

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Том IV

Выпуск 6

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

МОСКВА • 1966

УДК 537.591

*Е. И. Грингауз, В. В. Безруких, М. З. Хохлов,
Г. Н. Застенкер, А. П. Ремизов, Л. С. Мусатов*

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗУЧЕНИЮ ПЛАЗМЫ В ОКОЛОЛУННОМ ПРОСТРАНСТВЕ С ПОМОЩЬЮ ЛОВУШЕК ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ПЕРВОМ ИСКУССТВЕННОМ СПУТНИКЕ ЛУНЫ

Изложены имеющиеся сведения о плазме в «хвосте» магнитосферы Земли на больших удалениях от Земли и о плазме в окололунном пространстве, а также описаны аппаратура, установленная для проведения соответствующих исследований на космическом аппарате «Луна-10» (четыре ловушки заряженных частиц), и результаты этих экспериментов. Анализируется характер изменения коллекторных токов ловушек при пересечении Луной хвоста магнитосферы Земли. По данным измерений оценивается верхняя граница возможной концентрации тепловых заряженных частиц в ионосфере Луны.

ВВЕДЕНИЕ

На космическом аппарате «Луна-10», запущенном 31.III 1966 г. и вышедшем на орбиту спутника Луны 3.IV 1966 г., наряду с другими экспериментами были поставлены опыты по изучению плазмы в окололунном пространстве с помощью четырех ловушек заряженных частиц. Предварительные результаты этих опытов кратко описаны в [1, 2]. Настоящая статья содержит более подробное описание примененной в этих опытах аппаратуры и результатов измерений, а также более подробное обсуждение этих результатов.

Основными задачами рассматриваемых экспериментов были: 1) попытка обнаружения на орбите Луны потоков заряженных частиц, существующих в «хвосте» магнитосферы Земли при прохождении Луной предполагаемого продолжения антисолнечной части магнитосферы Земли; 2) измерение потоков ионов солнечного ветра в окололунном пространстве; 3) попытка обнаружения ионосферы Луны.

Остановимся коротко на состоянии сведений по каждому из этих вопросов.

Как показали исследования последних лет и особенно магнитные измерения Несса, выполненные на спутнике ИМП-1 [3], область регулярного магнитного поля (магнитосфера) в антисолнечном направлении весьма сильно вытянута в результате взаимодействия потоков солнечной плазмы (солнечного ветра) с геомагнитным диполем. Измерения Несса показали, что вытянутая в антисолнечном направлении часть магнитосферы («хвост магнитосферы») тянется во всяком случае до расстояний от Земли $\sim 30 R_3$ (R_3 — радиус Земли) и имеет поперечное сечение, с линейным размером $\sim 40 R_3$. Различные авторы высказывали разные предположения о протяженности хвоста магнитосферы (так, Десслер [4]

высказал гипотезу, согласно которой хвост магнитосферы тянется на расстояние $20 \div 50$ а. е. (астрономических единиц); согласно Данжи [5] длина его составляет всего $\sim 100 R_3$. Если одна из гипотез [4] или [5] верна, то, благодаря значительным поперечным размерам хвоста магнитосферы, Луна ежемесячно, в период, близкий к полнолунию, должна пересекать хвост магнитосферы.

Какие-либо прямые эксперименты, свидетельствующие о существовании хвоста магнитосферы на расстояниях, превышающих $\sim 30 R_3$, отсутствовали. Согласно данным, полученным Йо, Хоуардом и др. [6], при радиолокации Луны с Земли средняя электронная концентрация в пространстве от ионосферы Земли до Луны \bar{n}_e в секторе, близком к антисолнечному направлению, превышает на $\sim 200 \text{ см}^{-3}$ величину \bar{n}_e в других направлениях. Не обсуждая надежность количественных результатов измерений [6], необходимо заметить, что эти измерения принципиально могут дать лишь среднее по пути до Луны значение n_e и не могут ничего сообщить о распределении n_e вдоль хвоста магнитосферы, а следовательно, о длине последнего.

Десслер и Мичэл [7] рассмотрели вопрос об источниках плазмы в хвосте магнитосферы и указали на два возможных источника:

а) на сжатую термолизованную плазму, образующуюся за фронтом ударной волны при набегании солнечного ветра на геомагнитное поле, диффундирующую в хвост магнитосферы, попадающую по силовым линиям в полярные районы ионосферы Земли и разогревающую их;

б) на испаряющуюся из разогретых полярных районов ионосферную плазму, поднимающуюся от Земли вдоль силовых линий хвоста магнитосферы.

Поэтому, согласно [7], плазма в хвосте магнитосферы должна содержать две компоненты: компоненту солнечного происхождения с энергиями E , соответствующими $T \sim 10^7 \text{ К}$ (т. е. $E \sim 10^3 \text{ эв}$), и ионосферного происхождения с $T \sim 10^3 \text{ К}$, движущуюся от Земли.

Совершенно ясно, что без потоков плазмы хвост магнитосферы не мог бы существовать, ибо наблюдаемая в хвосте конфигурация магнитного поля, совершенно отличная от поля диполя, может быть создана только системой токов, для существования которой требуется наличие заряженных частиц. Только благодаря потокам плазмы эта область магнитосферы может быть устойчива (Аксфорд и др. [8]); отметим, что, как показал Несс [3], величины потоков электронов с энергиями $E > 200 \text{ эв}$, измеренных вблизи Земли на «Луне-2» [9], согласуются с данными магнитных измерений на ИМП-1.

Эти потоки электронов относятся к самой внешней зоне заряженных частиц, лежащей за пределами радиационных поясов Земли и наблюдавшейся в дальнейшем в околоземном космическом пространстве на многих космических аппаратах [10].

К числу последних публикаций о регистрации электронной компоненты плазмы в хвосте магнитосферы относится сообщение Бэйма и др. [11], которые в конце 1964 г. на спутниках «Вела-2» наблюдали при геоцентрических расстояниях от 16 до $18 R_3$ в районе нейтрального слоя «хвоста магнитосферы» (вблизи которого меняется направление магнитных силовых линий) потоки электронов порядка 10^8 — $10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ с энергиями от 350 до 20000 эв. Эти потоки наблюдались в зоне с толщиной $\sim 6 R_3$ и большей (в направлении поперечном оси хвоста) и были изотропными.

Помимо потоков электронов с энергиями порядка сотен и тысяч эв, в хвосте магнитосферы наблюдались также электроны с энергией $E > 40 \text{ кэв}$ (см., например, Андерсон [12]), появление которых носит, однако,

импульсный характер и существование которых не является перманентной особенностью хвоста магнитосферы. Они также наблюдались в опытах [14].

Ряд данных о подобных потоках электронов в хвосте магнитосферы, а также о потоках протонов с энергиями $E > 100$ кэв с аналогичными свойствами приведен Конради [13].

Измерения Ван Аллена на космическом аппарате «Маринер-4», не показали присутствия электронов в хвосте магнитосферы на расстояниях от Земли $\sim 3300 R_E$ [14].

Уже после запуска «Луны-10» опубликована дискуссия между Ван Алленом [15] и Десслером [16]. В [15, 16] обсуждаются возможные эксперименты, при помощи которых можно обнаружить существование протяженного хвоста магнитосферы за пределами его части, обследованной до настоящего времени.

Ван Аллен сформулировал четыре контрольных вопроса, ответы на которые могут характеризовать длину магнитосферы. Опуская два из них, относящиеся к наблюдениям космических лучей с малыми энергиями ($E < 5$ Мэв), генерируемых во время солнечных вспышек, отметим те, которые близки к задачам описываемых опытов на «Луна-10». Первый вопрос можно сформулировать так: можно ли обнаружить на больших расстояниях от Земли магнитное поле хвоста магнитосферы на фоне межпланетного магнитного поля солнечного ветра? Второй вопрос (четвертый по нумерации Ван Аллена) формулируется так: до какого расстояния в антисолнечном направлении в хвосте магнитосферы Земли можно обнаружить электроны с энергиями, превышающими тепловые («super thermal»)? В этом вопросе, как ясно из [15, 16], речь идет об электронных потоках типа наблюдавшихся Андерсоном [12], т. е. об элетронах с энергиями $E > 40$ кэв.

Нам представляется, что к этим контрольным вопросам следует добавить еще два:

А. До каких удалений от Земли в хвосте магнитосферы наблюдаются потоки электронов с энергиями порядка сотен и тысяч эв (зарегистрированные до расстояний $\sim 14 R_E$ на космическом аппарате «Луна-2» [9] и на расстояниях $17 \div 18 R_E$ на спутниках «Вела-2» [11])? Этот вопрос является распространением последнего вопроса Ван Аллена [15] на область электронов с энергиями $E < 40$ кэв.

Б. До каких удалений от Земли в хвосте магнитосферы можно наблюдать уменьшение полного потока и трансформацию энергетического спектра ионов солнечного ветра?

