

*ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ*

# **РАДИОФИЗИКА**

Том XII

*ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК*

ИЗДАНИЕ ГОРЬКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
1 9 6 9

533.9 : 550.3

## МАЛОЭНЕРГИЧНАЯ ПЛАЗМА В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

К. И. Грингауз

(Обзор)

## ВВЕДЕНИЕ

Околоземное пространство заполнено заряженными частицами, распределение которых существенным образом влияет на распространение низкочастотных радиоволн вблизи Земли.

Подавляющее большинство этих частиц составляют электроны и ионы сравнительно малых энергий ( $\leq 50$  кэв); концентрации частиц с субрелятивистскими и релятивистскими скоростями, образующих радиационные пояса Земли, и их потоки энергий значительно меньше, чем у малоэнергичной плазмы; практически эти частицы несут как с точки зрения распространения радиоволн, так и в смысле их влияния на такие геофизические явления как полярные сияния, магнитные и ионосферные бури.

«Картографирование» распределения малоэнергичной плазмы в магнитосфере, весьма важное для понимания взаимодействия электромагнитных волн и частиц в ней, как видно из дальнейшего, еще далеко не закончено.

Эксперименты, проведенные при помощи спутников Земли и других космических аппаратов, в течение последнего десятилетия привели к существеннейшим изменениям представлений о физических свойствах околоземного пространства, созданных ранее на основе многолетних наземных наблюдений. В частности, размеры плазменной оболочки Земли — ионосферы, состоящей из заряженных частиц весьма низких (тепловых) энергий, оказались гораздо большими, чем это предполагалось. Были открыты радиационные пояса Земли. Было также найдено, что конфигурация геомагнитного поля на значительных расстояниях от Земли в направлении к Солнцу заметно отличается от поля диполя, а в антисолнечном направлении оно теряет всякое сходство с ним, образуя магнитный хвост протяженностью много сотен земных радиусов, и т. д.

Все эти вновь открытые явления весьма тесным образом связаны с геомагнитными возмущениями, вызываемыми взаимодействием геомагнитного поля с солнечным ветром, в результате которого вблизи Земли возникают сложным образом распределенные потоки заряженных частиц с различными скоростями — от тепловых до релятивистских. Пространственное распределение этих потоков в большой степени определяется структурой магнитного поля вблизи Земли и, в свою очередь, сильно влияет на структуру этого поля (особенно на геоцентрических расстояниях  $\sim (7-10)R_3$ , где  $R_3$  — радиус Земли).

Высота обнаруженной в 1959 году на расстояниях  $\sim 4R_3$  области резкого спада концентрации заряженных частиц в холодной плазменной оболочке Земли (Грингауз и др., 1960 а; Грингауз, 1961 а) оказа-

лась сильно зависящей от геомагнитной активности (Карпенгер, 1963, 1966 а).

После открытия в 1958 г. четко очерченных радиационных поясов во время проведения опытов, целью которых являлось изучение космических лучей (Ван Аллен, 1958; Вернов и др., 1958), казалось, что внешняя граница радиационных поясов, соответствующая  $\sim (7 \div 8)R_3$  в экваториальной плоскости, и является внешней границей околоземного пространства. Зона захваченной радиации представлялась в то время симметричной относительно геомагнитного диполя (зависимость ее характеристик от местного времени была обнаружена лишь в конце 1961 г. (О'Брайен, 1963)).

Поэтому, когда в 1959 г. при полетах советских лунных космических аппаратов во время проведения экспериментов, поставленных с целью изучения межпланетной плазмы, было обнаружено, что за границей внешнего радиационного пояса существуют зоны, в которых имеются значительные потоки малоэнергичных электронов ( $E > 200$  эв), не регистрируемые счетчиками космических лучей, то естественно было предположено, что за границей внешнего радиационного пояса существует третий радиационный пояс, состоящий из весьма мягких электронов, по форме напоминающий внешний пояс, но отличающийся меньшими энергиями электронов и большими величинами их потоков (Грингауз и др., 1960 а; Грингауз и др., 1960 в). В 1961 г. зона существования этих потоков была названа самым внешним поясом заряженных частиц (Грингауз, 1961); о зависимости характеристик потоков в этой зоне от местного времени тогда еще известно не было.

