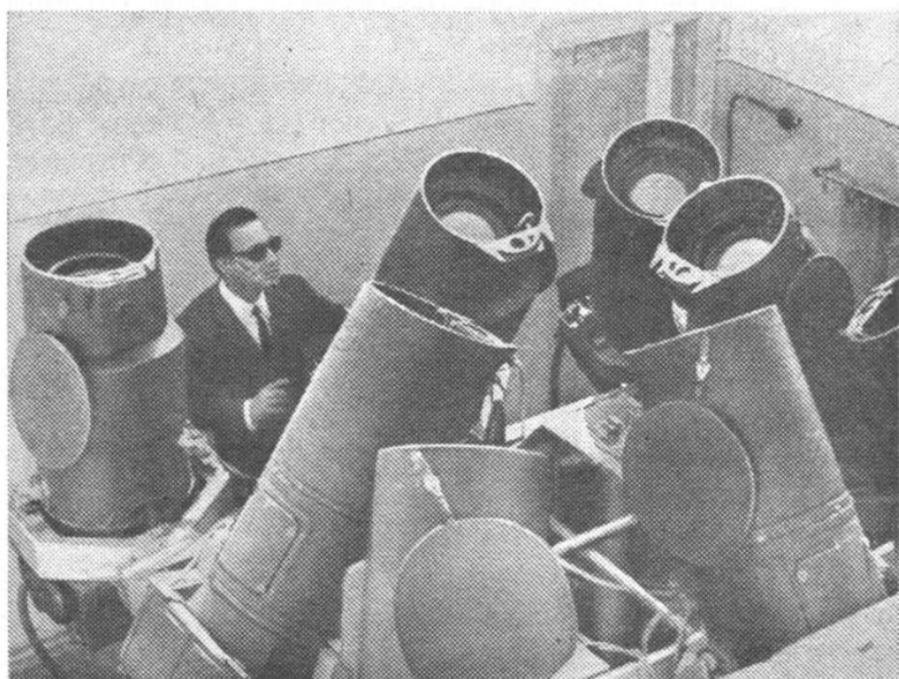


Фото VI. Установка для мгновенного фотографирования метеоров.
Институт астрофизики АН Таджикской ССР

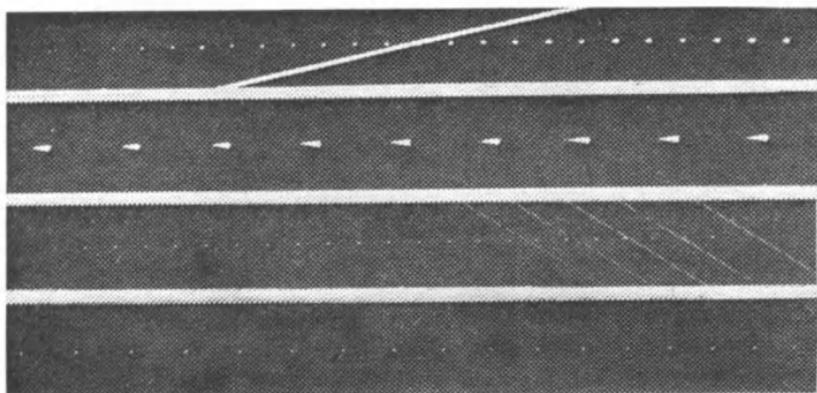


Фото VII. Мгновенные снимки метеоров, полученные в Душанбе. Снимки показывают различные формы дробления метеорных тел



Фото VIII. Камера «всего неба» для фотографирования болидов. Астрономический институт Чехословацкой Академии наук