Известно, что невозмущенные потоки солнечной плазмы наблюдаются лишь вне магнитосферы: внутрь магнитосферы солнечный ветер либо не проникает, либо проникает после термализации вблизи границ магнитосферы, т. е. в существенно измененном виде. Вопрос Б представляется нам столь же очевидным, как и вопрос об обнаружении хвоста магнитосферы при помощи магнитометра, и трудно понять, почему он не был назван в дискуссии Ван Аллена и Десслера.

Эксперименты, поставленные на «Луна-10» при помощи ловушек заряженных частиц, могут рассматриваться как попытка получить частичные ответы на вопросы А и Б.

Изучение потоков солнечной плазмы в окололунном пространстве представляет значительный интерес и тогда, когда Луна находится заведомо вне магнитосферы Земли (например, в период близкий к новолунию). Можно ожидать, что свойства солнечного ветра вблизи Луны отличны от его свойств в невозмущенном межпланетном пространстве вследствие взаимодействия потоков солнечной плазмы с поверхностью Луны,

вследствие их взаимодействия с магнитным полем вблизи Луны (которое может отличаться от межпланетного поля, даже если Луна лишена собственного магнетизма, хотя бы из-за поверхностных токов, возникающих вследствие возможной электропроводности поверхности Луны) и т. п.

Между тем опыты Розенберга, Уэнера и др. [17, 18] по воздействию потоков ионов, имитирующих солнечный ветер, на твердые и порошкообразные образцы различных материалов показали, что воздействием потоков ионов можно существенно менять свойства поверхностей этих материалов. Ряд необычных оптических свойств, близких к свойствам лунной поверхности (малое альbedo, большое обратное рассеяние), был получен у порошка базальта после бомбардировки его протонами.

Это означает, что имеются веские основания считать, что свойства лунной поверхности во многом объясняются бомбардировкой ее солнечным ветром. Поэтому исследование параметров солнечного ветра вблизи Луны (которые, как отмечалось, должны отличаться от параметров невозмущенного солнечного ветра) должно входить в программу изучения Луны.

Последней из поставленных задач является попытка обнаружения ионосферы Луны. Гипотезы о существовании вблизи Луны области с повышенной (по сравнению с межпланетным пространством) концентрацией заряженных частиц — ионосферы Луны основаны на следующих соображениях. Гравитационное поле Луны достаточно для удержания атомов тяжелых газов, источником которых могут быть как потоки солнечной плазмы, так и радиоактивный распад входящих в состав лунных пород K^{40} , I^{129} и Pu^{244} , в результате которого в окрестности Луны появляются атомы Ar^{40} и He^{129} (см., например, обзор Бернстайна [19]). Причиной появления вблизи Луны тяжелых газов может также служить испарение поверхностного слоя Луны под действием бомбардировки его микрометеоритами, энергичными фотонами и корпускулами (например, ионами солнечного ветра). Лунная атмосфера может также пополняться тяжелыми элементами за счет нейтрализовавшихся на поверхности Луны ионов тяжелых элементов, входящих в состав солнечного ветра [19].

Легкие элементы (H, He) должны диссипировать из лунной атмосферы, так как гравитационное поле мало. Однако, если учесть, что должна иметь место постоянная десорбция газов с лунной поверхности (например, за счет нейтрализовавшихся протонов солнечного ветра), то в принципе нельзя считать исключенной возможность существования стационарной лунной атмосферы из легких газов с давлением, соответствующим равенству скоростей десорбции и диссипации этих газов.

Если у Луны существует атмосфера (поддерживаемая хотя бы названными выше процессами), то под действием далекого коротковолнового излучения Солнца, потоков солнечного ветра и т. д. она должна быть хотя бы частично ионизована, т. е. должна существовать лунная ионосфера.

Различные модели ионосферы Луны (основанные на различных оценках интенсивностей упомянутых выше процессов), приведенные в [19], дают концентрации заряженных частиц вблизи Луны в пределах $5 \cdot 10^1 \div 10^3 \text{ см}^{-3}$.

Экспериментальные данные, на основе которых можно было делать оценки электронной концентрации n_e в лунной ионосфере, до описываемых в настоящей статье опытов, были получены лишь радиоастрономическим методом — а именно, по наблюдениям рефракции радиоволн, излучаемых некоторыми внеземными источниками, во время затмения этих источников Луной. Так, при наблюдениях затмения Крабовидной туманности в 1956 г. Илсмор [20] пришел к выводу, что в зависимости от принятой модели ионосферы величина n_e у поверхности Луны лежит в

пределах от 10^3 см^{-3} до 10^4 см^{-3} . Меньшая оценка при этом получена в предположении малой высоты однородной атмосферы $H_0 = 80 \text{ км}$ (которая, по-видимому, относится к ионосфере, состоящей из тяжелых ионов), а большая соответствует $H_0 = 5000 \text{ км}$. В 1963 г. по наблюдениям затмения источника 3С273 оценка верхней границы n_e была понижена до $n_e \sim \sim 100 \div 200 \text{ см}^{-3}$ (в предположении $H_0 = 80 \text{ км}$) [21, 22]. Зависимость оценки n_e от модели ионосферы связана с тем, что рефракция радиоволн существенно зависит не только от интегральной концентрации (полного количества) электронов вдоль пути радиоволн, но и от градиентов n_e вдоль этого пути, который, естественно, различен в случаях «легкой» и «тяжелой» ионосферы. Таким образом, сделанным до настоящего времени оценкам n_e в ионосфере Луны присуща известная неопределенность.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ АППАРАТУРЫ

Для проведения измерений, связанных с отмеченными выше задачами, на космическом аппарате «Луна-10» были установлены четыре ловушки заряженных частиц (Л), размещение которых показано на рис. 1 и 2. В их числе — две одинаковые ловушки, предназначенные для измерения потоков ионов сравнительно высоких энергий, и две ловушки для регистрации тепловых частиц.

Трудности непосредственного обнаружения тепловой плазмы вблизи Луны помимо малости измеряемой величины тока связаны с неопреде-

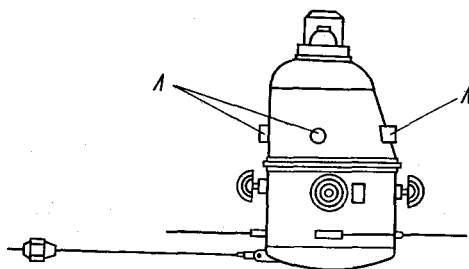


Рис. 1. Схематическое изображение космического аппарата «Луна-10».

Л — ловушки заряженных частиц

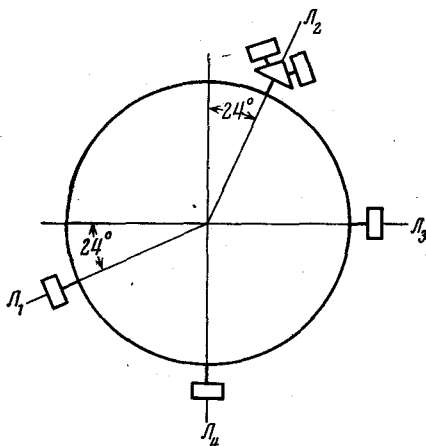


Рис. 2. Расположение ловушек в плоскости, перпендикулярной вертикальной оси аппарата

ленностью сведений об электрическом потенциале аппарата. В связи с этим на «Луне-10» использовались как ловушка, предназначенная для измерения концентрации тепловых положительных ионов, регистрация которых возможна, если потенциал спутника $\varphi_{сп} \leq 0$, так и ловушка, предназначенная для измерения концентрации тепловых электронов, регистрируемых при $\varphi_{сп} \geq 0$, с тем, чтобы обеспечить регистрацию тепловых частиц в любом случае.

Схемы всех ловушек и величины напряжений на электродах показаны на рис. 3. Плоские четырехэлектродные ловушки L_1 и L_3 представляют собой модификацию приборов, при помощи которых были зарегистрированы потоки мягких электронов в околоземном пространстве и потоки солнечной плазмы в межпланетном пространстве на первых лунных ракетах в 1959 г. [9].

В соответствии с показанными на рис. 3 потенциалами эти ловушки регистрируют потоки электронов с энергиями $E_e > 70 \text{ эв}$ и положительных

ионов с энергиями $E_p > E_0$. Величина E_0 определялась напряжением на второй сетке ловушки, которое менялось скачкообразно раз в две минуты и составляло либо 0, либо $+50$ в. Соответственно изменялась и величина E_0 от значения, определяемого потенциалом спутника $\Phi_{сп}$, до $(50 + \epsilon\phi)$ эв. Угол между нормальными к коллекторам этих ловушек составлял 156° .