Сейчас известно, что потоки малоэнергичных электронов за границей внешнего радиационного пояса в полуденном направлении принадлежат к нестабильной зоне радиации, доходящей до границы магнитосферы, и к частично термализованной солнечной плазме, образующейся за фронтом ударной волны, которая возникает при взаимодействии сверхзвукового потока солнечной плазмы (солнечного ветра) и геомагнитного поля. Потоки малоэнергичных электронов за границей радиационного пояса с полуночной стороны наблюдаются в нестабильной зоне радиации и в плазменном слое в хвосте магнитосферы, внутри которого находится магнитно нейтральный слой. Однако, когда эти потоки электронов были впервые обнаружены, о степени различия структуры геомагнитного поля за пределами радиационных поясов (т. е. при геоцентрических расстояниях  $\sim (7 \div 10)R_3$ ) над дневной и ночной сторонами Земли еще не было известно.

Современные представления о строении магнитосферы Земли отображены на рис. 1 — одном из последних изображений магнитосферы. (Несс, 1967).

В настоящем обзоре в дальнейшем будут ссылки на этот рисунок: следует, однако, заметить, что, хотя на нем показаны некоторые зоны существования потоков заряженных частиц, он не дает полного представления о распределении заряженных частиц в магнитосфере (автор рисунка, по-видимому, и не ставил это своей задачей). Так, на рисунке не изображена плазменная оболочка Земли (ионосфера), состоящая из частиц с весьма малой (тепловой) энергией, граница которой проходит внутри зоны энергичной захваченной радиации (точнее внутри внешнего радиационного пояса). В то время как на рисунке на ночной стороне магнитосферы радиационный пояс окружен потоками плазмы, на дневной стороне за границей радиационного пояса плазма не показана (в действительности там существуют потоки плазмы в нестабильной зоне радиации и далее в переходном слое за границей магнитосферы).

Совершенно очевидно, что показанная на рис. 1 и столь неожидан-

ная с точки зрения представлений 50-х годов стабильная структура магнитного поля в околоземном пространстве с огромной протяженностью в антисолнечном направлении является результатом наложения на магнитное поле земного диполя магнитных полей некоторой достаточно стабильной системы электрических токов. Совершенно очевидно также, что эти токи не могут быть созданы потоками заряженных частиц с энергиями  $E < 50$  кэв в радиационных поясах, расположенных на сравнительно малых расстояниях от Земли, на которых магнитное поле еще сравнительно мало отличается от дипольного, причем кинетическая энергия частиц в единице объема ( $\Sigma mv^2/2$ ) составляет лишь малую часть от величины энергии магнитного поля  $B^2/8\pi$ .

