

**УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК****ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННОГО СОСТАВА  
ИОНИЗИРОВАННЫХ СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ****Б. А. Миртов, В. Г. Истомина**

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших параметров ионосферы следует считать химический состав ее ионов. Исследование спектра ионов в ионосфере (т. е. ее состава) чрезвычайно важно для решения ряда геофизических и астрофизических проблем. Исследования подобного рода смогут, например, помочь в решении такой фундаментальной геофизической и вместе с тем астрофизической проблемы, как проблема Солнце — Земля.

Очень вероятно, что спектры ионов в низких широтах Земли и ее полярных областях (особенно в моменты полярных сияний) будут отличаться друг от друга. Это различие должно обуславливаться различными механизмами ионизации атмосферы, действующими в названных районах, — ультрафиолетовым облучением в низких широтах и корпускулярным излучением в полярных областях (особенно во время полярной ночи).

Исследование ионного состава ионосферы может также помочь в решении проблемы возникновения и существования ионизированных слоев на разных высотах. Это станет возможным при изучении изменения ионного состава в течение суток (от дня к ночи), а также при изменении этого состава в условиях глубокой полярной ночи, при длительном отсутствии такого мощного ионизирующего агента, как ультрафиолетовое излучение Солнца.

Наконец, если вернуться к условиям распространения радиоволн, представляет определенный интерес знание спектра ионов с точки зрения их эффективных поперечников для процессов соударения с электронами. Для создания полной теории распространения радиоволн нельзя, по-видимому, пренебрегать такими соударениями, а эффективные сечения ионов в этом процессе, конечно, совершенно иные, чем эффективные поперечники нейтральных атомов или молекул.

В настоящее время мы располагаем лишь общими, более или менее достоверными качественными данными о составе ионизированных слоев, полученными при помощи косвенных методов. Однако эти методы не дают возможности судить о самом важном — о вариациях в составе ионосферы не с качественной, а с количественной стороны явления. Для обнаружения этих вариаций нужны масс-спектрометрические исследования, которые могут быть осуществлены только при помощи специальной измерительной аппаратуры, посланной в исследуемые слои атмосферы. Трудность посылки приборов на высоты порядка 200—400 км и выше до настоящего времени делала невозможными подобные исследования, и лишь в последнее время производство высотных экспериментов получило надежную основу: были созданы специальные приборы, позволяющие проводить указанные измерения, и созданы подъемные средства, позволяющие поднять эти приборы на большие высоты.

## 2. ИСКУССТВЕННЫЙ СПУТНИК И ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА ИОНОВ В ИОНОСФЕРЕ

В настоящее время мыслимы и возможны два пути исследования ионного состава ионосферы прямыми методами: подъем соответствующей аппаратуры на ракетах и использование искусственного спутника Земли. Первый путь, как известно, уже используется для получения сведений об ионном составе, однако он, к сожалению, может дать весьма ограниченные сведения, так как длительность полета ракеты в интересующих нас ионизированных областях не превышает нескольких минут. Кроме того, при помощи ракет трудно, если не безнадежно, в настоящее время проводить одновременные исследования с достаточной густотой зондирующих точек, включая сюда и трудно доступные районы Земли. Второй путь (пока еще недоступный исследователям) — это измерение спектра ионов прибором, расположенным на искусственном спутнике Земли. Именно он представляется наиболее обещающим в исследованиях ионного состава ионосферы.

Одним из решающих преимуществ экспериментов, проводимых на спутнике, является продолжительность нахождения измерительной аппаратуры в исследуемых слоях. В сочетании с громадной быстротой передвижения спутника ( $\sim 8$  км/сек) эта особенность делает возможным проведение многократных и почти одновременных наблюдений в пунктах, удаленных друг от друга на десятки тысяч километров. Различие по времени между исследованиями в экваториальной зоне и полярной области может составить не более 20—30 минут. Многократность появления спутника в одних и тех же зонах (период обращения около 90 минут) дает возможность проследить изменения ионного состава во времени — изменения, связанные с изменением солнечной активности в ультрафиолете или в корпускулярных потоках.

Так же хорошо на спутнике должна решаться проблема ионного состава в ночное и дневное время. За 90 минут своего полета спутник будет находиться как на солнечной, так и на теневой стороне Земли, измеряя соответственно дневной и ночной спектры ионов.

Еще одна возможность, представляющаяся при проведении исследований на спутнике, заключается в том, что благодаря вытянутости орбиты измерения ионного состава могут вестись на разных высотах над Землей. Вследствие этого исследования могут охватывать оба наиболее важных слоя ионосферы — слои *E* и *F*. У спутника имеется еще одно существенное преимущество. Ракета, попадая в разреженные слои атмосферы, начинает выделять большое количество «паразитных» газов, которые окружают ракету своеобразным газовым облаком. Это облако состоит из воздуха, который заполняет ракету до подъема, продуктов сгорания топлива, а также из газов, образующихся при интенсивном испарении неизрасходованного горючего. Благодаря краткости ракетного эксперимента, а также громадного запаса загрязняющих атмосферу газов ракета не успевает выйти из загрязненной области, что, естественно, вредно отзывается на измерениях, проводимых у поверхности ракеты.