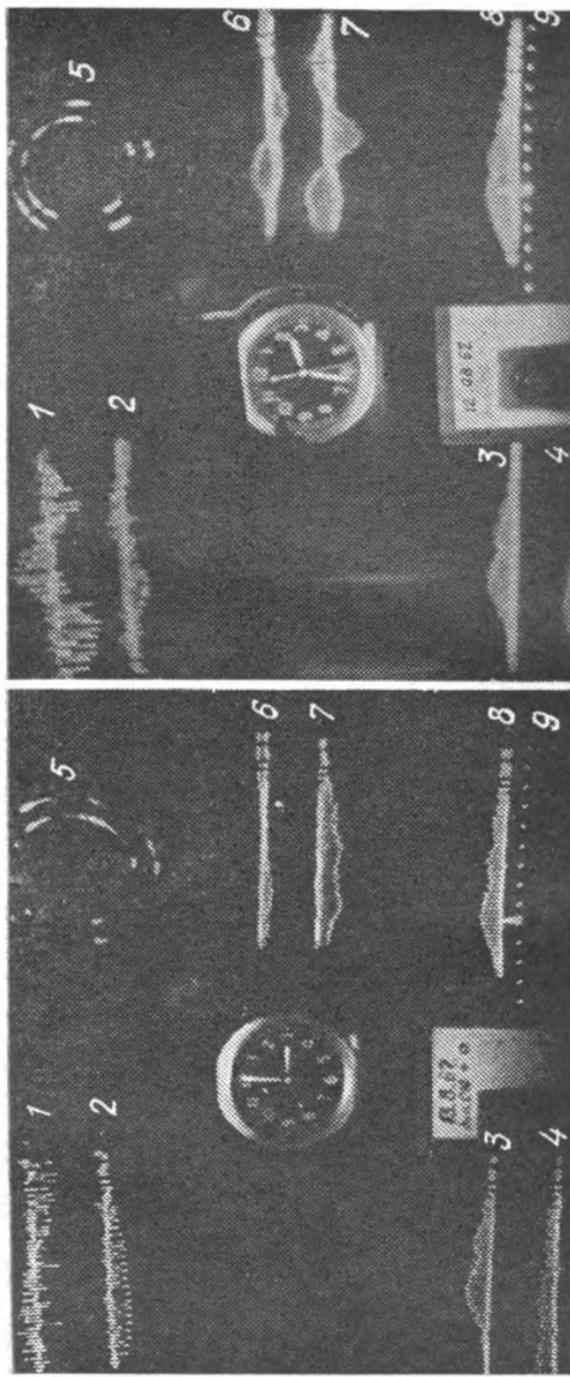


Фото IX. Образцы фоторегистрации характеристик радиозо от метеорного следа: 1, 2 — фазово-временная характеристика; 3, 4, 8 — амплитудно-временные характеристики отраженного сигнала, полученные в трех пунктах; 5 — грубая шкала дальности; 5 — точная шкала дальности; 6, 7 — характеристики для определения направления и скорости ветра