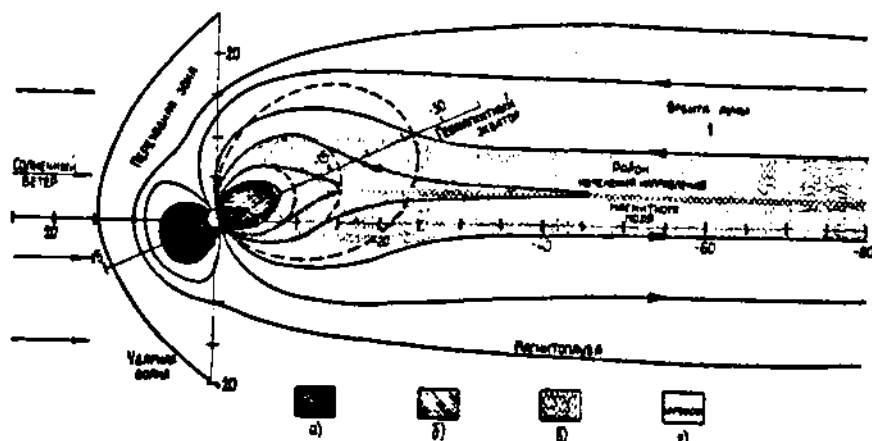


Рис. 1. Структура геомагнитного поля, возмущенного солнечным ветром (магнитосфера Земли в плоскости магнитного меридиана; Несс, 1967): а) радиационные пояса; б) мисообразная область; в) плазменный слой; г) нейтральный слой.

Такие электрические токи могут, однако, создаваться всегда существующими за пределами радиационных поясов потоками заряженных частиц со сравнительно малыми энергиями ( $E < 30-50$  кэв).

Именно потоки заряженных частиц малых энергий, по-видимому, пополняют частицами радиационные пояса и имеют решающее значение для образования полярных сияний и связанных с ними явлений, вот почему некоторые авторы называют их «авроральным излучением». Десслер и Джадей (1965) назвали так потоки малоэнергичной плазмы, поступающие в полярные области из хвоста магнитосферы и связанные с магнитно нейтральным слоем. О'Брайен (1966, 1967) дополнили это понятие, включив в него потоки заряженных частиц в дневной и ночной частях нестабильной зоны радиации, т. е. в области  $8 < L < 10^*$ .

Потоки малоэнергичных заряженных частиц существуют и внутри радиационных поясов, хотя они весьма изменчивы во времени, иногда величина их существенно превышает гораздо более стабильные потоки высокоэнергичных частиц (Грингауз и др., 1965, 1966 а; Пизелла и др., 1966), и могут создавать магнитные бури (Франк, 1967).

Из сказанного следует, что изучение малоэнергичной плазмы является одной из основных проблем магнитосферной физики; основные особенности магнитосферы и главные события в ней определяются распределением в магнитосфере малоэнергичной плазмы, ее характеристиками и поведением (которые, в свою очередь, зависят от солнечного ветра).

\* Об использовании в этом обзоре координаты  $L$  см. ниже.

В настоящем обзоре рассматривается малоэнергичная плазма (состоящая из частиц с энергиями от тепловых до  $\sim 45$  кэВ) в различных областях магнитосферы, в порядке их удаления от Земли. При этом главное внимание уделено описанию результатов экспериментальных исследований.

Несмотря на отмеченную выше большую важность изучения малоэнергичной плазмы в магнитосфере, ее исследования развивались значительно медленнее, чем изучение высокоэнергичной захваченной радиации. Частично это объясняется трудностями создания приборов для регистрации заряженных частиц с малыми энергиями, связанными с необходимостью исключения влияния на показания прибора ультрафиолетового излучения Солнца, вторичных эффектов, создаваемых жесткой радиацией, и т. д.

Если в первые годы после обнаружения существования потоков малоэнергичной плазмы в магнитосфере изучение их велось при помощи «интегральных» приборов, которые позволяли лишь утверждать, что энергии частиц лежат в пределах от сотен электронвольт до минимальных энергий, регистрируемых счетчиками высокоэнергичных частиц (Грингауз и др., 1960; Грингауз и др., 1964; Фримен, 1964), то в последние годы проведены измерения, позволяющие определять энергии частиц со значительно большей точностью (Вернов и др., 1965, 1966; Вульф и др., 1966 а, 1966 б, 1967; Бейм и др., 1967; Франк, 1967 а, 1967 б; Василюнас, 1968 б).

Результаты экспериментальных исследований малоэнергичных частиц в магнитосфере и понимание отдельных вопросов в последние годы (1965—68) излагались в ряде обзоров и во введениях к некоторым оригинальным статьям (Безруких, Грингауз, 1965; Тейлор и др., 1965; Грингауз, Хохлов, 1965; Карпентер, 1966; О'Брайен, 1967; Данжи, 1967; Несс, 1967; Бинзак, 1967; Франк, 1967 а; Василюнас, 1968 б и др.).