Совершенно иначе обстоит дело со спутником: тщательно герметизированный небольшой объем его позволяет свести к минимуму выделение газов изнутри, а длительность пребывания спутника в разреженных слоях создает возможность хорошего обезгаживания поверхности спутника и, что особенно важно, обезгаживания внутренностей самих измерительных приборов. На исследование состава ионов это преимущество спутника оказывает хотя и косвенное, но достаточно существенное влияние.

## 3. НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В тех областях атмосферы, где будет находиться искусственный спутник, среда настолько разрежена, что свободные пробеги молекул достигают десятков и сотен метров. Само движение спутника происходит со скоростью, на порядок превышающей газокинетические скорости молекул. Эти условия ставят экспериментатора в очень трудное положение не только с точки зрения выбора подходящих измерительных приборов, но и с точки зрения возможности измерения невозмущенных параметров той среды, где происходит движение спутника.

При изучении ионного состава ионосферы чрезвычайно важно выяснить, истинную или фиктивную ионизацию будет измерять прибор, расположенный на спутнике. Хорошо известно, например, что пролеты метеоров сквозь земную атмосферу сопровождаются интенсивной ионизацией атмосферы. Правда, метеоры летят со скоростями, значительно превышающими 8 км/сек, а ионизация наблюдается в более низких слоях, чем те, где будет двигаться спутник, однако, ввиду важности этого вопроса для результатов всех экспериментов в ионосфере, нам кажется необходимым остановиться на нем подробно. Для того чтобы ионизовать молекулы окружающей среды, тело должно обладать энергией не менее примерно 15 эв. Сам спутник не обладает такой энергией и поэтому непосредственно не может ионизовать встречные молекулы газа. Но молекулы, отскочившие от поверхности спутника со скоростью, равной удвоенной скорости спутника (абсолютно упругий удар), т. е. со скоростью 16 км/сек, уже обладают вполне достаточной энергией для ионизации ударом. В этом и состоит опасность. Чтобы оценить вероятность этой опасности, следует выяснить, упругий или неупругий удар испытывают молекулы газа с быстро двигающейся поверхностью.

В настоящее время трудно решить этот вопрос окончательно, так как нет надежных экспериментальных данных о взаимодействии вещества с молекулами газа при столь больших скоростях. Но по ряду косвенных данных можно предположить, что подавляющее количество молекул будет отражаться от поверхности спутника по законам неупругого удара. Так, например, все современные теории метеоров (Спэрроу, Эпик, Герлофсон) отправляются именно от неупругих столкновений метеора с молекулами газа. Эксперименты также подтверждают неупругий характер взаимодействия между твердой поверхностью и молекулами газа. Поверхность прочно абсорбирует попавшие на нее молекулы, которые лишь по прошествии определенного времени ( $10^{-4}$ — $10^{-5}$  сек.) «испаряются» с поверхности со скоростью теплового движения (Ленгмюр и Кнудсен). Однако, учитывая специфичность эксперимента и трудность однозначного решения вопроса о характере удара, рассмотрим худший случай, когда все молекулы, столкнувшиеся со спутником, отражаются упруго.

Пусть  $N_0$  — число молекул в единице объема в среде, окружающей спутник,  $s_0$  — поверхность спутника, подвергающаяся бомбардировке молекулами,  $v_0$  — скорость движения спутника. За время  $\Delta T$  спутник приведет в интенсивное движение следующее количество молекул:

$$\Delta N = N_0 s_0 v_0 \Delta T. \quad (1)$$

Благодаря хаотическому движению молекул и неровности отражающей поверхности отраженные молекулы направляются к передней половине сферы, центром которой является место первоначального удара\*). Они будут беспрепятственно двигаться на расстоянии свободного пробега, характер-

\*) Это подтверждается шириной «первичных» метеорных следов, которая всегда хорошо согласуется с величиной свободных пробегов молекул на данных высотах.

ного для данных высот, и впервые столкнутся с молекулами окружающей среды на поверхности полусферы радиуса  $\lambda$ , где  $\lambda$  — длина свободного пробега.