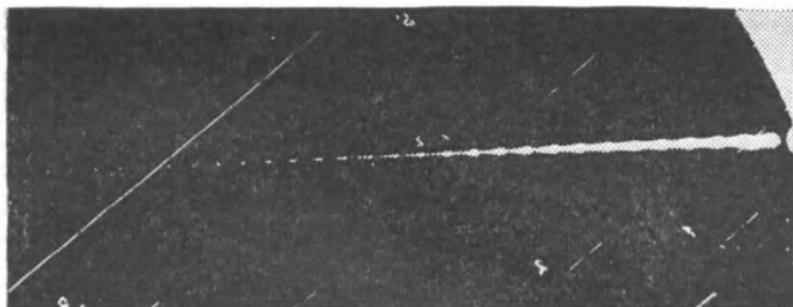


Фото X. Мгновенные снимки болида 12 августа 1964 г., полученные в Душанбе

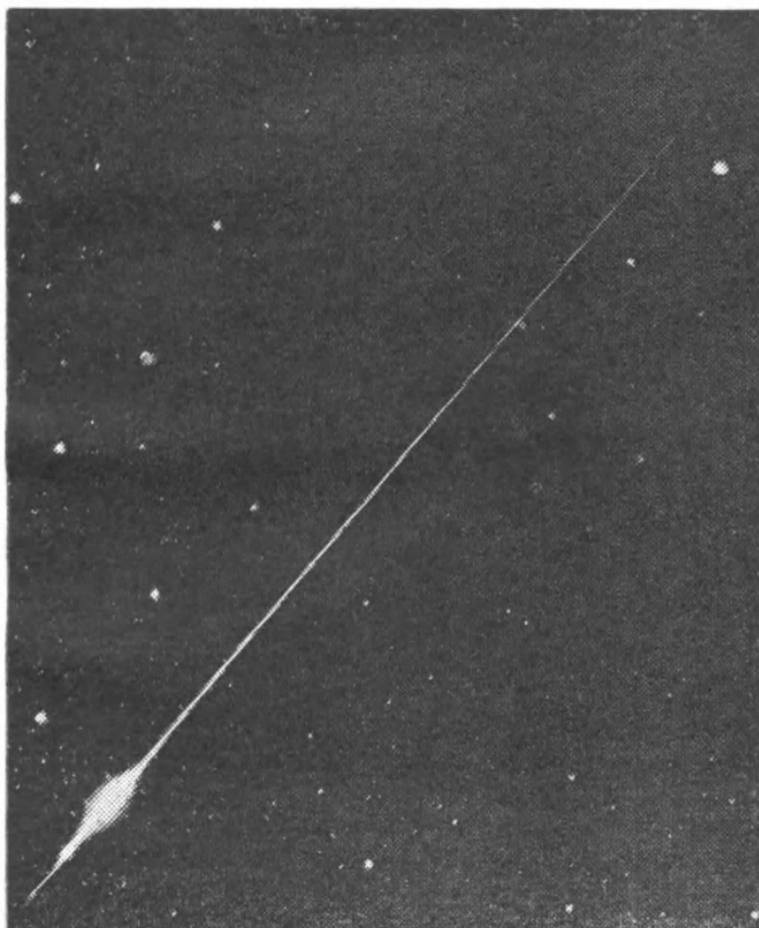


Фото XI. Метеор со вспышкой

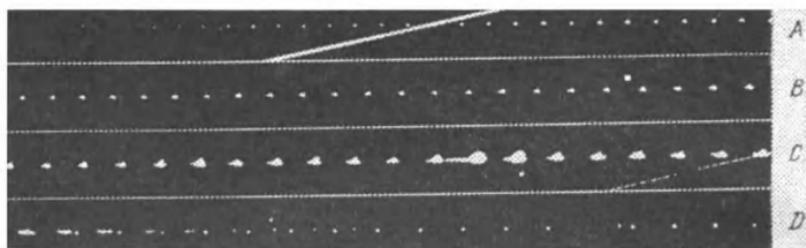


Фото XII. Распад метеороида на осколки. Снимок метеора разделен на 4 последовательных участка *A*, *B*, *C*, *D*. Взрыв и последующий распад на пять крупных осколков произошел на участке *C*. Раздельное движение осколков видно на участке *D*