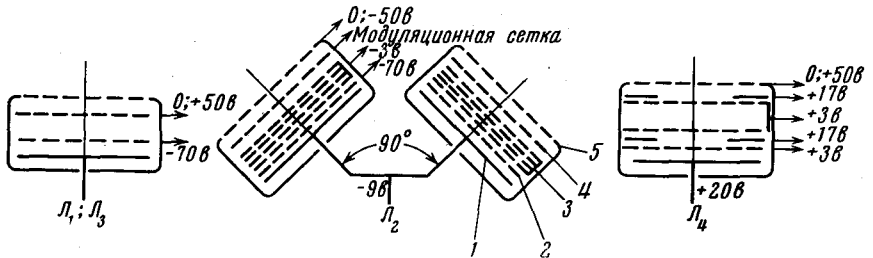


Рис. 3. Конструкция ловушек (схематически) и потенциалы их электродов относительно корпуса аппарата

Внешняя сетка ловушек L_1, L_3 соединена с корпусом, третья сетка (антифотоэлектронная) препятствует попаданию на коллектор электронов с энергией ниже указанного предела, а также служит для подавления

тока фотоэлектронов и вторичных электронов с коллектора.

Чувствительность прибора, использующего эти ловушки, ограничена, в основном, величиной тока фотоэлектронов в цепи коллектора, вызванного солнечным излучением. В зависимости от конструкции коллекторного узла и потенциалов на электродах величина и направление остаточного фототока в цепи коллектора определяются попаданием на коллектор фотоэлектронов с проволочек и деталей крепления антифотоэлектронной сетки, а также с

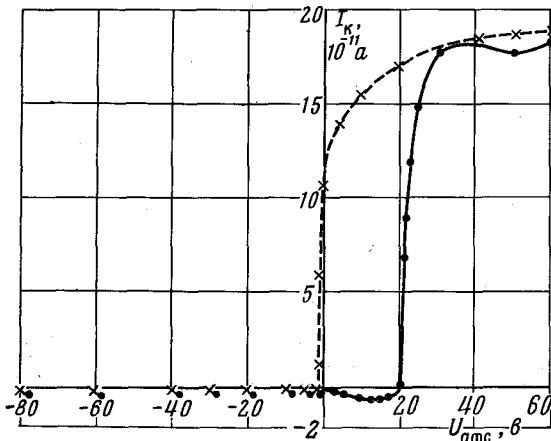


Рис. 4. Зависимость тока фотоэлектронов в цепи коллектора ловушек L_1 (штриховая кривая) и L_4 (сплошная кривая) от напряжения на антифотоэлектронной сетке

корпуса ловушки или, наоборот, с коллектора на корпус. На рис. 4 приведена полученная в лабораторном эксперименте (типичная для ловушек L_1 и L_3) зависимость фототока I_k в цепи коллектора от напряжения на антифотоэлектронной сетке ($U_{афс}$). При $U_{афс} < 0$ в рассматриваемых ловушках на коллектор попадают только фотоэлектроны с этой сетки; при $U_{афс} > 0$ ток меняет знак, что соответствует уходу фотоэлектронов с коллектора. По данным этих измерений в ловушках указанного типа получено в рабочем режиме ($U_{афс} = -70$ в) подавление фототока в 100—400 раз по сравнению с током с коллектора. Для плотности фототока под действием солнечного излучения $5 \cdot 10^{-9} - 10^{-8}$ а/см² [23] с учетом эффек-

тивной площади коллектора ловушек L_1 и L_3 , равной 9 см^2 , получим ожидаемую величину фототока $\sim (1 \div 4) \cdot 10^{-10} \text{ а}$.

Данные лабораторного эксперимента в силу очевидных ограничений (присутствие остаточных газов, отличие спектрального состава и интенсивности света от солнечного ультрафиолетового излучения, влияние стенок камеры и т. д.) являются лишь ориентировочными. Однако измерения на других космических аппаратах дают величину фототока в подобных ловушках, близкую или даже меньшую по сравнению с приведенными оценками. Ионная ловушка L_2 состоит из двух идентичных ловушек (близких по конструкции к описанной в [24]), коллекторы которых соединены. Это позволяет расширить в одной плоскости угловую характеристику ловушки до 200° (по уровню 0,1).

Ловушка L_2 — модуляционного типа. Она представляет собой многоэлектродную систему (см. рис. 3), состоящую из коллектора 1, антифотоэлектронной сетки 2, системы экранных сеток 3, экранирующих коллектор от двух модуляционных сеток 4, и внешней сетки 5, препятствующей проникновению поля модуляционной сетки в плазму. Напряжение на внешней сетке ловушки меняется скачкообразно раз в две минуты и составляет либо 0, либо -50 в . К первой модуляционной сетке приложено переменное напряжение звуковой частоты прямоугольной формы от -3 до $+7 \text{ в}$. Следовательно, в течение половины периода эта сетка тормозит попадающие в ловушку положительные ионы. Переменная составляющая коллекторного тока регистрируется резонансным усилителем, настроенным на частоту модуляции. В описываемом эксперименте вторая модуляционная сетка была соединена с экранными.

Потенциалы всех других электродов ловушки отрицательны, что обеспечивает попадание на коллектор ионов самых низких энергий даже при неблагоприятном знаке контактной разности потенциалов.

Использование модуляционного принципа позволяет, во-первых, при измерении потока ионов практически полностью избавиться от маскирующего действия фототока.

С другой стороны, с помощью модуляционной ловушки из полного потока частиц выделяется поток ионов, имеющих энергии в некотором интервале, определяемом напряжением на модуляционной сетке и углом их падения. В рассматриваемом случае при нормальном падении заряженных частиц на ловушку L_2 переменный ток пропорционален потоку ионов, имеющих энергии $E_p < 7 \text{ эв}$, а электроны любой энергии и ионы высоких энергий (например, частицы солнечного ветра) не регистрируются прибором.

При наклонном падении частиц вследствие конечных размеров ловушки и искривления траектории частиц в поле модуляционной сетки ловушка оказывается в некоторой степени чувствительной к ионам более высоких энергий и к электронам. На рис. 5 приведены результаты приближенного (без учета микроструктуры поля сеток и краевых эффектов) расчета зависимости переменной составляющей коллекторного тока от угла падения частиц и их энергии.

Рациональным выбором конструкции ловушки указанный эффект может быть значительно снижен. Из рис. 5 видно, что даже при достаточно больших углах падения ($40-60^\circ$) чувствительность ловушки к ионам с энергией, превышающей eU_M в 10—20 раз, составляет в рассматриваемой ловушке менее 1% от чувствительности к ионам с $E_p < eU_M$ (U_M — максимальное напряжение на модуляционной сетке). Этим ограничивается возможность измерения малой концентрации тепловых ионов при наличии больших потоков более энергичных ионов (например, протонов солнечного ветра).

Электроны с энергией $E_e < 70$ эв (в том числе, по-видимому, и электроны солнечного ветра) в ловушке L_2 не попадают на коллектор, а переносимый ток, создаваемый электронами больших энергий, оказывается весьма малым (десятые и сотые доли процента).

Неоднозначность результатов может быть устранена подачей запирающих напряжений на вторую модуляционную сетку, дополнительно сортирующую частицы по энергиям. Однако в описываемом эксперименте из-за

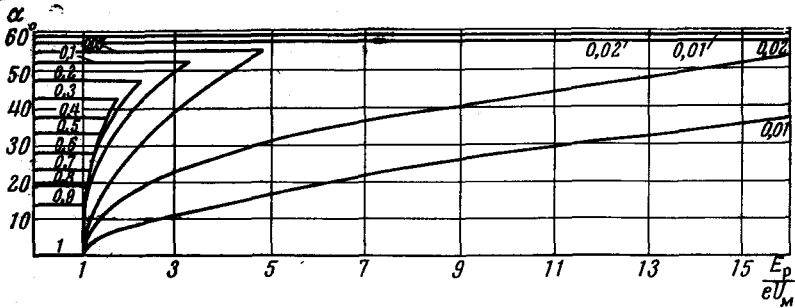


Рис. 5. Ток модуляционной ловушки L_2 при различных углах падения и энергии частиц.

Величина тока в относительных единицах указана цифрами у кривых равной интенсивности

сравнительно высокой скорости вращения аппарата (см. далее) этот метод не использовался.

Для тепловых электронов, энергия которых сравнима с энергией фотоэлектронов, применение модуляционной ловушки рассмотренного типа не позволяет избавиться от мешающего влияния фототока при освещении ловушки. Поэтому электронная ловушка L_4 (см. рис. 3) имеет постоянные потенциалы на электродах. Для регистрации тепловых электронов потенциалы всех электродов сделаны положительными относительно корпуса аппарата, кроме потенциала внешней сетки, который менялся скачкообразно раз в две минуты и составлял либо 0, либо $+50$ в. В конструкцию этой ловушки по сравнению с трехэлектродными ловушками с постоянными потенциалами на электродах, установленными на других советских космических аппаратах [9, 25, 26], были внесены изменения для снижения величины остаточного фототока. Для уменьшения числа фотоэлектронов, могущих попасть на коллектор с внешней сетки и деталей ее крепления, прозрачность этой сетки была повышена до 0,98, и в ловушку были введены две диафрагмы с диаметром отверстия вдвое меньшим диаметра внешней сетки.