За промежуток времени  $\Delta T$  спутник сместится на расстояние  $\Delta\lambda$ , и, следовательно, столкновение «быстрых» молекул с «медленными» молекулами окружающей среды произойдет в слое, ограниченном радиусами  $\lambda$  и  $\lambda + \Delta\lambda$ . Объем половины сферического слоя с указанными радиусами будет

$$V = 2\pi \left( \lambda^2 \cdot \Delta\lambda + \lambda \cdot \Delta\lambda^2 + \frac{\Delta\lambda^3}{3} \right).$$

Полагая здесь  $\Delta\lambda = 1$  и принимая во внимание, что  $\lambda$  — величина порядка  $10^4$ , мы можем без большой погрешности пренебречь в скобках всеми членами, кроме первого. Тогда

$$V = 2\pi\lambda^2. \quad (2)$$

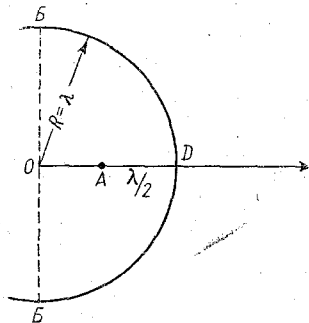
Число соударений  $\eta$  в единице объема за время  $\Delta T$ , учитывая (1) и (2), будет

$$\eta = \frac{\Delta N}{V} = \frac{N_0 s_0 v_0 \Delta T}{2\pi\lambda^2}. \quad (3)$$

Но не все соударения ведут к ионизации. Поэтому, чтобы получить число элементарных актов ионизации  $\eta^*$ , возникающих в единице исследуемого объема, необходимо ввести в (3) коэффициент ионизации  $\alpha$ :

$$\eta^* = \alpha\eta = \alpha \frac{N_0 s_0 v_0 \Delta T}{2\pi\lambda^2}. \quad (4)$$

Рис. 1. Схема взаимодействия спутника с молекулами воздуха в верхних слоях атмосферы.



Чтобы рассчитать, какое количество из этих, вновь образованных ионов встретится со спутником, обратимся к рис. 1. На этом рисунке центр сферы  $O$  — место «первоначального» удара. Отсюда молекулы со скоростью  $2v_0$  разлетаются по передней полусфере  $BB$  с радиусом  $R = \lambda$ . За это же время спутник, пройдя путь в  $\lambda/2$  (так как скорость его вдвое меньше быстрых молекул), будет находиться в точке  $A$ . Принимая во внимание, что образовавшиеся ионы обладают тепловыми скоростями, а скорость спутника превосходит эти скорости на порядок, легко видеть (рис. 1), что при достаточно больших  $\lambda$  со спутником может встретиться лишь незначительная часть порожденных им ионов. Действительно, благодаря указанной разности скоростей первое соударение спутника с этими ионами произойдет на расстоянии  $\lambda/2$  от точки  $D$ .

С достаточным приближением можно показать, что в этом случае на спутник могут попасть ионы только с той части поверхности  $BB$ , которая ограничена окружностью радиуса  $\lambda/20$ . На этом участке поверхности находится  $N^*$  вновь образованных ионов, причем

$$N^* = \eta^* \cdot s_1,$$

где

$$s_1 = \pi \left( \frac{\lambda}{20} \right)^2 = \frac{\pi\lambda^2}{4 \cdot 10^4}.$$

Подставляя значения для  $\eta^*$  и  $s_1$  получим

$$N^* = \frac{\alpha N_0 s_0 v_0 \Delta T}{8 \cdot 10^2}. \quad (5)$$

Ионы  $N^*$ , как, впрочем, и все другие, будут двигаться в любых направ-

лениях, и только небольшая часть их попадет на поверхность спутника. Для простоты рассуждения можно считать, что все  $N^*$  ионов сосредоточены в центре малой сферы с центром в  $D$  и оттуда, распространяясь во все стороны, «облучают» спутник, который находится от  $D$  на расстоянии «первого» столкновения, т. е. на расстоянии  $\lambda/22$ . На этом расстоянии от  $D$  плотность образовавшихся ионов  $\eta_1^*$  будет равна

$$\eta_1^* = \frac{N^*}{s_2}, \quad (6)$$

где

$$s_2 = 4\pi \left(\frac{\lambda}{22}\right)^2 \approx \frac{4\pi\lambda^2}{5 \cdot 10^2}.$$

Подставляя значения  $N^*$  и  $s_2$  в (6), получим:

$$\eta_1^* = \frac{5\alpha N_0 s_0 v_0 \Delta T}{32\pi\lambda^2}. \quad (7)$$

Остается подставить в (7) числовые значения. Согласно Герлофсону для метеоров коэффициент  $\alpha$  принимается равным  $10^{-4}$ , для высоты 250 км  $N_0 = 10^{10}$ ; считая спутник шарообразным с радиусом, скажем, 25 см, имеем  $s_0 = \frac{s}{2} = 4 \cdot 10^4$  см<sup>2</sup>, скорость спутника  $v_0 = 8 \cdot 10^5$  см/сек, а  $\lambda = 10^4$  см. Промежуток времени  $\Delta T$  выберем таким, чтобы спутник за это время сместился на 1 см, т. е.  $\Delta T = 1/8 \cdot 10^{-5}$  сек. Тогда

$$\eta_1^* = \frac{5 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{10} \cdot 4 \cdot 10^4 \cdot 8 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{8} \cdot 10^{-5}}{32 \cdot 3,14 \cdot 10^8} \approx 20 \text{ ионов/см}^3.$$

Таким образом, искусственная ионизация, возникающая в результате движения спутника вблизи его поверхности и равная 20 ионам/см<sup>3</sup>, ничтожна по сравнению с естественной ионизацией, составляющей  $10^5$ — $10^6$  ионов/см<sup>3</sup>. Такое соотношение обусловливается тем, что спутник проходит как бы туннель, ионные стенки которого образуются самим спутником. Благодаря громадной скорости спутника и большим свободным пробегам молекул вновь образовавшиеся ионы в своем подавляющем большинстве не успевают вернуться к спутнику, и с этой точки зрения спутник движется как бы в невозмущенной среде.