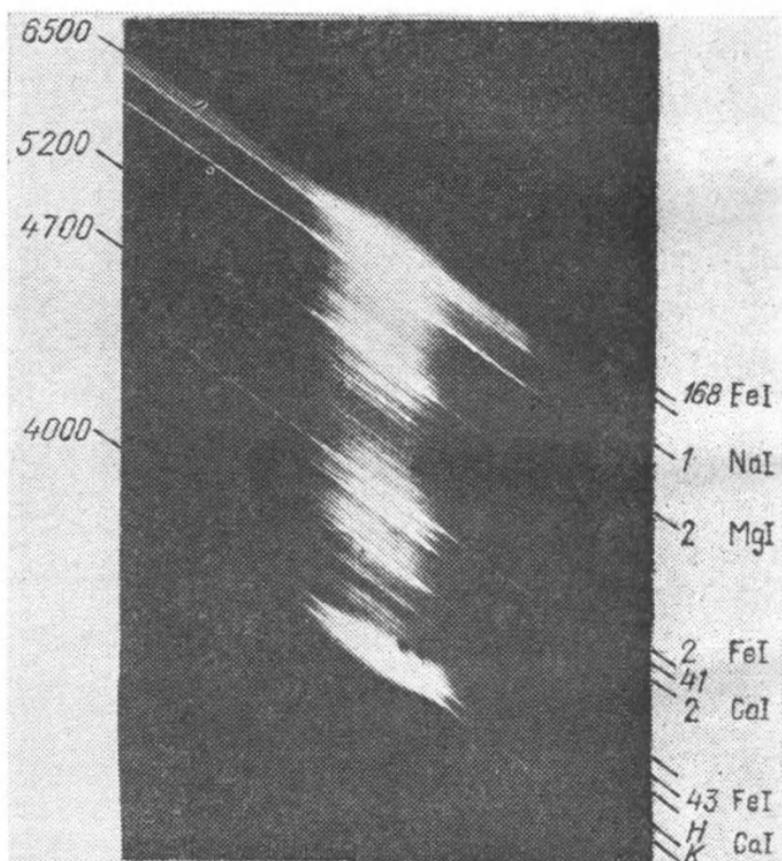


Фото XIII. Спектр метеора потока Персеид, полученный в Душанбе на камере НАФА-ЗС-25 с помощью объективной призмы. Слева указаны длины волн в ангстремах, а справа номера мультиплетов и принадлежность линий спектра к отдельным элементам



Фото XIV. Фотография метеорного дождя Леонид 1966 г., полученная в обсерватории Китт-Пик (США)



Фото XV. Снимок кометы Веста, полученный 11 марта 1976 г.
Н. С. Черных в Крымской астрофизической обсерватории

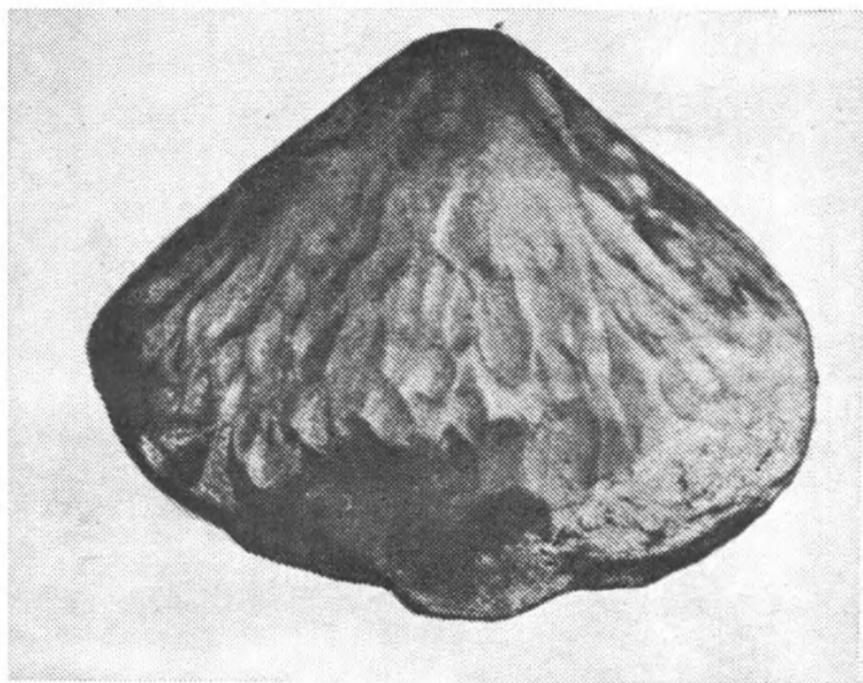


Фото XVI. Каменный метеорит Каракол

