

Д О К Л А Д Ы
АКАДЕМИИ НАУК СССР

1963

Том 151, № 3

К. И. ГРИНГАУЗ, Б. Н. ГОРОЖАНКИН, Н. М. ШЮТТЕ, Г. Л. ГДАЛЕВИЧ

**ВЫСОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
В ИОНОСФЕРЕ И ПЕРЕХОДНАЯ ОБЛАСТЬ МЕЖДУ КИСЛОРОДНЫМ
И ГЕЛИЕВЫМ ИОННЫМИ СЛОЯМИ ПО ДАННЫМ ОПЫТОВ
С ИОННЫМИ ЛОВУШКАМИ НА СПУТНИКЕ «КОСМОС-2»**

(Представлено академиком А. Л. Минцем 28 II 1963)

К важнейшим результатам советских ионосферных измерений, проведенных при помощи геофизических ракет и спутников во время МГГ⁽¹⁻⁶⁾, относится установление ранее неизвестных особенностей внешней ионосферы (лежащей над главным максимумом ионизации): а) уменьшение концентрации заряженных частиц с ростом высоты в районе, близком к максимуму, во внешней ионосфере происходит значительно медленнее, чем увеличение ее при росте высоты ниже главного максимума; б) внешняя ионосфера до высот $h \sim 1000$ км состоит в основном из ионов атомарного кислорода (O^+).

В 1959—1960 гг. эти результаты были подтверждены американскими опытами на ракетах и спутниках (например, ^(7, 8)). В частности, опыты с ионными ловушками Р. Бордо, Г. Уиппла и др., проведенные на спутнике «Эксплорер-8», запущенном в 1960 г., подтвердили, что до высот ~ 1000 км существовал слой, состоявший в основном из ионов O^+ . Кроме того, они пришли к заключению, что на больших высотах (до ~ 1600 км) существовал слой, содержащий также значительное количество ионов гелия He^+ ⁽⁸⁾.

Опыты, проведенные авторами настоящего сообщения при помощи спутника «Космос-2», запущенного 6 IV 1962 г., свидетельствуют о том, что указанные выше особенности внешней ионосферы, по-видимому, присущи ей лишь в период, близкий к максимуму солнечной активности, и меняются со временем.

На этом спутнике, имевшем орбиту с перигеем $h_{\min} \approx 212$ км, апогеем $h_{\max} \approx 1546$ км и наклоном к экватору 49° , был проведен ряд опытов, относящихся главным образом к изучению ионосферы. В числе других приборов были 8 плоских трехэлектродных ионных ловушек, расположенных на поверхности спутника, каждая в одном из 8 октантов, на которые можно разделить пространство, так что углы между нормальными к внешним сеткам для любых соседних ловушек составляли $\leq 90^\circ$. Внешние сетки этих ловушек имели потенциал корпуса спутника. На спутнике имелись также сферические трехэлектродные ионные ловушки, напряжения на внешних сетках которых менялись относительно корпуса спутника по закону биполярных пилообразных импульсов; эти ловушки были удалены от поверхности спутника подобно тому, как это было сделано на третьем советском спутнике. Принцип работы сферических ионных ловушек был изложен в ⁽⁹⁾ и более полно в ⁽⁶⁾. Внутренние сетки во всех ловушках имели постоянный отрицательный потенциал относительно их коллекторов и предназначались для подавления фотоэмиссии и вторичной эмиссии электронов с коллекторов.

Во время ряда оборотов спутника вокруг Земли осуществлялось запоминание значений коллекторных токов всех ловушек и напряжений на внешних сетках сферических ловушек вдоль всей орбиты спутника с воспроизведением запомненной информации при пролете вблизи приемных пунктов над территорией СССР. Запоминание указанной информации производилось со скоростью 12 опросов в секунду по каждому измерительному каналу, что позволяло достаточно детально регистрировать изменения токов в плоских и сферических ловушках (длительность рабочего хода пилообразного напря-

жения на оболочках последних была 2 сек). Предварительные результаты части опытов, проведенных на спутнике «Космос-2», приводятся ниже.