На основании вышеизложенного следует считать, что при всех работах на спутнике создаваемой им искусственной ионизацией окружающего пространства можно пренебречь. Этот же вывод следует распространить и на все другие процессы, связанные с высокими энергиями отлетающих от спутника молекул (например, термохимические реакции и др.).

Вторым существенным явлением, связанным с большой скоростью движения искусственного спутника, является наличие глубокого вакуума позади него. Этот вакуум образуется по той причине, что скорость спутника на порядок превышает газокINETические скорости молекул. При своем пролете спутник пробивает в атмосфере туннель, который окружающие молекулы не успевают заполнить. Вследствие этого за спутником образуется «тыльный конус», куда могут проникать лишь электроны да небольшое количество очень быстрых молекул, всегда присутствующих в газе. Измерение ионного состава ионосферы в области этого конуса обречено на полную неудачу, так как приборы, попавшие в «тыльный конус», вообще откажутся работать из-за недостаточной плотности ионов. Если спутник в пространстве не ориентирован, то приходится считаться с тем фактом, что время от времени аппаратура все же будет попадать

в это «мертвое» пространство и показания ее будут равны нулю. Однако отсюда совершенно не следует, что в невозмущенной ионосфере наблюдается отсутствие ионизации. При ориентированном спутнике эта опасность отпадает и указанные измерения можно провести со значительно большей надежностью.

#### 4. ПРИБОРЫ ДЛЯ ПРЯМОГО ИЗУЧЕНИЯ ИОННОГО СОСТАВА ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

Если анализ газового состава атмосферы можно вести несколькими различными способами, то для прямого изучения ионного состава верхней атмосферы, по-видимому, единственно возможным является масс-спектрометрический метод. Установив на летящих в ионосфере ракете или спутнике масс-спектрометр и передавая данные по радио на Землю, можно надеяться получить сведения о массовом составе ионизированных слоев.

Как все приборы, устанавливаемые на ракетах или спутнике, масс-спектрометр должен работать автоматически и быть по возможности малоинерционным. Кроме того, конструкция подобного прибора должна отвечать еще целому ряду специфических требований, а именно: механическая прочность, стойкость к большим перегрузкам, виброустойчивость, способность переносить кратковременные значительные повышения температуры, способность работать в условиях высокого вакуума и т. п.

Широко известные «магнитные» масс-спектрометры, т. е. приборы, в которых для разделения исследуемого образца по массам используются как электрические, так и магнитные поля, являются малоприспособными для этой цели. При всех достоинствах современных магнитных масс-спектрометров (высокая разрешающая способность, большая чувствительность и относительно высокая точность анализа) они обладают рядом недостатков, делающих крайне затруднительным использование их в такого рода экспериментах. Анализатор магнитного масс-спектрометра представляет собой ионно-оптическую систему, необходимыми элементами которой являются, во-первых, магнит и, во-вторых, ряд щелей и диафрагм, формирующих и ограничивающих ионный пучок в приборе. Эти обстоятельства ведут к тому, что размеры и веса подобных приборов оказываются довольно значительными, а сами приборы нуждаются в тщательной регулировке и настройке. Дополнительной трудностью являются крайне малые ионные токи, получаемые с коллектора магнитного масс-спектрометра. Усиление малых постоянных токов сопряжено со значительными экспериментальными трудностями, одной из которых является большая постоянная времени всего устройства, а это, в свою очередь, накладывает ограничения на скорость прохождения спектра масс. Перечисленными причинами, по-видимому, можно объяснить то, что до сих пор не имеется ни одного удачного подъема на ракете магнитного масс-спектрометра.

Наряду с магнитными существует довольно много типов масс-спектрометров, не связанных с использованием магнитного поля в анализаторе ионов. Одним из таких приборов является радиочастотный масс-спектрометр, в анализаторе которого используются аксиальные электрические поля<sup>1</sup>, и одна из его разновидностей — радиочастотный масс-спектрометр типа Беннета<sup>2</sup>. Этот прибор, обладая достаточной разрешающей способностью, может быть сделан в десятки раз легче магнитного масс-спектрометра, работает быстрее и дает на коллекторе на 2—4 порядка большие токи<sup>3</sup>. Важной особенностью последнего прибора является и то, что он в процессе настройки и эксплуатации не требует никакой механической регулировки. Недостатком радиочастотного прибора

является небольшая (по сравнению с магнитными масс-спектрометрами) разрешающая способность. Однако для решения ряда геофизических задач, о которых упоминалось выше, эта разрешающая способность является вполне достаточной. В связи с этим имеет смысл более подробно обсудить основные характеристики радиочастотного масс-спектрометра с точки зрения возможности использования его на искусственном спутнике Земли.

5. РАДИОЧАСТОТНЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТР ТИПА БЕННЕТА

В радиочастотном масс-спектрометре типа Беннета используется принцип разделения ионов по скоростям. Основным элементом прибора является масс-спектрометрическая трубка, представляющая собой электровакуумную лампу особой конструкции с большим числом плоскопараллельных сеток.

Рассмотрим упрощенную схему масс-спектрометрической трубки (рис. 2). На систему, состоящую из трех параллельных равноотстоящих сеток, подается отрицательный пилообразный ускоряющий потенциал  $V$ . Кроме того, на среднюю сетку подается переменное высокочастотное напряжение  $U = U_0 \sin(\omega t \pm \theta)$ , причем амплитуда его мала по сравнению с ускоряющим напряжением ( $U_0 \ll V$ ).

Ион, пролетая эту систему сеток с некоторой скоростью, зависящей от его массы и от величины ускоряющего напряжения в данный момент, приобретает или теряет некоторое количество энергии, тогда как скорость его в первом приближении остается неизменной. Можно показать<sup>2</sup>, что максимум энергии из высокочастотного поля такой трехсеточной системы получит лишь ион, влетевший в нее при некоторой определенной фазе высокочастотного напряжения и прошедший ее с определенной скоростью  $v_0$ . Эта оптимальная скорость сообщается при изменении ускоряющего напряжения по пилообразному закону поочередно ионам всех масс в некотором диапазоне массовых чисел.

Если на пути ионов затем поместить четвертую сетку, на которую подать подходящий положительный тормозящий потенциал, то можно задержать все ионы, кроме тех, которые получили максимум энергии из высокочастотного поля; т. е. именно те, которые прошли систему с оптимальной скоростью.

Так как скорость иона зависит от его массы и ускоряющего напряжения, то, зная значение оптимальной скорости для данной системы сеток и величину ускоряющего напряжения, можно определить массу ионов, преодолевших потенциальный барьер четвертой сетки и попавших на коллектор. Ионный ток коллектора может быть усилен и записан каким-либо регистрирующим прибором. Запись будет представлять собой ряд пиков ионного тока, причем каждый такой пик будет соответствовать ионам определенной массы.

Масса иона связана с ускоряющим пилообразным напряжением следующим соотношением:

$$M = \frac{0,266}{s^2 f^2} V, \tag{8}$$

где  $M$  — массовое число иона,  $V$  — величина пилообразного ускоряющего напряжения в вольтах,  $s$  — расстояние между сетками в сантиметрах,  $f$  — частота в мегагерцах.

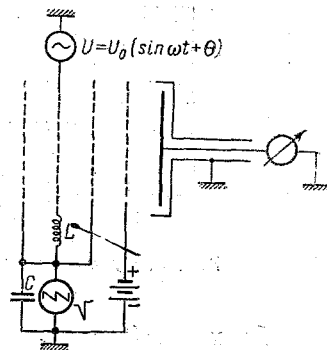


Рис. 2. Упрощенная схема трубки радиочастотного масс-спектрометра.

Практически описанная система работает неудовлетворительно, поэтому в радиочастотном масс-спектрометре Беннетта анализатор ионов представляет собой систему из трех трехсеточных секций, разделенных дрейфовыми пространствами. Эти дрейфовые пространства выбираются такой величины, чтобы время пролета их ионом, летящим с оптимальной (синхронной) скоростью  $v_0$ , было кратно периоду высокочастотного напряжения. Это нужно для того, чтобы ион, подлетевший к первой секции с оптимальной входной фазой высокочастотного напряжения, сохранил ее и для остальных двух секций. Величину дрейфового пространства принято выражать числом периодов высокочастотного напряжения (числом циклов), протекающих за время его пролета ионом.

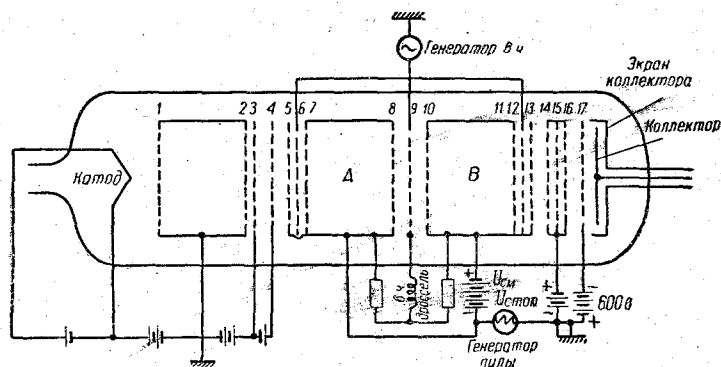


Рис. 3. Схема включения 7—5-циклового трубки радиочастотного масс-спектрометра.