Полученная в лабораторном эксперименте зависимость фототока в цепи коллектора ловушки L_4 от напряжения на антифотоэлектронной сетке приведена на рис. 4 (потенциалы других электродов указаны на рис. 3). При $U_{\text{афс}} < 0$ на коллектор попадают только фотоэлектроны с этой сетки. При $0 < U_{\text{афс}} < U_{\text{к}}$ ($U_{\text{к}}$ — напряжение на коллекторе) ток коллектора отрицателен и растет с увеличением $U_{\text{афс}}$, что объясняется попаданием на коллектор фотоэлектронов с других сеток. При $U_{\text{афс}} > U_{\text{к}}$ уход фотоэлектронов с коллектора преобладает над другими процессами. Выбранное значение $U_{\text{афс}} = +3$ в по ориентировочным данным обеспечивает в этой ловушке подавление фототока примерно в 80 раз по сравнению с током с коллектора. С учетом эффективной площади коллектора в 6 см^2 получим максимальную ожидаемую величину фототока в ловушке L_4 около $(3 \div 6) \cdot 10^{-10}$ а.

Рабочий режим ловушек и измерение коллекторных токов на борту аппарата «Луна-10» обеспечивались с помощью двух электронных блоков. В одном из них размещались схемы питания, генератор модуляционного напряжения, блок коммутации, служащий для синхронного изменения указанных выше потенциалов на сетках ловушек, и три усилителя постоянного тока. В отдельном блоке в непосредственной близости от модуляционной ловушки размещался усилитель тока звуковой частоты.

Задающим элементом генератора прямоугольных импульсов напряжения являлся камертон, благодаря чему стабильность частоты генератора достигала величины 10^{-5} .

Усилители постоянного тока имели чувствительность $\sim 5 \cdot 10^{-11}$ а, что соответствует попаданию на коллектор потоков заряженных частиц $\sim 3 \cdot 10^7$ см⁻²·сек⁻¹. Все усилители собраны по двухтактной симметричной схеме со 100%-ной отрицательной обратной связью с коэффициентом усиления при разомкнутой цепи обратной связи $k \gg 1$, что обеспечивает большую стабильность и малую величину дрейфа нуля. Полоса пропускания усилителей составляла около 20 гц, а сдвиг нуля не превышал $\sim 2\%$ от полной шкалы выходного напряжения за 100 час. непрерывной работы. Диапазон измеряемых токов составлял $5 \cdot 10^{-11} \div 2 \cdot 10^{-9}$ а; расширение диапазона достигалось шунтированием входного сопротивления, стоящего в цепи обратной связи.

На выходе усилителя электронной ловушки сигнал пропорционален коллекторному току, если последний отрицателен, и отсутствует, если ток положительный.

Избирательный усилитель тока звуковой частоты обладает чувствительностью $1 \cdot 10^{-12}$ а, т. е. чувствительностью по напряжению не менее 1 мкв при сопротивлении на входе усилителя 10^6 ом.

Величина среднеквадратичных шумов, приведенных ко входу, в этом случае должна быть порядка 0,1 мкв. Требуемая величина шумов в усилителе была получена за счет снижения его полосы пропускания до 10 гц с помощью двойного Т-образного моста с квазирезонансной частотой ~ 1000 гц.

Указанная чувствительность усилителя при эффективной площади ловушки в 14 см² соответствует попаданию на коллектор потоков ионов $\sim 1 \cdot 10^6$ см⁻²·сек⁻¹.

Диапазон усиливаемых токов 10^{-12} а \div 10^{-9} а, что достигается изменением коэффициента передачи (в зависимости от величины входного сигнала) с помощью нелинейного элемента, включенного параллельно входному сопротивлению.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения потоков заряженных частиц с помощью аппаратуры на борту спутника «Луна-10» проводились с 31.III по 29.V 1966 г. (здесь и далее время универсальное). На рис. 6 схематически показана проекция орбиты Луны на плоскость эклиптики в указанный период, а также границы магнитосферы Земли по [3] (магнитосфера приближенно показана симметричной относительно линии Солнце — Земля). Штриховой линией изображено предполагаемое продолжение границы магнитосферы в области, в которой прямые магнитные и плазменные измерения ранее отсутствовали.

На рис. 6 видно, что вся траектория «Луны-10» на пути Земля — Луна пролегла в хвосте магнитосферы Земли и его предполагаемом продолжении. В начальный период своего существования в качестве спутника Луны «Луна-10» имела орбиту со следующими параметрами: апоселений —

350 км, периселений — 1015 км, период обращения вокруг Луны — 2 час. 58 мин., угол наклона орбиты к плоскости лунного экватора $\sim 72^\circ$.

На рис. 7 приведены некоторые результаты измерений тока в ловушках L_1 и L_3 в течение ряда типичных сеансов. Величина тока в этих ло-

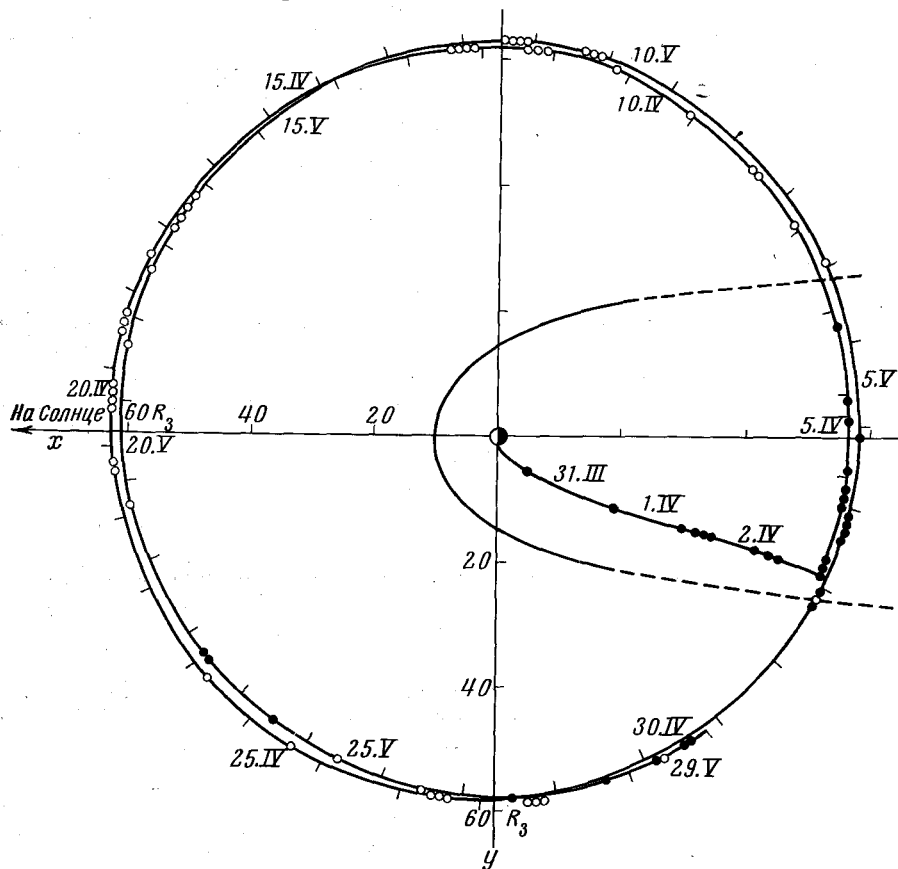


Рис. 6. Проекция траектории аппарата «Луна-10» на пути Земля — Луна, а также проекция орбиты Луны на плоскость эклиптики (здесь и на следующих рисунках время универсальное)

вушках составляет от $-2,5 \cdot 10^{-10}$ а до $9 \cdot 10^{-10}$ а. Разброс значений токов отчасти связан с изменениями ориентации спутника.

Рассмотрение этих результатов показывает, что все сеансы измерений могут быть разделены на две отчетливые группы. В сеансах первой группы (отмеченных темными кружками на рис. 6), по крайней мере в одной из рассматриваемых ловушек регистрируются отрицательные токи; в сеансах второй группы (отмеченных на рис. 6 светлыми кружками), в обеих ловушках регистрируются только положительные токи. Сопоставление времени проведения этих сеансов с положением Луны относительно направления Солнце — Земля свидетельствует о том, что это деление не случайно.

Сеансы первой группы проведены большей частью тогда, когда аппарат «Луна-10» находился внутри либо ранее известной области хвоста магнитосферы Земли, либо ее продолжения (см., например, на рис. 7 а, б сеансы 2 и 5.IV, 3 и 4.V). Только несколько сеансов этой группы (с 23 по 29.V) приходится на период, когда Луна находилась вне магнитосферы.