На рис. 1 приведены графики изменений концентрации положительных ионов n_i вдоль орбиты спутника во время шести оборотов спутника вокруг Земли, построенные в виде функций от высоты над Землей. Значения n_i на рис. 1 получены по данным системы плоских ловушек следующим образом. Были построены графики коллекторных токов I_c , являющиеся верхними огибающими поля точек, соответствующих значениям коллекторных токов всех восьми плоских ловушек. Таким образом, в данный момент зна-

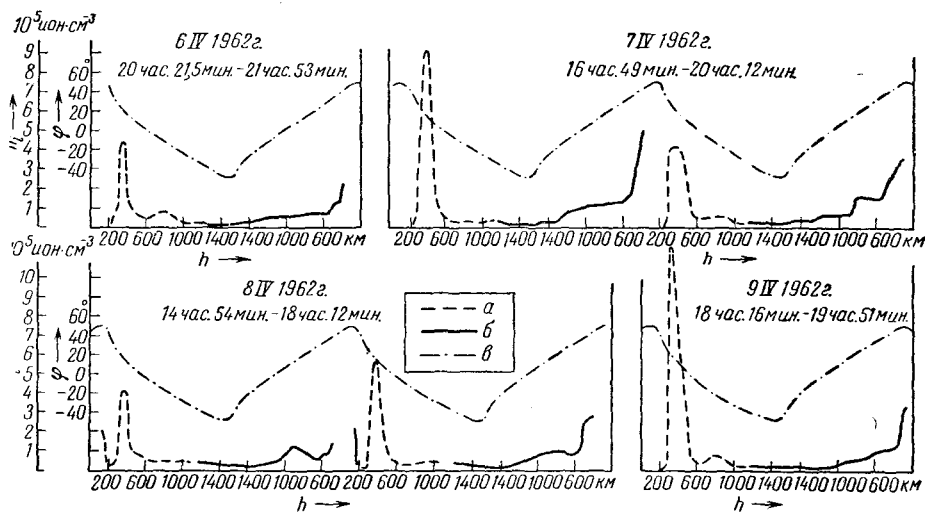


Рис. 1. Зависимость концентрации положительных ионов n_i от высоты h . a — неосвещенные участки орбиты; b — освещенные участки; v — широта φ° . Время московское. Изменение высоты слева направо

чение I_c соответствовало току в той из этих восьми ловушек, нормаль к которой наиболее близка к направлению вектора скорости спутника. Из значений I_c определялись n_i при помощи соотношения

$$n_i = \frac{I_c}{\alpha S e V_{\text{сп}}}, \quad (1)$$

где S — поверхность внешней сетки плоской ловушки, α — суммарная прозрачность двух ее сеток, e — заряд электрона и $V_{\text{сп}}$ — полная скорость спутника. Так как $V_{\text{сп}}$ меняется вдоль орбиты медленно и сравнительно в небольших пределах, то график n_i на рис. 1 довольно хорошо соответствует ходу изменений I_c . Возможность использования (1) для приближенного определения n_i следует из (10, 6).

Из рис. 1 видно, что уменьшение n_i с ростом высоты над главным максимумом ионизации при всех оборотах спутника вокруг Земли, к которым относятся приведенные графики, носит один и тот же характер — оно происходит значительно быстрее, чем по данным 1958 г. (см. сводный график в (11)), так, что указанная выше особенность внешней ионосферы а) отсутствует. Можно предположить, что это связано с изменением химического состава ионов на рассматриваемых высотах, а именно с опусканием слоя ионов O^+ (вызванным, например, охлаждением верхней атмосферы в связи с уменьшением солнечной активности).