Различные варианты анализаторов масс-спектрометров такого типа могут содержать различное число циклов. Например, имеются варианты 9—7-цикловые, 5—9-цикловые и 7—5-цикловые. На основании опубликованных данных можно сделать вывод, что одним из лучших по разрешающей способности является вариант 7—5-циклового трубки.

Полная схема включения 7—5-циклового масс-спектрометрической трубки приведена на рис. 3. Электроны, эмитируемые накаленным катодом, ускоряются сеткой 1 и, пролетая в пространство между сетками 1 и 2, ионизируют газ, находящийся в трубке. Образовавшиеся ионы вытягиваются из пространства ионизации и ускоряются постоянным отрицательным потенциалом сеток 3 и 4 и пилообразным отрицательным потенциалом сеток анализатора 5—13. К дрейфовым пространствам А и В анализатора приложен потенциал смещения, который подбирается так, чтобы компенсировать некоторое увеличение скорости ионов, происходящее во второй ступени анализатора. За анализатором имеется группа сеток 14, 15, 16, на которые подан положительный тормозящий потенциал. Последняя сетка 17 с высоким отрицательным потенциалом нужна для подавления вторичных электронов, которые могут быть выбиты из сеток трубки или из коллектора.

#### Параметры прибора и область его применения

Радиочастотный масс-спектрометр может быть использован для анализа как нейтральных, так и ионизированных газов, входящих в состав земной атмосферы. При использовании прибора для анализа ионного состава атмосферы ионный источник не нужен, так как его функции выполняет сама ионосфера.



Радиочастотный масс-спектрометр с 7—5-цикловой трубкой имеет разрешение по массам около 20—25. Напомним, что разрешающая способность (разрешение) масс-спектрометра может быть выражена отношением  $R = \frac{M}{\Delta M}$ , где  $M$  — массовое число, которому соответствует определенный пик ионного тока, а  $\Delta M$  — его ширина в единицах массовых чисел, измеренная на определенном уровне (на половине высоты пика, у основания и т. п.). В данном случае разрешающая способность прибора определена по основанию пика, и значение разрешающей способности 25 говорит о том, что прибор в состоянии полностью разрешить, например, массы в 24 и 25 атомных единиц \*).

Интервал масс, в котором работает прибор, как следует из соотношения (8), определяется геометрическими размерами анализатора (расстояние между сетками трехсеточной секции), рабочей частотой и диапазоном изменения ускоряющего напряжения. Например, прибор, описанный Таунсендом<sup>3</sup>, перекрывал диапазон от 5 до 48 атомных единиц массы.

Важной характеристикой прибора является время, за которое может быть получен спектр масс. Для радиочастотного прибора это время равно примерно 1 секунде и в случае необходимости легко может быть уменьшено. Это свойство прибора является чрезвычайно существенным, когда мыслится использование его на быстро летящих объектах — ракетах или искусственном спутнике.

Интервал высот, в котором работает прибор, определяется, с одной стороны, геометрическими размерами трубки (необходимо, чтобы длина свободного пробега была больше или равна длине радиочастотного анализатора), с другой — плотностью ионов, попадающих в анализатор. Из сказанного следует, что область высот над земной поверхностью, где сможет работать ионный масс-спектрометр, ограничена: снизу высотой порядка 100 км (здесь свободные пробеги молекул достигают порядка 10 см), сверху той высотой, где плотность естественных ионов будет еще достаточна для обеспечения нормальной работы прибора.

Элементарный подсчет показывает, что при концентрации положительных ионов порядка  $10^5 \text{ см}^{-3}$  ионные токи с коллектора могут достигать  $10^{-8}$  ампера \*\*). По-видимому, прибор может работать и при меньшей концентрации, порядка  $10^3 \text{ см}^{-3}$ . Как известно, концентрация заряженных частиц в слоях *E* и *F* оценивается по порядку величины  $10^4$  —  $10^6 \text{ см}^{-3}$ . Таким образом, оба эти слоя, высота которых над поверхностью Земли соответствует 200 и  $\approx 400$  км, являются вполне доступными объектами для упомянутых исследований. Точно указать наибольшую высоту, до которой можно использовать ионный масс-спектрометр, в настоящее время не удастся, так как пока неизвестно, на какой высоте ионная концентрация становится меньше  $10^3 \text{ см}^{-3}$ .

В 1954—1955 гг. были проведены первые подъемы на ракетах радиочастотного масс-спектрометра с целью анализа ионного состава верхней атмосферы<sup>4,5,6</sup>. В этих работах были получены некоторые данные о массовом спектре положительных и отрицательных ионов на высотах до 219 км. Не вдаваясь здесь в подробный анализ полученных результатов, укажем только, что они в значительной степени являются пока отрывоч-

\*) Следует заметить, что это значение достигается при использовании прибора лишь для анализа нейтральных газов. Разрешающая способность ионного масс-спектрометра в силу некоторых причин, о которых будет сказано ниже, может значительно отличаться от этой величины.