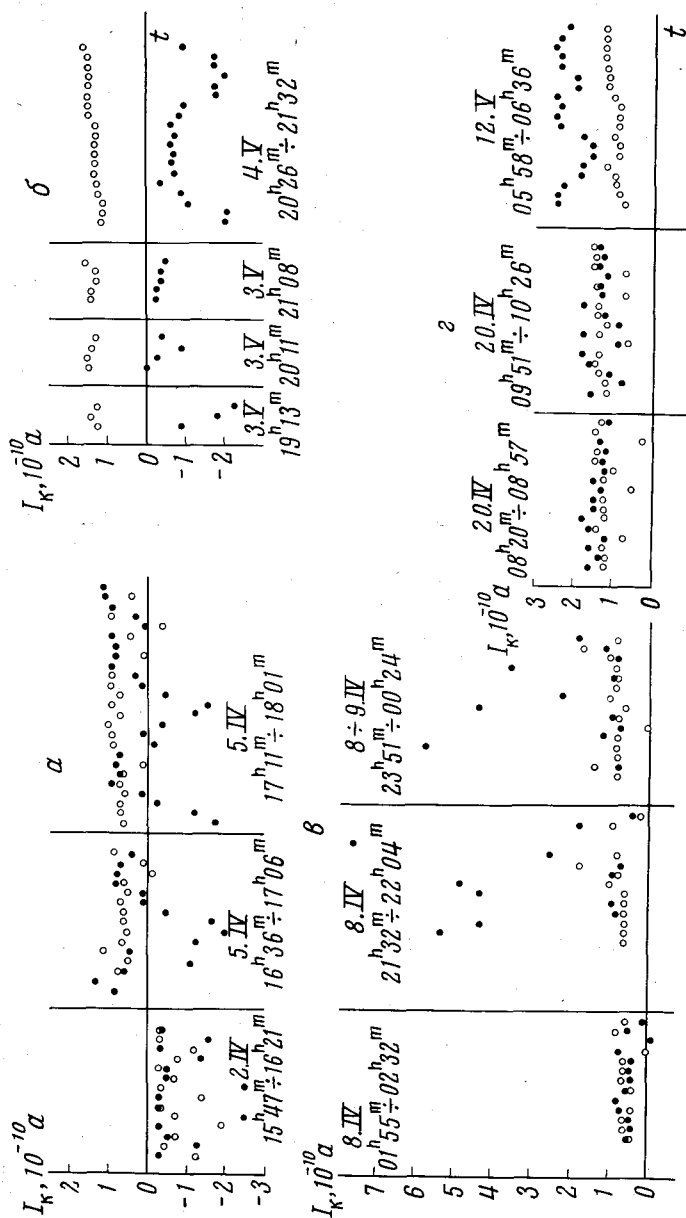


Рис. 7. Коллекторные токи ловушек L_1 (светлые кружки) и L_3 (темные кружки) во время некоторых сеансов измерений

Все сеансы второй группы (за одним исключением, о котором сказано далее) проведены, когда Луна (вместе со своим спутником) находилась заведомо вне магнитосферы Земли (см., например, сеансы 8, 9 и 20.IV, 12.V на рис. 7, в, з). Положительные токи, регистрируемые ловушками L_1 , L_3 в этих сеансах, в среднем, заметно увеличиваются по сравнению с сеансами первой группы. В некоторых случаях (см., например, сеансы 8—9.IV на рис. 7, в) ток ловушки L_3 достигает $-7 \cdot 10^{-10}$ a, что соответствует потоку ионов $\sim 5 \cdot 10^8$ см⁻².сек⁻¹. Внутри магнитосферы (или ее продолжения) положительные токи ловушек L_1 , L_3 ни в одном сеансе не превышают $1,5 \cdot 10^{-10}$ a.

Величина положительных токов в ловушках L_1 , L_3 почти не зависит от напряжения на второй сетке (0 или $+50$ в), следовательно регистрируемые ионы имеют энергию значительно больше 50 эв.

Приведенные результаты могут быть объяснены следующим образом. Ловушки L_1 , L_3 регистрируют разность потоков электронов с $E_e > 70$ эв и ионов с $E_p > 50$ эв. Помимо этого, отрицательные коллекторные токи могут создаваться фотоэлектронами с ближайшей к коллектору сетки, когда ловушка освещена Солнцем.

Вне хвоста магнитосферы на коллектор ловушки могут попадать положительные ионы солнечного ветра, создающие положительный ток в цепи коллектора. Электроны солнечного ветра, имеющие, в основном, энергию значительно меньше 70 эв, тормозятся антифотоэлектронной сеткой и не попадают на коллектор. По-видимому, можно полагать, что во всех случаях, кроме сеансов 23—29.V, поток протонов превышает фототок с сетки, и поэтому результирующий ток оказывается положительным. Значительное возрастание положительных токов в отдельных сеансах (вне магнитосферы Земли) объясняется, таким образом, увеличением потока ионов солнечного ветра до $\sim 5 \cdot 10^8$ см⁻²·сек⁻¹ или более благоприятной ориентацией ловушки относительно направления потока в моменты измерений.

В хвост магнитосферы Земли потоки солнечной плазмы, по-видимому, попадают значительно трансформированными в процессах термализации в переходной зоне и диффузии внутрь хвоста магнитосферы. Поэтому коллекторный ток рассматриваемых ловушек в хвосте магнитосферы может стать отрицательным, как из-за уменьшения потока положительных ионов (при неизменной величине фототока с сетки), так и из-за попадания на коллектор потоков электронов с энергией $E_e > 70$ эв, которые могут существовать в хвосте магнитосферы (см. Введение). Так, в сеансе 2.IV (см. рис. 7) токи в обеих ловушках L_1 и L_3 в течение всего сеанса были отрицательными, что может быть объяснено только наличием потоков электронов с $E_e > 70$ эв, так как, учитывая почти диаметрально противоположное расположение этих ловушек (см. рис. 2), зарегистрированные токи нельзя объяснить фотоэмиссией. Однако значительно чаще в магнитосфере в ловушках L_1 , L_3 наблюдались токи противоположных знаков.

В пользу предположения о том, что появление отрицательных коллекторных токов ловушек L_1 и L_3 внутри хвоста магнитосферы в ряде случаев может быть связано с уменьшением потока попадающих в ловушку положительных ионов, которые ранее компенсировали фотоэмиссию с ближайшей к коллектору сетки, свидетельствуют данные сеанса 2.V в 21 час. 40 мин. Согласно траекторным измерениям и расчетам, космический аппарат во время этого сеанса находился в солнечной тени, созданной Луной; при этом фотоэмиссия, естественно, отсутствует, и в этом сеансе (единственном, из числа проведенных в продолжении хвоста магнитосферы Земли) в обеих ловушках L_1 и L_3 зарегистрированы только положительные токи. Впрочем, такой же эффект имел бы место в сеансе 2.V, если бы потоки электронов с $E_e > 70$ эв имели скорость, направленную строго от Солнца, тогда как потоки положительных ионов с энергией > 50 эв вблизи Луны обладали бы квазиизотропным распределением скоростей.

Регистрация отрицательных токов в сеансах 23—29.V может свидетельствовать о появлении в этот период в окололунном пространстве вне хвоста магнитосферы (см. рис. 6) потоков электронов с энергией $E_e > 70$ эв, хотя в наших измерениях с 8 до 28.IV и с 7 по 21.V такие потоки вне хвоста магнитосферы не наблюдались. В пользу такого объяснения говорят результаты, полученные одновременно с нашими на том же космическом ап-

парате Н. Л. Григоровым и др., наблюдавшими при помощи незранированного счетчика 27—29.V мягкое корпускулярное излучение, которое может создаваться электронами с $E_e > 40 \text{ кэВ}$ [27].

Другое возможное объяснение появления отрицательных токов в сеансах 23—29.V состоит в уменьшении в этот период потока ионов солнечного ветра.

Третья возможность (менее вероятная) заключается в таком изменении характера вращения спутника Луны, при котором ориентация рассматриваемых ловушек в моменты измерений как раз соответствует определенному (довольно узкому) диапазону углов между нормалью к коллектору ловушки и направлением на Солнце ($\sim 60\text{--}80^\circ$), при котором фототок с сетки регистрируется, а ионы, движущиеся в направлении от Солнца, не попадают на коллектор. По данным лабораторных измерений угловая характеристика этих ловушек для фототока шире, чем для потока ионов. Отметим, что в сеансе 26.V ток ловушки L_3 был положительным и достигал величины $9,5 \cdot 10^{-10} \text{ а}$. Увеличение потока солнечного ветра в этот день до величины $\geq 7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ согласуется с тем, что 26.V (по данным Международного Центра Б-2, Москва) сумма планетарных K_p -индексов геомагнитной активности за сутки увеличилась до 43 (самая большая величина за апрель и май). Однако сопоставление с данными о геомагнитной активности не дает оснований считать, что все три зарегистрированных с 5.IV по 7.V перехода (один — от только положительных к разноименным токам в ловушках L_1 , L_3 и два — от разноименных к только положительным) связаны с изменением интенсивности потоков солнечной плазмы в районе орбиты Луны.

Такое трехкратное совпадение изменения потока солнечного ветра с приближением Луны к границе предполагаемого продолжения хвоста магнитосферы Луны представляется весьма маловероятным.

