

Д О К Л А Д Ы
АКАДЕМИИ НАУК СССР

1966

т. 170, № 6

К. И. ГРИНГАУЗ, В. В. БЕЗРУКИХ, М. З. ХОХЛОВ,
Г. Н. ЗАСТЕНКЕР, А. П. РЕМИЗОВ, Л. С. МУСАТОВ

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ
ЛУННОЙ ИОНОСФЕРЫ, ПРОВЕДЕННЫХ НА ПЕРВОМ
ИСКУССТВЕННОМ СПУТНИКЕ ЛУНЫ

(Представлено академиком А. Л. Минцем 23 VII 1966)

На космическом аппарате Луна-10 в числе других приборов были установлены две ловушки заряженных частиц, предназначенные для регистрации положительных ионов и электронов низких энергий⁽¹⁾. В настоящем сообщении приводятся предварительные результаты обработки данных, полученных с помощью этих ловушек.

Гипотезы о существовании вблизи Луны области с повышенной (по сравнению с межпланетным пространством) концентрацией заряженных частиц — ионосферы Луны, основаны на том, что гравитационное поле Луны достаточно для удержания атомов тяжелых газов (например, аргона), источником которых могут быть как потоки солнечной плазмы, так и радиоактивный распад калия. Кроме того, испаряющиеся с поверхности Луны атомы водорода (нейтрализовавшиеся протоны солнечного ветра) вследствие перезарядки с положительными ионами потоков солнечного ветра также могут создавать некоторую концентрацию протонов малых энергий вблизи Луны. Расчеты⁽²⁻⁴⁾ для различных моделей ионосферы приводят к концентрации частиц в пределах $5 \cdot 10^1 \div 10^3 \text{ см}^{-3}$. Экспериментальные оценки верхней границы электронной концентрации n_e в окололунном пространстве были получены по наблюдению рефракции радиоволн при затмении Луной ряда радиоисточников. По затмению Крабовидной туманности в 1956 г. была получена оценка $n_e \sim 10^3 - 10^4 \text{ см}^{-3}$ в зависимости от высоты однородной атмосферы h от 80 до 5000 км⁽⁵⁾. В 1963 г. по наблюдению затмения радиоисточника 3С273 верхняя граница n_e у поверхности Луны была понижена до величины 100—200 см^{-3} (в предположении, что $h \sim 80 \text{ км}$)^(6, 7).

Трудности непосредственного измерения концентрации заряженных частиц в ионосфере Луны, помимо малости определяемой величины, усугубляются неопределенностью сведений об электрическом потенциале спутника. В связи с этим на Луне-10 применены как ловушка, предназначенная для измерения концентрации тепловых положительных ионов, регистрация которых возможна, если потенциал спутника $\varphi_{сп} \lesssim 0$, так и ловушка, предназначенная для измерения концентрации тепловых электронов, регистрируемых при $\varphi_{сп} \gtrsim 0$. Схема ловушек и величины напряжений на электродах относительно корпуса спутника показаны на рис. 1. Ионная ловушка (а) является модуляционной и состоит из двух идентичных ловушек с соединенными коллекторами, близких по конструкции к ловушке, описанной в⁽⁸⁾. Такая конструкция позволяет значительно расширить угловую характеристику ловушки. На модуляционную сетку подавалось переменное напряжение прямоугольной формы от -3 до $+7$ в. Переменная составляющая коллекторного тока регистрировалась резонансным усилителем, настроенным на частоту модуляции.

В конструкцию электронной ловушки по сравнению с трехэлектродными ловушками с постоянными потенциалами на электродах, установленными на других советских космических аппаратах^(8, 9), были внесены изменения для уменьшения величины фототока с внешней сетки и деталей ее крепления. Потенциалы внешних сеток ловушек раз в 2 мин. меня-

лись скачком
либо +50 л
тронной л
отрицателе
Располо
на плоско
показаны о
Если ск
рата превь
ней теплов
ионной лон
висит от ор
ки по отно
Измерения
дой из р
производи
диосвязи о
риоде врап
Возможно,
ренные зн
вольные нер
шая часть
числа ~ 4
(3 ÷ 5) · 10³
На рис.
измеренные
Луны в пре
на различн
(построенно
ных оборота
 I_p от H о
в хвосте
подтверждае
частиц на
вом случае
 $I_p'' = (3,1 \pm 0,1) \cdot 10^3$
лушки опре
см. далее), т
виду их кон
значения I_p
с направле
ню 0,1) сост
жение (при
Луны) пред
Эффекти
том всего из
границы кон
скорость сп
(т. е. если с
ионосфера с
оценка долж
Ток элек
лется в шир
можно разд
шие» токи (с
межуточные
«Больши
лушку в пр

лись скачкообразно и составляли либо 0, либо -50 в для ионной и либо 0, либо $+50$ в для электронной ловушки. Сигнал на выходе усилителя электронной ловушки пропорционален коллекторному току, если последний отрицателен, и отсутствует, если ток положителен.