\*\*) Такого порядка токи и были обнаружены при подъеме масс-спектрометра на ракете<sup>4</sup>.

ными, неясными и даже противоречивыми. Не будет преувеличением сказать, что пока все подъемы ионного радиочастотного масс-спектрометра носили характер отработки методики эксперимента.

#### 6. НЕКОТОРЫЕ ЧАСТНЫЕ ВОПРОСЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Насколько можно судить по опубликованным материалам, сейчас уже выявилась одна серьезная экспериментальная трудность, осложняющая использование радиочастотного масс-спектрометра типа Беннетта в экспериментах по определению ионного состава верхней атмосферы. Речь идет о влиянии собственного заряда, приобретаемого ракетой в ионосфере. Если ракета (или спутник), на которой установлен радиочастотный масс-спектрометр, заряжается отрицательно, то это приводит к изменению режима работы прибора. Во-первых, этот отрицательный потенциал складывается полностью или частично с отрицательным пилообразным ускоряющим потенциалом  $V$  (уравнение (8)), благодаря чему массовая шкала прибора сдвигается в сторону более легких масс. Для каждого отдельного иона определенной массы, попадающего в анализатор, этот дополнительный потенциал будет входить полностью или частично, в зависимости от конфигурации поля вокруг спутника и от расстояния, на котором ион зарождается или испытывает последнее соударение. Это приводит к увеличению разброса по скоростям ионов, входящих в анализатор, и, следовательно, к ухудшению разрешающей способности прибора (расширение пиков на масс-спектрограмме). Во-вторых, этот отрицательный потенциал вычитается (полностью или частично по тем же причинам) из тормозящего потенциала масс-спектрометрической трубки, понижая тем самым эффективный тормозящий потенциал. Это может привести к появлению на масс-спектрограмме ложных (так называемых гармонических) пиков, что затруднит или сделает невозможной ее расшифровку. Ввиду того, что причины появления отрицательного заряда в настоящее время еще не ясны, а экспериментального материала в данной области тоже почти нет, учет влияния этого фактора представляется затруднительным\*).

Учитывая те положительные результаты, которые достигнуты с применением радиочастотного масс-спектрометра на ракетах, легко видеть, насколько целесообразной представляется установка подобного прибора на искусственном спутнике Земли. Действительно, как уже указывалось выше, установленный на спутнике масс-спектрометр позволит получить подробные сведения о составе ионосферы на различных высотах (в интервале высот спутника) в различное время суток и в самых различных точках над земной поверхностью. В частности, при надлежащем выборе орбиты можно будет получить сведения из труднодоступных полярных районов земного шара. С точки зрения количества полученной информации один удачный запуск спутника должен быть равноценен сотням ракетных экспериментов.

Следует, однако, отчетливо представлять себе, что те экспериментальные трудности, с которыми связано использование радиочастотного масс-спектрометра на ракетах, возрастут во много раз при установке прибора на спутник. Например, нарушения нормальной работы прибора, связанные с собственным зарядом спутника, в гораздо большей степени затруднят получение и обработку экспериментальных данных, так как

\* ) Радикальным решением явилась бы установка вместе с масс-спектрометром прибора, измеряющего собственный заряд спутника, который, соответственно измеренному заряду, изменял бы тормозящий потенциал масс-спектрометра. Однако первая трудность — ухудшение разрешающей способности прибора — этим не снимается.

заряд будет меняться в зависимости от высоты полета спутника, его географических координат и времени суток. В частности, для прибора, устанавливаемого на спутнике, по-видимому, обязательно нужно будет предусмотреть автоматическую подстройку тормозящего потенциала в зависимости от заряда, приобретенного спутником.

Специфической трудностью, осложняющей проведение некоторых экспериментов на спутнике, является большая скорость его перемещения по орбите. Выше были разобраны некоторые из возникающих в связи с этим трудностей. Остановимся теперь на непосредственном влиянии скорости спутника на работу описанного радиочастотного масс-спектрометра. Рассмотрим три основных случая ориентации входного отверстия масс-спектрометрической трубки по отношению к вектору скорости спутника.

а) Входное отверстие направлено назад. Как было показано выше, за спутником образуется конус «молекулярной тени» и в анализатор может попасть только очень небольшое количество быстрых ионов, которых не хватит для нормальной работы прибора.

б) Входное отверстие направлено вперед. В этом случае на составляющие тепловых скоростей ионов, направленных по оси трубки, будет наложена скорость  $v = 8 \cdot 10^5$  см/сек. Эта скорость не вызовет дополнительного разброса тепловых скоростей ионов и не ухудшит разрешения по массам. Она лишь приведет к некоторому сдвигу пиков ионного тока прибора на шкале масс в сторону меньших массовых чисел. Это произойдет потому, что радиочастотный масс-анализатор работает по существу как фильтр скоростей, пропуская на коллектор ионы, прошедшие анализатор с некоторой определенной (синхронной) скоростью. пилообразное напряжение развертки сообщает эту синхронную скорость поочередно всем ионам, масса которых входит в диапазон прибора. Если ионы до входа в анализатор уже имеют некоторую упорядоченную скорость, направленную вдоль оси трубки, то синхронная скорость будет для всех масс достигаться при меньшем напряжении развертки и, следовательно, соответствующие пики ионного тока окажутся сдвинутыми в сторону легких масс.