Таким образом, указанное повторение изменений токов в ловушках L_1 и L_3 , по-видимому, свидетельствует о том, что во время проведенных экспериментов Луны (вместе с ее спутником) между 5 и 8.IV 1966 г. вышла из хвоста магнитосферы Земли, а затем (при приближении майского полнолуния) между 28.IV и 2.V вновь вошла в хвост магнитосферы Земли и между 5 и 7.V вышла из него. Если это так, то расстояние от Земли в антисолнечном направлении, на протяжении которого существование хвоста магнитосферы экспериментально доказано, увеличилось с $\sim 200\,000 \text{ км}$ по данным ИМП-1 до $\sim 380\,000 \text{ км}$ по данным «Луны-10».

Необходимо отметить, что регистрация положительных токов одновременно в ловушках L_1 и L_3 в сеансах, когда Луна находилась в межпланетном пространстве (заведомо вне хвоста магнитосферы Земли), не может объясняться действием невозмущенного солнечного ветра, радиально распространяющегося от Солнца. Это обстоятельство может свидетельствовать в пользу высказанного во Введении предположения, что вблизи Луны образуется возмущенная зона. Из приведенных данных следует, что в этой зоне имеются потоки положительных ионов с энергиями $E_p^* > 50 \text{ эв}$, движущиеся в направлении, не совпадающем с направлением солнечного ветра.

Токи модуляционной ловушки I_p во время измерений как на траектории Земля — Луна, так и на окололунной орбите меняются в пределах $0\text{--}12 \div 10\text{--}11 \text{ а}$. Типичная зависимость тока I_p от времени в течение одного сеанса измерений представлена на рис. 8.

Величина тока ловушки L_2 должна существенно зависеть от ее ориентации по отношению к вектору скорости космического аппарата (для тепловых ионов) или к направлению на Солнце (для ионов солнечного ветра). Измерения коллекторных токов каждой из ловушек производились во

время сеансов радиосвязи один раз в две минуты при периоде вращения спутника ~ 40 сек. Возможно, что именно поэтому измеренные значения I_p меняются во времени довольно нерегулярным образом. Большая часть отсчетов (из общего числа ~ 550) лежит в пределах $2 \div 4 \cdot 10^{-12}$ а.

Выше было показано, что ток модуляционной ловушки в рассматриваемых условиях может создаваться как попадающими в ловушку тепловыми ионами (с энергией < 7 эв), так и, в некоторой степени, ионами более высоких энергий (например, протонами солнечного ветра). Приняв для оценки максимальную величину потока солнечного ветра, измеренную ловушкой L_3 , получим для энергии протонов $E_p \sim 200$ эв ориентировочное значение переменной составляющей тока в ловушке L_2 (см. расчет на рис. 5) $\sim 3 \cdot 10^{-12}$ а, что близко к реально наблюдаемым величинам I_p .

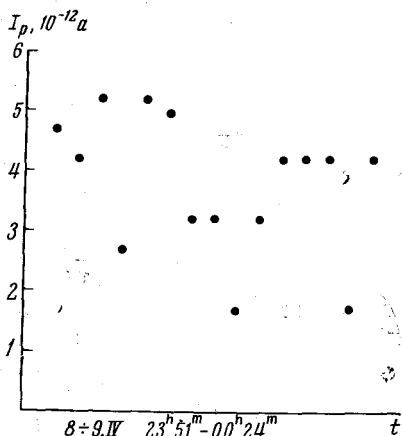


Рис. 8. Коллекторный ток модуляционной ловушки в сеансе 8 и 9.IV

Вследствие указанной неопределенности в интерпретации показаний модуляционной ловушки необходимо рассмотреть все относящиеся к ней данные под этим углом зрения.

На рис. 9 приведена совокупность всех значений токов I_p , измеренных на окололунной орбите за период с 3.IV до 12.V на различных высотах над поверхностью Луны. Из графика видно, что заметная зависимость I_p от высоты отсутствует.

Если интерпретировать данные рис. 9 как высотный ход величины, пропорциональной концентрации тепловых ионов, то отсутствие заметного уменьшения тока I_p с увеличением высоты от 360 до 1000 км над поверхностью Луны свидетельствовало бы о весьма большой ($\sim 3 \div 5 \cdot 10^3$ км) высоте однородной атмосферы Луны, в отличие от оценок ее ($\sim 80-100$ км) в работах [20—22].

Сравнение значений I_p при нахождении Луны в хвосте магнитосферы Земли и в межпланетном пространстве (рис. 9, а, б) подтверждает сделанный выше вывод о различии потоков заряженных частиц на орбите Луны в этих областях пространства. Так, внутри магнитосферы среднее значение $\bar{I}_p = (2,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-12}$ а, а во втором случае $\bar{I}_p = (3,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-12}$ а (второе слагаемое в скобках представляет собой среднее квадратичное отклонение среднего значения). Хотя отличия приведенных средних значений невелики, из рис. 9 видно, что если значения тока $I_p < 5 \cdot 10^{-12}$ а встречаются одинаково часто и в магнитосфере и в межпланетном пространстве, то отсчеты $I_p \geq 5 \cdot 10^{-12}$ а встречаются почти исключительно при измерениях вне магнитосферы Земли. Увеличение тока I_p в межпланетном пространстве может быть как следствием непосредственного влияния потоков ионов солнечного ветра, так и свидетельством изменения плотности ионосферы Луны при выходе ее из хвоста магнитосферы Земли. Отметим, однако, что среднее значение тока модуляционной ловушки на пути от Земли к Луне $\bar{I}_p = (2,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-12}$ а оказывается близким к значениям, полученным на окололунной орбите.

Изменение напряжения на внешней сетке ловушки L_2 не приводит к заметному изменению средних значений тока \bar{I}_p . Это также может свидетельствовать о высокой (> 50 эв) энергии ионов, попадающих в ловушку. Нельзя, однако, исключить возможность случайной компенсации увеличения потока попадающих в ловушку тепловых ионов (при напряже-

нии —50 в на внешней сетке) уменьшением коллекторного тока из-за изменения токораспределения в ловушке (эффект «перехвата» частиц при притягивающем потенциале сетки, превышающем потенциал коллектора).

Таким образом, предварительное рассмотрение имеющихся сведений не позволяет решить вопрос о том, зарегистрированы ли ловушкой L_2 вблизи Луны тепловые ионы, хотя, скорее всего, ответ на этот вопрос должен быть отрицательным и следует считать, что из-за указанных выше побочных эффектов ловушка L_2 регистрирует потоки ионов более высоких энергий (> 50 эв).

Тем не менее, полученные данные можно использовать для оценки верхней границы возможной концентрации тепловых ионов в окололунном пространстве, если предположить, что $\Phi_{\text{сш}} \leq 0$ и что максимальные измеренные значения I_p соответствуют совпадению максимума угловой характеристики ловушки с направлением вектора скорости. Сектор обзора ловушки L_2 (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. В этом случае максимальное значение (тока звуковой частоты) $I_p = 1,2 \cdot 10^{-11}$ а соответствует потоку ионов $\sim 1 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$.

Если ионосфера Луны состоит из тяжелых ионов, имеющих низкую температуру, то скорость спутника ($\sim 1 \text{ км/сек}$) можно считать много большей тепловой скорости ионов и оценка верхней границы концентрации ионов дает $n_i \sim 100 \text{ см}^{-3}$. Для тяжелых ионов при высокой температуре ($\sim 10^4 \text{ }^\circ\text{K}$), как и для ионов водорода при низкой температуре, тепловая скорость ионов близка к скорости спутника, и эта оценка должна быть несколько (в 1,5–2 раза) повышена. Для ионов H^+ при высокой

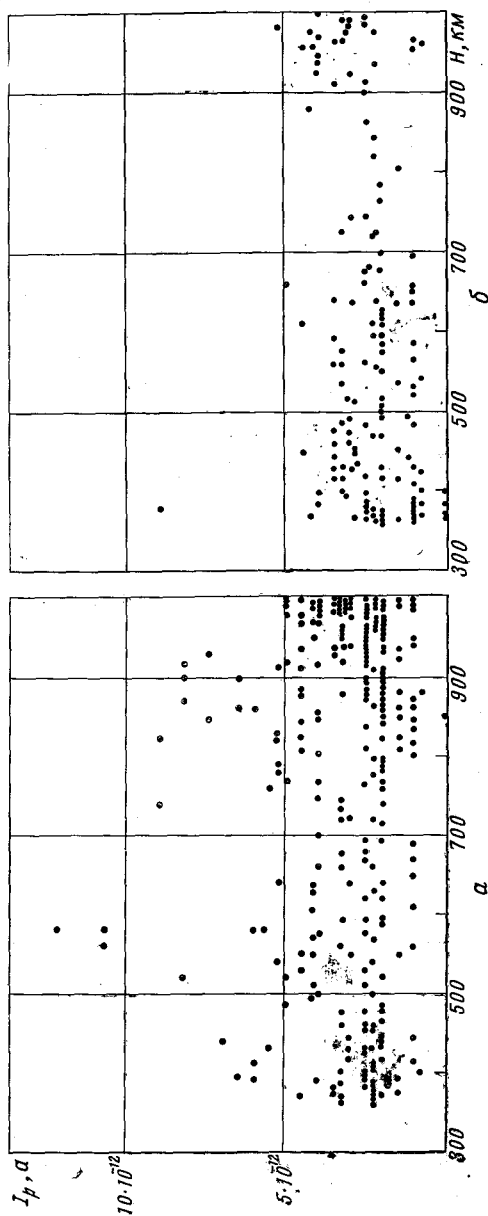


Рис. 9. Токи модулированной ловушки на различных высотах над поверхностью Луны: а — вне магнитосферы Земли, б — в хвосте магнитосферы

температуре тепловая скорость значительно больше скорости спутника, и указанная оценка должна быть аналогичным образом понижена.