Расположение ловушек на аппарате Луна-10 и проекция орбиты Луны на плоскость эклиптики для рассматриваемых моментов времени показаны схематически (1).

Если скорость космического аппарата превышает или близка к средней тепловой скорости ионов, то ток ионной ловушки I_p существенно зависит от ориентации плоской ловушки по отношению к вектору скорости. Измерения коллекторных токов каждой из рассматриваемых ловушек производились во время сеансов радиосвязи один раз в 2 мин. при периоде вращения спутника ~ 40 сек. Возможно, что именно поэтому измеренные значения I_p менялись довольно нерегулярным образом. Большая часть отсчетов (из общего числа ~ 450) лежит в пределах $(3 \div 5) \cdot 10^{-12}$ а.

На рис. 2 показаны значения I_p , измеренные в межпланетном пространстве (А) и во время пребывания Луны в предполагаемом продолжении «хвоста» магнитосферы Земли (1) на различных высотах H от поверхности Луны (В). Из графика (построенного с использованием значений I_p , полученных на различных оборотах спутника вокруг Луны) видно, что заметная зависимость I_p от H отсутствует. Сравнение значений I_p при нахождении Луны в хвосте магнитосферы Земли и в межпланетном пространстве подтверждает сделанный в (1) вывод о различии потоков заряженных частиц на орбите Луны в этих областях пространства. (Так, в первом случае среднее значение $I_p' = (2,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-12}$ а, а во втором $I_p'' = (3,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-12}$ а.) Если считать, что ток модуляционной ловушки определяется только тепловыми ионами (о другой возможности см. далее), то по измеренным значениям I_p можно оценить верхнюю границу их концентрации, предполагая, что $\varphi_{\text{сн}} \lesssim 0$ и что максимальные значения I_p соответствуют совпадению нормали к коллектору ловушки с направлением вектора скорости. Сектор обзора этой ловушки (по уровню 0,1) составляет $\sim 1/3$ всего пространства, поэтому последнее предположение (при большом числе измерений на разных участках орбиты вокруг Луны) представляется весьма вероятным.

Эффективная площадь коллектора ловушки составляет 14 см^2 . С учетом всего изложенного максимальные значения I_p дают оценку верхней границы концентрации ионов $n_i \sim 100 \text{ см}^{-3}$, если считать направленную скорость спутника ($\sim 1 \text{ км/сек}$) много большей тепловой скорости ионов (т. е. если считать ионосферу Луны состоящей из тяжелых ионов). Если ионосфера состоит из ионов водорода с температурой $\sim 10^3 - 10^4 \text{ К}$, эта оценка должна быть несколько (в 2—3 раза) понижена.

Ток электронной ловушки I_e в большинстве сеансов измерений колеблется в широких пределах от 10^{-10} до $2,2 \cdot 10^{-9}$ а (см. рис. 3). Все отсчеты можно разделить на две довольно резко отличающиеся группы — «большие» токи ($(1,8 \div 2,2) \cdot 10^{-9}$ а) и «малые» токи ($(1 \div 9) \cdot 10^{-10}$ а), а промежуточные между этими значениями тока почти не встречаются.

«Большие» значения I_e , по-видимому, объясняются попаданием в ловушку в процессе вращения спутника потока фотоэлектронов, эмиттируе-

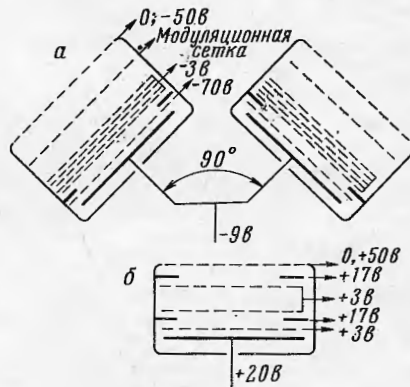


Рис. 1

мых под действием солнечного излучения с близлежащих участков поверхности космического аппарата. Оценка фототока с сеток ловушки с учетом лабораторных измерений дает $(3-4) \cdot 10^{-10}$ а. «Малые» значения I_e в случаях, когда Луна находится в хвосте магнитосферы Земли (см., например, рис. 3А) и в межпланетном пространстве (см. рис. 3Б), также