В этом обзоре делается попытка кратко просуммировать сведения, опубликованные до начала Вашингтонского симпозиума\*. Допустимые размеры обзора не позволяют уделить внимание вопросам методики измерений заряженных частиц малых энергий в космическом пространстве, хотя они, бесспорно, представляют весьма значительный интерес.

В обзоре будет использоваться введенный Мак Иллюэйном (1961) параметр магнитной оболочки  $L$ , для дипольного поля равный расстоянию от центра диполя (центра Земли) до геомагнитной оболочки, выраженному в  $R_z$ . Этот параметр для высоких широт (при  $L > 8-10$ ) лишен физического смысла, так как геометрия реального геомагнитного поля соответствует рис. 1. Однако многие авторы, представляя экспериментальные результаты, условно пользуются этим параметром и при  $L > 10$ ; также поступим и мы.

Некоторые характеристики упоминаемых в дальнейшем пролетающих через магнитосферу космических аппаратов и спутников, на которых были установлены приборы для изучения плазмы, приведены в табл. 1.

### 1. ПЛАЗМЕННАЯ ОБОЛОЧКА ЗЕМЛИ (ПЕРИФЕРИЯНАЯ ОБЛАСТЬ ИОНОСФЕРЫ)

Целесообразно начать с терминологии. В этой части обзора будут приведены данные, относящиеся к области на высотах до 20 000 — 30 000 км, заполненной электронами и протонами с тепловыми энергиями (не превышающими единиц электронвольт).

В литературе (как уже отмечалось ранее, Грингауз, 1967) для этой

\* Международный симпозиум по физике магнитосферы в Вашингтоне, 3—13 сентября 1969 г.

области использовалось много различных наименований: «ионизированная компонента геокорона» (Грингауз и др., 1960), «протоносфера» (например, Гейслер и Боухилл, 1965), «магнитоносфера» (Тейлор и др., 1965), «плазмосфера» (Карпентер, 1966), «периферийная часть ионосферы» (Грингауз, 1966).

Таблица 1

Космический аппарат	Дата запуска	Апогей (км)	Перигей (км)	Накло-ние к экватору	Приборы для изучения малоэнергичной плазмы
1. Луна-1	2.I.1959				Ловушки заряженных частиц
2. Луна-2	12.IX.1959				Ловушки заряженных частиц
3. Эксплорер-12	16.VIII.1961	83600	6700	33°	Детектор CdS; сферический электростатический анализатор
4. Алуэтт-1	29.IX.1962	1000 (круговая орбита)		80°	Станция для радиозондирования ионосферы; приемник УНЧ излучения
5. Эксплорер-14	2.X.1962	85300	300	33°	Сферический электростатический анализатор
6. Марс-1	1.XI.1962	Межпланетная станция			Ловушки заряженных частиц
7. Инджун-3	13.XII.1962	2785	237	70,4°	Электронный умножитель
8. ИМП-1	27.XI.1963	191230	197	33°	Ловушки заряженных частиц (анализатор с тормозящим потенциалом и фарадеева чаша модуляционного типа). Сферический электростатический анализатор
9. Электрон-2	30.I.1964	68200	460	61°	Ловушка заряженных частиц. Электростатический анализатор
10. Электрон-4	11.VII.1964	66235	460	61°	Ловушка заряженных частиц; сферический электростатический анализатор
11. Вела-2 В	17.VII.1964	115140	90920	40°	Сферический электростатический анализатор
12. Ого-1	5.XI.1964	150000	280	31°	Фарадеева чаша (ловушка заряженных частиц модуляционного типа); сферический электростатический анализатор
13. ИМП-2	4.X.1964	93910	197	33°	Ловушка заряженных частиц; анализатор с тормозящим потенциалом и фарадеева чаша модуляционного типа; сферический электростатический анализатор
14. Эксплорер-22	19.X.1964				Цилиндрический зонд Ленгмюра, станция для радиозондирования ионосферы