Следует подчеркнуть, что учет рассмотренных выше побочных эффектов может привести только к снижению полученной оценки верхней границы концентрации ионов в ионосфере Луны.

Ток электронной ловушки I_e в большинстве сеансов измерений колебался в широких пределах от 10^{-10} а до $\geq 2,2 \cdot 10^{-9}$ а (см., например, рис. 10). Значение $I_e = 2,2 \cdot 10^{-9}$ а было верхним пределом шкалы усилителя (все большие значения отмечены на рис. 10 стрелками).

Все отсчеты I_e можно разделить на две довольно резко отличающиеся группы — «большие» токи (от 1,8 до $\geq 2,2 \cdot 10^{-9}$ а) и «малые» токи

(в пределах $1 \div 9 \cdot 10^{-10}$ а), промежуточные между ними значения тока почти не встречаются.

«Большие» значения тока существенно (\sim в 5 раз) превышают ожидаемую (по приведенным выше лабораторным оценкам) величину фототока в ловушке L_4 . По-видимому, они объясняются попаданием в ловушку фотоэлектронов, эмит-

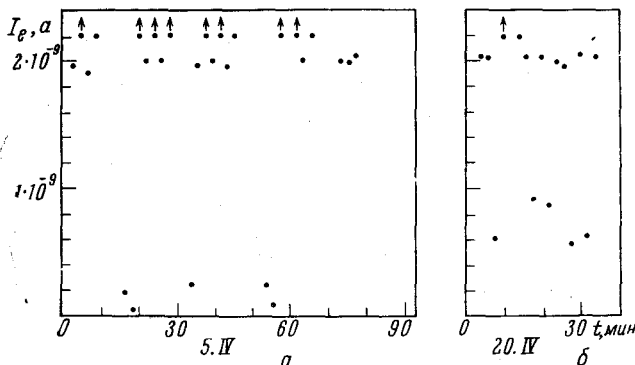


Рис. 10. Примеры записи тока электронной ловушки L_4 :

а — в хвосте магнитосферы Земли, б — вне магнитосферы

тируемых под действием солнечного излучения с близлежащих участков поверхности космического аппарата. Это обстоятельство может иметь место, если потенциал спутника положителен.

Глубокая (и иногда довольно регулярная) модуляция тока I_e является, очевидно, следствием изменения ориентации ловушки относительно направления на Солнце в процессе вращения космического аппарата. Об этом свидетельствует, например, независимость вероятности появления «большого» тока от напряжения на внешней сетке (0 или +50 в).

Отметим, что за период измерений характер изменения тока I_e менялся, что может быть связано с эволюцией вращения спутника. Так, в сеансах измерений с 7 по 21.V ток ловушки L_4 , в отличие от других сеансов, не падал ниже $1,9 \cdot 10^{-9}$ а, а начиная с 23.V снова стал изменяться аналогично тому, как представлено на рис. 10.

Некоторые сведения о природе «больших» токов можно получить, анализируя зависимость тока I_e от напряжения на внешней сетке $U_{вн}$. Хотя вероятность их появления и не зависит от $U_{вн}$, величина «больших» токов заметным образом уменьшается, когда $U_{вн} = +50$ в. Так, число отсчетов, в которых $I_e > 2,2 \cdot 10^{-9}$ а, составляет в этом случае только 5% от общего числа отсчетов с «большим» током, тогда как при отсутствии притягивающего электроны напряжения на сетке число таких отсчетов составляет 63%. Этот факт можно объяснить влиянием описанного выше «перехвата» электронов сеткой с положительным потенциалом, из-за чего коллекторный ток при повышении напряжения на сетке уменьшается. Согласно лабораторным измерениям, «перехват» достигает значительной величины лишь при достаточно большом отношении $eU_c / E_e \sim 50-100$ (U_c — напряжение на сетке).

Следовательно, наличие «перехвата» в рассматриваемых условиях свидетельствует о том, что энергия попадающих в ловушку электронов $\sim 1 \text{ эв}$.

«Малые» значения I_e в случаях, когда Луна находится в хвосте магнитосферы Земли и в межпланетном пространстве, также заметно различаются. Так, в хвосте магнитосферы среднее значение «малых» токов в ловушке L_4 равно $(4,8 \pm 0,1) \cdot 10^{-10} \text{ а}$, тогда как в межпланетном пространстве среднее значение I_e составляет $(7,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-10} \text{ а}$.

Еще более резко отличаются минимальные значения «малых» токов (сравните рис. 10, а и б). Во время сеансов измерений в хвосте магнитосферы ток ловушки L_4 в отдельных случаях падает до $2 \div 5 \cdot 10^{-11} \text{ а}$, тогда как при измерениях в межпланетном пространстве ток I_e не уменьшается ниже $4 \cdot 10^{-10} \text{ а}$. Увеличение «малых» токов I_e вне магнитосферы может быть связано с попаданием в ловушку L_4 электронов солнечного ветра. Разность приведенных выше средних значений тока I_e соответствует концентрации электронов с энергией около 10 эв , равной $\sim 6 \text{ см}^{-3}$, что довольно близко к средней концентрации частиц в невозмущенном солнечном ветре. Нельзя также исключить возможность объяснения указанного уменьшения «малых» токов I_e при входе в хвост магнитосферы одновременным уменьшением положительного потенциала корпуса аппарата.

Как уже указывалось выше, из-за неопределенности потенциала аппарата оценка возможной концентрации частиц тепловой энергии должна быть проведена по совместным данным ионной и электронной ловушек. Интерпретируя «малые» значения тока ловушки L_4 , как создаваемые изотропными потоками электронов, и предполагая $\Phi_{\text{сн}} \geq 0$, можно оценить верхнюю границу концентрации электронов низких энергий в окололунном пространстве. Для указанных средних значений I_e с учетом возможного сдвига нулевого уровня за счет попадающих в ловушку потоков ионов с $E_p > 20 \text{ эв}$ оценка концентрации электронов с энергией $E_e \sim 1 \text{ эв}$ дает $n_e \sim 60\text{--}80 \text{ см}^{-3}$. Нельзя, конечно, исключить возможность того, что часть «малых» значений тока I_e также создается потоком фотоэлектронов с поверхности спутника. Вследствие этого приведенная оценка может оказаться заметно завышенной.

Представляет интерес оценка величины n_e по данным, полученным во время сеанса 2.V, когда спутник, как уже говорилось выше, находился в тени Луны. В этом сеансе ток ловушки L_4 упал до $\sim 2 \cdot 10^{-11} \text{ а}$, что с учетом указанного сдвига нуля дает $n_e \lesssim 15\text{--}20 \text{ см}^{-3}$. С другой стороны, возможно, что уменьшение тока электронной ловушки в этом сеансе является следствием смещения потенциала спутника в сторону отрицательных значений (из-за прекращения фотоэмиссии с его поверхности). Однако показания ионной ловушки L_2 не свидетельствуют о каком-либо увеличении тока I_p в этом сеансе по сравнению с другими. Поэтому оценка n_e по данным сеанса 2.V является, возможно, более близкой к действительности, чем первая из приведенных оценок.

Оценка величины n_e по данным ловушки L_4 должна быть исправлена на величину возможного «перехвата» электронов низких энергий диафрагмами ловушки (см. рис. 3). По предварительным данным лабораторных измерений для электронов с $E_e \sim 1 \text{ эв}$ приведенные выше оценки необходимо, по-видимому, увеличить в 3—4 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментов, проведенных при помощи ловушек заряженных частиц на «Луне-10», позволили сделать некоторые выводы, относящиеся к протяженности хвоста магнитосферы Земли, к потокам

солнечной плазмы в окололунном пространстве и к верхней границе концентрации заряженных частиц в ионосфере Луны.

Совокупность показаний всех четырех ловушек свидетельствует о том, что за время измерений на селеноцентрической орбите с 3.IV по 29.V 1966 г. Луна дважды выходила из хвоста магнитосферы Земли и один раз вошла в него.

При этом каждый раз наблюдалось отчетливое изменение характера коллекторных токов ловушек L_1 и L_3 , регистрирующих разность потоков положительных ионов с энергиями $E_p > 50$ эв и электронов с энергиями $E_e > 70$ эв. Эти изменения, заключающиеся в появлении отрицательных токов при входе в хвост магнитосферы и смене их на только положительные токи в обеих ловушках при выходе из него, могут быть объяснены либо регистрацией существующих внутри хвоста магнитосферы потоков электронов с энергией $E_e > 70$ эв, либо уменьшением в магнитосфере потоков положительных ионов с энергиями $E_p > 50$ эв. Указанные потоки электронов с большой достоверностью зарегистрированы по крайней мере в одном сеансе по пути к Луне на геоцентрическом удалении от Земли $\sim 50 R_z$.