Сдвиг будет различным для ионов разных масс. Попробуем оценить его. Добавочная скорость  $v = 8 \cdot 10^5$  см/сек эквивалентна изменению ускоряющего пилообразного напряжения радиочастотного анализатора на величину

$$\Delta V_{\text{экр}} = \frac{m}{2q} v^2,$$

где  $m$  — масса иона,  $q = 4.8 \cdot 10^{-10}$  CGSE — заряд иона,  $v = 8 \cdot 10^5$  см/сек — добавочная скорость. Для однократно заряженных ионов молекулярного водорода ( $M = 2$ ) получаем  $\Delta V_{\text{экр}} = 0,68$  в. Для ионов аргона ( $M = 40$ )  $\Delta V_{\text{экр}} = 13,6$  в.

Радиочастотный масс-спектрометр, описанный Таунсендом<sup>3</sup>, имел постоянную, примерно равную 5 в/ат. ед. массы. Следовательно, для него в этом случае пики ионного тока оказались бы сдвинутыми для водорода на 0,136 ат. ед. массы и для аргона на 2,72 ат. ед. массы. (Относительное уменьшение массового числа — 6,8%.) Таким образом, в случае, когда входное отверстие масс-спектрометра расположено по направлению полета спутника, постоянная прибора изменяется на вполне ощутимую величину, что необходимо учитывать при расшифровке спектров.

в) Входное отверстие радиочастотного масс-спектрометра расположено перпендикулярно направлению полета спутника. В этом случае ни разрешение

прибора, ни его массовая шкала измениться не должны. Может иметь место лишь кажущееся уменьшение относительного содержания тяжелых ионов, происходящее за счет неодинакового диафрагмирования ионного пучка кольцами входных (затягивающих) сеток на участке трубки до радиочастотного анализатора. Оценить этот эффект возможно, лишь рассмотрев конкретную конструкцию масс-спектрометрической трубки и задавшись определенными потенциалами входных сеток и корпуса спутника. В самом анализаторе составляющая скорости ионов, направленная перпендикулярно оси трубки, уже не вызовет такого эффекта, так как в анализаторе все ионы, которые достигают коллектора, движутся со скоростью, не зависящей от их массы.

Из сказанного следует, что при установке масс-спектрометра на спутник, ориентированный в пространстве, способ в) является наиболее приемлемым, способ б) также приемлем, а способ а) совершенно неприемлем. В случае неориентированного спутника необходимо знать для каждого момента времени ориентацию входного отверстия масс-спектрометра и учитывать ее при обработке полученных спектров.

### Затруднения технического порядка

Кроме рассмотренных трудностей принципиального характера, при установке масс-спектрометра на спутник неизбежно возникнет ряд затруднений конструктивного и технического характера. Прежде всего, следует указать на то, что габариты и вес радиочастотного масс-спектрометра еще слишком велики. Так, например, прибор Таунсенда<sup>3</sup> с питанием на несколько минут работы (вертикальный пуск) весил 20 кг и занимал объем около 13 литров.

Другое серьезное ограничение в применении масс-спектрометра на спутнике, по-видимому, будет наложено емкостью запоминающего устройства радиотелеметрической системы. Для передачи массового спектра, который может включать в себя несколько десятков пиков ионного тока, требуются радиотелеметрические каналы с высоким разрешением. Так, например, в одном из экспериментов с радиочастотным масс-спектрометром<sup>6</sup> для передачи массового спектра использовались три канала с опросностью около 300 в сек. и один высокоопросный канал с опросностью 1200 в сек. Для непосредственной передачи с ракеты существующие радиотелеметрические системы удовлетворяют необходимым требованиям в отношении объема передаваемой информации. Задача же создания столь емкого запоминающего устройства на время, которое требуется для пролета спутника между двумя приемными станциями и передачи всей накопленной информации за короткий промежуток времени, по-видимому, представляет значительные трудности.

### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. P. A. Redhead, Canadian J. of Phys. **30**, № 2 (1952).
2. W. H. Bennett, J. of App. Phys. **21**, № 2 (1950).
3. J. W. Townsend, Rev. Sci. Inst. **23**, № 10 (1952).
4. C. Y. Johnson, E. B. Meadows, J. of Geophys. Res. **60**, № 2 (1955).
5. C. Y. Johnson, J. P. Heppner, J. of Geophys. Res. **60**, № 4 (1955).
6. E. B. Meadows, J. W. Townsend, J. of Geophys. Res. **61**, № 3 (1956).