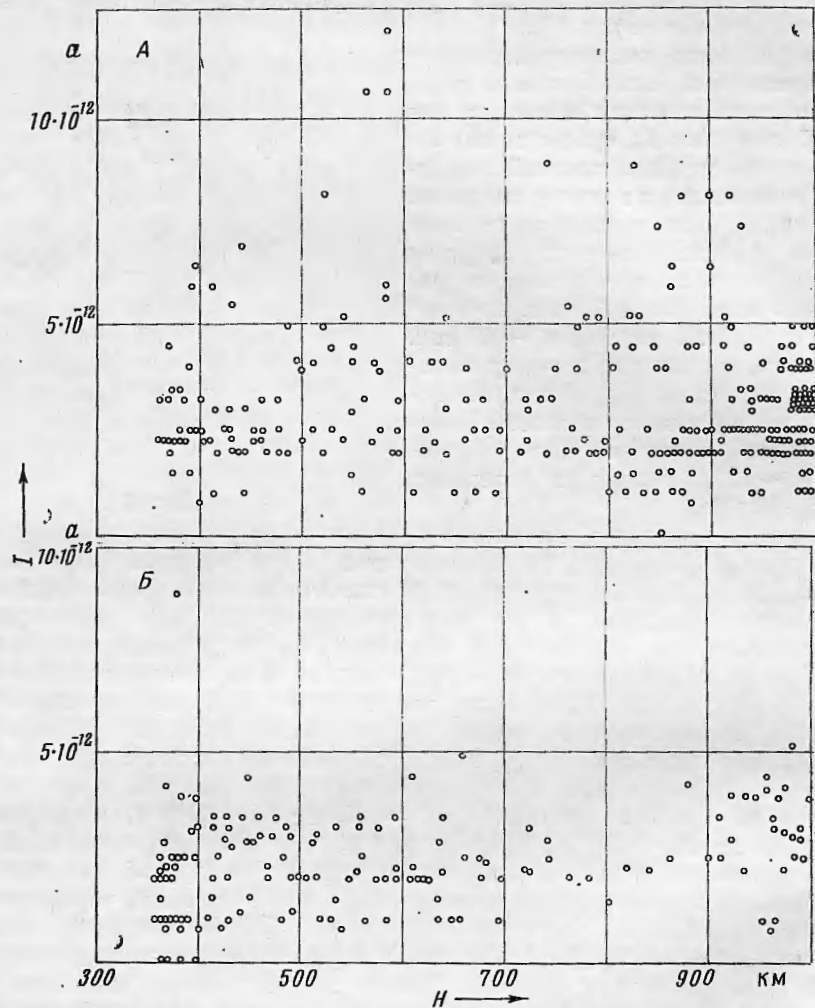


Рис. 2

заметно различаются. Так, в магнитосфере среднее значение I_e равно $(4,8 \pm 0,1) \cdot 10^{-10}$ а, тогда как в межпланетном пространстве I_e не падает ниже $4 \cdot 10^{-10}$ а, а среднее ее значение $(7,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-10}$ а.

Интерпретируя «малые» значения токов как создаваемые изотропными потоками электронов и предполагая $\varphi_{сп} \geq 0$, можно оценить верхнюю границу концентрации электронов низких энергий в окололунном пространстве. Для указанных средних значений с учетом возможного сдвига нулевого уровня за счет попадающих в ловушку потоков ионов с $E > 20$ эв оценка концентрации электронов с энергией $E \sim 1$ эв дает $n_e \sim 80 \text{ см}^{-3}$ для Луны, находящейся в межпланетном пространстве, и $n_e \sim 60 \text{ см}^{-3}$ для Луны в земной магнитосфере.

Представляет интерес оценка величины n_e по данным, полученным во время сеанса 3 V 1966 г, когда спутник находился в тени Луны и фототок

должен
до ~2
Возмож
следств
ных а
щения
верхно
Сле
тов, им
ниях с
ной ло
жет при
происх
токов,
шению
границ
заряже
Луны.
при на
ряженн
некотор
модуля
жение
ваемой
ционал
для оце
интегра
протоно
что бли
сутстви
ла на в
же сви
ционно
превып
привес
центра
Оце
исправ
гий др
торны
оценки
роны,
ки соз
обстоя
верхне
Мо
вых з
ионной
всего
эффе
нейше
1 F
Ре ми
don —
Hint
Phil. M
Nature
P. A.
Грив
ствени

пунктов поверхности ловушки с учетом изменения I_e в слупе (см., напр. 3B), также



должен был отсутствовать. В этом сеансе ток электронной ловушки упал до $\sim 2 \cdot 10^{-11}$ а, что с учетом указанного сдвига нуля дает $n_e \sim 15-20 \text{ см}^{-3}$. Возможно, однако, что уменьшение тока электронной ловушки является следствием смещения потенциала спутника в сторону отрицательных значений (из-за прекращения фотоэмиссии с его поверхности).