Подтверждение правильности такого толкования можно получить при помощи анализа вольт-амперных характеристик сферической ионной ловушки. Впервые на масс-спектрометрические возможности ионных ловушек на спутнике указали К. И. Грингауз и М. Х. Зеликман (9). Нами были использованы относящиеся к области вне ионной тени, создаваемой спутником, данные сферической ловушки, укрепленной на штанге длиной 65 см. Поль-

зуюсь соотношением (9а), приведенным в (6), можно по крутизне верхнего линейного участка вольт-амперной характеристики найти сумму отношений парциальных концентраций ионов к соответствующим массовым числам для каждой высоты над Землей. На тех же вольт-амперных характеристиках оказалось возможным определить точки, соответствующие нулевому потенциалу внешней сетки относительно нейтральной плазмы, по началу появления значительных электронных токов на внешнюю сетку ловушки. По этим точкам легко определялась полная концентрация положительных ионов, так как при нулевом потенциале эффективное сечение ловушки с точки зрения собирания ионов равно ее геометрическому сечению.

Обозначая через n_k парциальные ионные концентрации, через m_k — соответствующие массовые числа ионов, а через $m'_{\text{ср}}$ — приведенное среднее массовое число, имеем:

$$\frac{n_i}{m'_{\text{ср}}} = \sum_k \frac{n_k}{m_k} = F(h),$$

$$n_i = \sum_k n_k = G(h). \quad (2)$$

Из системы уравнений (2) находим

$$m'_{\text{ср}} = G(h) / F(h). \quad (3)$$

Рис. 2. Переходная область от ионов атомарного кислорода к ионам гелия. (7 IV 1962 г., 17 час. 04 мин. — 17 час. 08. мин. московского времени). 1 — зависимость приведенного среднего массового числа $m'_{\text{ср}}$ от высоты h ; 2 — относительное содержание O^+ ; 3 — относительное содержание He^+

Получаемая из (3) величина $m'_{\text{ср}}$ отличается от обычно вводимого среднего массового числа $m_{\text{ср}}$, однако в случае наличия ионов только одной массы $m'_{\text{ср}} = m_k$.

Если идеализировать реальный химический состав ионосферы и считать, что в рассматриваемой области доминируют ионы двух типов с различными массами, а ионы с другими массами можно не учитывать, т. е. предположить двухкомпонентный ионный состав ($k = 1, 2$), то из (2) получим также ионные концентрации:

$$n_1 = \frac{m_2 F(h) - G(h)}{m_2 / m_1 - 1}, \quad n_2 = G(h) - n_1. \quad (4)$$

В качестве примера на рис. 2, 1 (согласно (3)) представлена зависимость $m'_{\text{ср}}(h)$ по результатам измерений, проведенных 7 IV 1962 г. на неосвещенном участке орбиты вскоре после перехода границы с освещенным участком. Из этой кривой следует, что в интервале высот от ~ 520 км до ~ 610 км $m'_{\text{ср}}$ изменялось от 16 до 4. Считая, что в этой переходной области присутствуют лишь ионы He^+ и O^+ ($m_1 = 4$, $m_2 = 16$), находим из (4) n_1 и n_2 . На рис. 2, 3 представлено относительное содержание ионов гелия $n_1 / (n_1 + n_2)$ и на рис. 2, 2 — ионов атомарного кислорода $n_2 / (n_1 + n_2)$ в зависимости от высоты. В рамках сделанных предположений равное содержание He^+ и O^+ имело место на высоте ~ 580 км.

На высотах менее 520 км прямолинейные участки вольт-амперных характеристик оказались очень короткими и не позволили определить их крутизну с достаточной точностью. Поэтому к значениям $m'_{\text{ср}}$ при $h < 520$ км (см. рис. 2) следует относиться с осторожностью. Расчет по формулам (4) в предположении $m_1 = 1$, $m_2 = 16$ (H^+ , O^+) приводит к переходной области, лежащей существенно выше 600 км, что не согласуется с видом кривых $n_i(h)$ на рис. 1.