Наблюдавшееся появление отрицательных токов в ловушках L_1 , L_3 в сеансах 23—29.V, проведенных вне магнитосферы Земли, может быть связано с уменьшением потоков положительных ионов солнечного ветра или с постепенным изменением ориентации космического аппарата. Так как трехкратное совпадение изменения ориентации спутника Луны с моментом пересечения им границы хвоста магнитосферы весьма маловероятно, то приведенный выше вывод представляется достаточно обоснованным, особенно учитывая, что он подтверждается и другими данными.

Отсутствие больших положительных токов в ловушках L_1 , L_3 в предполагаемом продолжении хвоста магнитосферы, отсутствие больших отсчетов в модуляционной ионной ловушке L_2 и уменьшение минимальных значений тока в электронной ловушке L_4 в этой зоне, уменьшение средних значений токов ловушек L_2 и L_4 при нахождении Луны в этой зоне по сравнению со значениями, измеренными за ее пределами, также свидетельствуют о различии потоков плазмы в этих областях пространства, т. е. о существовании хвоста магнитосферы Земли во всяком случае вплоть до орбиты Луны.

То обстоятельство, что магнитные измерения, проведенные на «Луне-10», при прохождении через указанную зону не обнаружили особенностей структуры магнитного поля, присущих хвосту магнитосферы Земли (Ш. Ш. Долгинов и др. [28]), может объясняться уменьшением магнитного поля в хвосте магнитосферы по мере удаления от Земли, в результате которого оно стало трудно различимым на фоне повышенного, по сравнению с условиями невозмущенного межпланетного пространства, магнитного поля вблизи Луны, измеренного в [28]. Возможно, что обнаружение существования хвоста магнитосферы на больших удалениях от Земли легче осуществимо при помощи плазменных измерений, чем при помощи магнитных.

Измерение потоков положительных ионов с $E_p > 50$ эв в большинстве сеансов измерений, проведенных, когда Луна находилась заведомо вне хвоста магнитосферы Земли, показывает, во-первых, что величина этих потоков на орбите спутника Луны мало отличается от типичной величины потоков протонов невозмущенного солнечного ветра $\sim 1 \div 5 \cdot 10^8$ см⁻²·сек⁻¹. Применявшаяся аппаратура не позволяла определить энергетический спектр этих потоков. Во-вторых, из одновременной регистрации положительных токов почти диаметрально противоположными ловушками L_1 и L_3 , по-видимому, следует, что вблизи Луны имеется воз-

мощенная область солнечной плазмы, в которой существуют сравнимые по величине потоки ионов, движущиеся в различных направлениях.

Описанные в настоящей статье опыты могут быть использованы для оценки верхней возможной границы концентрации заряженных частиц в ионосфере Луны.

Такая оценка, проведенная по данным как модуляционной ионной ловушки, так и электронной ловушки (одновременное применение которых обеспечило возможность регистрации тепловых заряженных частиц независимо от знака потенциала корпуса аппарата), приводит к наибольшей возможной величине концентрации в $100-300 \text{ см}^{-3}$. При этом предполагается, что максимальные токи модуляционной ловушки полностью определяются потоками тепловых ионов при оптимальной ориентации ловушки по отношению к вектору скорости аппарата и что «малые» значения коллекторного тока электронной ловушки определяются только изотропными потоками тепловых электронов.

В действительности, коллекторные токи этих ловушек могли в значительной степени создаваться неионосферными частицами (в электронной ловушке — фотоэлектронами с поверхности космического аппарата, в ионной ловушке — потоками ионов более высоких энергий). Ряд наблюдаемых фактов, таких как отсутствие заметной зависимости указанных токов от потенциалов на внешней сетке ловушек и от высоты спутника над поверхностью Луны, также заставляет думать о неионосферном происхождении этих частиц. Поэтому приведенные выше оценки следует, по видимому, считать сильно завышенными.

Результаты, полученные в этих первых плазменных экспериментах, проведенных вблизи Луны, делают очевидной программу дальнейшего изучения плазмы в окололунном пространстве. Исследования должны быть продолжены с помощью приборов, позволяющих измерять энергетические спектры потоков солнечной плазмы и углы их прихода относительно направления на Солнце; это позволит изучить структуру зоны возмущенной солнечной плазмы около Луны.

Измерения энергетических спектров положительных ионов при пересечении границ хвоста магнитосферы Земли дадут возможность не только подтвердить существование хвоста магнитосферы у орбиты Луны, но и изучить процесс диффузии солнечной плазмы в глубь хвоста магнитосферы. Кроме того, необходимо осуществить определение энергетического спектра потоков электронов в хвосте магнитосферы.

Использование модуляционной ионной ловушки типа L_2 с известной ориентацией и электронной ловушки типа L_4 заведомо в тени от Солнца может позволить значительно уточнить концентрацию заряженных частиц в ионосфере Луны, особенно если при помощи этих ловушек проводить анализ распределения частиц по энергиям методом тормозящего потенциала.

Дата поступления
10 августа 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, М. З. Хохлов, Л. С. Мусатов, А. П. Ремизов. Докл. АН СССР, 170, № 3, 1966.
2. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, М. З. Хохлов, Г. Н. Застенкер, А. П. Ремизов, Л. С. Мусатов. Докл. АН СССР, 170, № 6, 1966.
3. N. F. Ness. J. Geophys. Res., 70, 2989, 1965.
4. A. J. Dessler. J. Geophys. Res., 69, 3913, 1964.
5. J. W. Dungey. J. Geophys. Res., 70, 1753, 1965.
6. P. Yoh, H. T. Howard, R. R. Lusignan, V. R. Eshelman. J. Geophys. Res., 71, 1, 1966.

7. A. J. Dessler, F. C. Michel. *J. Geophys. Res.*, **71**, 1421, 1966.
8. W. I. Axford, H. E. Petscher, G. G. Siccol. *J. Geophys. Res.*, **70**, 1231, 1965.
9. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, В. Д. Озеров, Р. Е. Рыбчинский. Докл. АН СССР, **131**, № 6, 1361, 1960.
10. К. И. Грингауз, М. З. Хохлов. Сб. «Исследования космического пространства». Изд-во «Наука», 1965, стр. 467.
11. S. J. Vame, J. R. Asbridge, H. E. Felthouser, R. A. Olson, I. B. Strong. *Phys. Rev. Lett.*, **16**, No. 4, 138, 1966.
12. K. A. Anderson. *J. Geophys. Res.*, **70**, 4711, 1965.
13. A. Konrad. *J. Geophys. Res.*, **71**, 2317, 1966.
14. J. A. Van Allen. *J. Geophys. Res.*, **70**, 4731, 1965.
15. J. A. Van Allen. *J. Geophys. Res.*, **71**, 2406, 1966.
16. A. J. Dessler. *J. Geophys. Res.*, **71**, 2408, 1966.
17. G. K. Wehner, C. F. Kenknight, D. L. Rosenberg. *Planet. Space Sci.*, **11**, 1257, 1963.
18. D. L. Rosenberg, G. K. Wehner. *J. Geophys. Res.*, **69**, 3307, 1964.
19. W. Bernstein. *Space Physics*, ed. Le Galley, A. Rosen. New York — London — Sydney, 1964, p. 397. Русск. перев. сб. «Космическая физика», Изд-во «Мир», 1965, стр. 442.
20. B. Elsmore. *Philos. Mag.*, **2**, No. 20, 1040, 1957.
21. J. A. Baily, N. J. B. A. Branson, B. Elsmore, P. A. G. Schever. *Nature*, **201**, No. 4921, 755, 1964.
22. C. Hazard, M. B. Mackey, A. Y. Shimmins. *Nature*, **197**, No. 4872, 1037, 1963.
23. H. N. Hinteregger, K. P. Dymon, L. A. Hall. *J. Geophys. Res.*, **64**, 961, 1959.
24. В. В. Безруких, К. И. Грингауз, Л. С. Мусатов, Р. Е. Рыбчинский, М. З. Хохлов. Докл. АН СССР, **163**, № 4, 873, 1965.
25. К. И. Грингауз. Сб. «Искусств. спутники Земли», вып. 12. Изд-во АН СССР, 1962, стр. 119.
26. K. I. Gringauz, V. V. Bezrukikh, L. S. Musatov, R. E. Rybchinsky, S. M. Shegopova. *Space Res.*, **4**, 621, 1964.
27. Н. Л. Григоров, В. Л. Мадуев, Н. Ф. Писаренко, И. А. Савенко. *Космич. исслед.*, наст. номер, стр. 842.
28. Ш. Ш. Долгинов, Е. Г. Ерошенко, Л. Н. Жузгов, Н. В. Пушков. Докл. АН СССР, **170**, № 3, 1966.