Следует указать на ряд эффектов, имеющих место при измерениях с модуляционной и электронной ловушками, учет которых может привести к иным объяснениям происхождения наблюдавшихся токов, и, следовательно, к уменьшению указанных оценок верхней границы концентрации тепловых заряженных частиц в ионосфере Луны. В модуляционной ловушке при наклонном падении пучка заряженных частиц имеет место в некоторой, хотя и малой, степени,

модуляция потока ионов с энергией $E \gg eU_m$ (U_m — переменное напряжение на модуляционной сетке). Ориентировочный расчет для рассматриваемой ловушки показывает, что переменная составляющая тока пропорциональна тысячным долям потока протонов солнечного ветра. Приняв для оценки максимальную величину потока солнечного ветра, измеренную интегральными ловушками на спутнике Луна-10⁽¹⁾, получим для энергии протонов ~ 200 эв значение переменной составляющей тока $I \sim 3 \cdot 10^{-12}$ а, что близко к реально наблюдаемой величине I_p . Ряд других фактов — отсутствие заметной зависимости тока модуляционной ловушки от потенциала на внешней сетке и отсутствие заметного высотного хода тока — также свидетельствует в пользу предположения, что переменный ток модуляционной ловушки создается потоком ионов с энергией, значительно превышающей тепловую. Очевидно, что учет указанных факторов может привести лишь к снижению приведенной оценки верхней границы концентрации тепловых ионов.

Оценка величины n_e по данным электронной ловушки должна быть исправлена на величину возможного «перехвата» электронов низких энергий другими электродами ловушки. По данным предварительных лабораторных измерений для электронов с энергией $E \sim 1$ эв приведенные выше оценки n_e необходимо, по-видимому, увеличить в 3—4 раза. С другой стороны, нельзя исключить возможность, что часть тока электронной ловушки создается потоком фотоэлектронов с поверхности спутника. Учет этого обстоятельства может привести только к снижению полученной оценки верхней границы n_e .

Можно полагать, что оценки верхней границы концентрации тепловых заряженных частиц в окололунном пространстве по данным как ионной ($n_i \lesssim 100 \text{ см}^{-3}$), так и электронной ловушек ($n_e \lesssim 300 \text{ см}^{-3}$) скорее всего заметно завышены вследствие влияния указанных побочных эффектов, более детальное обсуждение которых будет проведено в дальнейшем.

Поступило
14 VII 1966

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ К. И. Грингауз, В. В. Безруких, М. З. Хохлов, Л. С. Мусатов, А. П. Ремизов, ДАН, 170, № 3 (1966). ² W. Bernstein, Space Physics, N. Y.—London—Sydney, 1964, p. 397. ³ E. J. Opik, Planet. Space Sci., 9, 241 (1962). ⁴ F. J. Hinton, D. R. Taesch, J. Geophys. Res., 69, № 7, 1341 (1964). ⁵ B. Elsmore, Phil. Mag., 2, № 20, 1040 (1957). ⁶ C. Hazard, M. V. Maskey, A. Y. Shimmins, Nature, 197, № 4872, 1037 (1963). ⁷ J. A. Baily, N. J. B. A. Branson, B. Elsmore, P. A. G. Schever, Nature, 201, № 4924, 755 (1964). ⁸ В. В. Безруких, К. И. Грингауз и др., ДАН, 163, № 4, 873 (1965). ⁹ К. И. Грингауз и др., Искусственные спутники Земли, в. 12, 119 (1962).

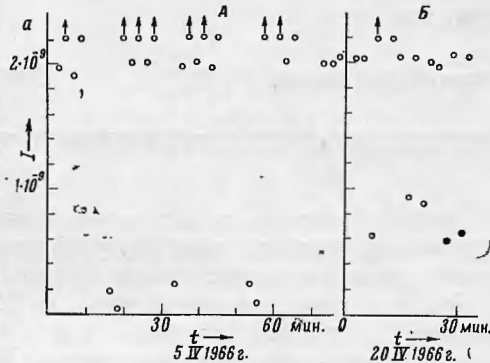


Рис. 3

ение I_e равно I_e не падает

е изотропны-
нить верхнюю
полунном про-
ожного сдвига
ионов с $E >$
 ~ 1 эв дает
пространстве,

полученным во
уны и фототок