Единственными масс-спектрометрическими измерениями во внешней ионосфере (вплоть до высот ~ 1000 км) в период, близкий к максимуму солнечной активности, были измерения В. Г. Истомина в 1958 г. на третьем советском спутнике, в которых использовался прибор с диапазоном массовых чисел ионов от 6 до 48, т. е. ионы He^+ регистрироваться не могли⁽⁵⁾. В связи с этим возникает вопрос — не существовали ли ионы He^+ в значительных количествах на высотах ~ 600 км и в то время? Хотя сами результаты опыта⁽⁶⁾ не могут дать ответа на этот вопрос, совместный анализ их с результатами измерений, выполненных при помощи сферических ионных ловушек на том же спутнике, позволяет утверждать, что тогда на высотах 600—800 км значительных количеств ионов He^+ не было. О том же свидетельствуют проведенные в 1960 г. американские опыты⁽⁸⁾.

Таким образом, имеются существенные основания для того, чтобы считать, что во время измерений на спутнике «Космос-2» структура внешней ионосферы отличалась от ее структуры в период 1958—1960 гг. тем, что переходная область между слоем, в котором доминируют ионы O^+ , и слоем, в котором доминируют ионы He^+ , находилась на значительно меньших высотах, что вызвало соответствующие изменения высотного хода n_i .

Графики, приведенные на рис. 1, соответствуют периоду магнитных и ионосферных возмущений; возмущения такой же интенсивности имели место во время полета третьего спутника, например, 31 V — 2 VI 1958 г., однако они не вызвали тогда изменений характера высотного распределения ионов во внешней ионосфере. Поэтому описанные в настоящем сообщении особенности структуры ионосферы, по-видимому, не следует связывать с указанными возмущениями.

Опускание слоя ионов O^+ при уменьшении солнечной активности было теоретически предсказано в 1960 г. Хэнсоном и Ортенбергером, которые, еще не зная о существовании в ионосфере слоя ионов He^+ , рассматривали явления в предпологавшейся тогда переходной области между слоями O^+ и H^+ ⁽¹²⁾ и рассчитали, что эта область опустится с высоты ~ 1500 км до высоты ~ 1000 км.

Результаты, описанные в настоящем сообщении, удовлетворительно согласуются с теоретическими расчетами Харриса и Пристера, относящимися к изменениям высотного хода среднего молекулярного веса нейтральных частиц в верхней атмосфере в связи с изменениями солнечной активности⁽¹³⁾.

Авторы выражают благодарность Г. Н. Злотину и И. Д. Дмитриевой за существенную помощь в обработке результатов экспериментов, которая в настоящее время продолжается.

Поступило
14 II 1963

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ К. И. Грингауз, ДАН, 120, 1234 (1958). ² Я. Л. Альперт, Ф. Ф. Добрякова, Э. Ф. Чудесенко, Б. С. Шапиро, УФН, 65, 161 (1958). ³ А. Н. Казанцев, Т. С. Романова, А. Я. Клементенко, Радиотехника и электроника, 3, 1107 (1958). ⁴ V. I. Krasovskiy, Proc. IRE, 47, 289 (1959). ⁵ В. Г. Истомин, Сборн. Искусственные спутники Земли, в. 4, 1960, стр. 171. ⁶ К. И. Грингауз, В. В. Безруких, В. Д. Озеров, Сборн. Искусственные спутники Земли, в. 6, 1961, стр. 63. ⁷ W. W. Verning, J. Geophys. Res., 65, 2589 (1960). ⁸ R. E. Bourdeau, E. C. Whipple Jr. et al., J. Geophys. Res., 67, 467 (1962). ⁹ К. И. Грингауз, М. Х. Зелкман, УФН, 63, 239 (1957). ¹⁰ E. C. Whipple Jr., Proc. IRE, 47, 2023 (1959). ¹¹ K. I. Gringauz, Space Res., 2, Amsterdam, 1961, p. 574; К. И. Грингауз, Сборн. Искусственные спутники Земли, в. 12, 1962, стр. 105. ¹² W. V. Hanson, I. V. Ortenburger, J. Geophys. Res., 66, 1425 (1961). ¹³ J. Harris, W. Priest, J. Geophys. Res., 67, 4585 (1962).