Космический аппарат	Дата запуска	Апогей (км)	Перигей (км)	Наклонение к экватору	Приборы для изучения малознергичной плазмы
15. Инджун-4	21.XI.1964	2495	530	81°	Сцинтилляционный счетчик для измерения энергий потоков
16. Зонд-2	30.XI.1964	Межпланетная станция			Ловушки заряженных частиц интегрального и модуляционного типа
17. Вела-3А	20.VII.1965	115840	106370	35°	Сферический электростатический анализатор
18. Вела-3В	20.VII.1965	122090	100570	34°	Сферический электростатический анализатор
19. Алуэтт-2	29.XI.1965	2980	500	80°	Станция для радиозондирования ионосферы
20. Луна-10	31.III.1966	Спутник Луны			Ионная ловушка; электронная ловушка; ловушка для регистрации ионов тепловых энергий модуляционного типа — фарадеева чаша
21. Ого-3	7.VI.1966	122300	295	31°	Ловушка заряженных частиц модуляционного типа; 4 цилиндрических электростатических анализатора
22. Эксплорер-33	1.VII.1967	440000	50000	7°	Ловушка заряженных частиц модуляционного типа
23. Пионер-7	17.VIII.1966	Межпланетная станция			Ловушка заряженных частиц модуляционного типа; четвертьсферический анализатор
24. АТС-1	7.XII.1966	Синхронная орбита 35800			Ловушка для регистрации ионов тепловых энергий
25. Эксплорер-35	19.VII.1967	Спутник Луны			Ловушки заряженных частиц модуляционного типа

Если, начиная с высот 1500—2000 км (которые всегда относятся к ионосфере), измерять электронную или ионную концентрацию при помощи вертикально поднимающейся ракеты, то приборы не обнаружат никаких особенностей в ходе концентрации, вплоть до области ускоренного уменьшения концентрации заряженных частиц («колена»). Иначе говоря, между обычной ионосферой и рассматриваемой областью не имеется границы. Не было даже сделано попыток хотя бы условно определить такую границу. Поэтому, хотя термин «плазмосфера» приобретает все большую популярность, «периферийная часть ионосферы» представляется мне более подходящим названием для этой области.

В настоящее время имеется ряд наблюдений как ионного, так и электронного компонентов периферийной части ионосферы, позволяющих с достаточной уверенностью говорить о ее некоторых физических особенностях и, в частности, о существовании (во всяком случае на умеренных геомагнитных широтах, на геоцентрических расстояниях от  $\sim 3R_3$  до  $\sim 6R_3$ ) области резкого излома (спада) в высотном распределении концентрации заряженных частиц (так называемого

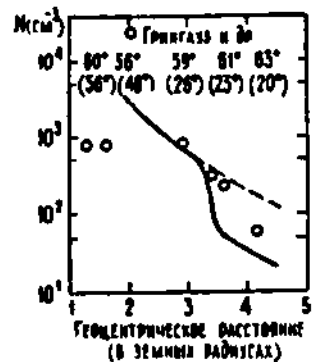
«колена»). Границей периферийной области ионосферы будем считать границу области, лежащей ниже «колена», и называть ее «плазмопаузой» (вслед за Карпентером, 1966).

Первые прямые изменения концентрации положительных ионов в положительной области ионосферы были выполнены в 1959 г. при помощи ловушек заряженных частиц на советских лунных космических аппаратах Луна-1 и Луна-2 (Грингауз и др., 1960; Грингауз, 1961). Эти измерения обнаружили существование на высотах  $\sim 20\,000$  км ( $R \sim 4R_3$ ) области ускоренного спада концентрации заряженных частиц, своеобразного «плато» в их высотном распределении, и впервые позволили дать грубую оценку ионной температуры  $T_i$  при  $4R_3$  (а именно—утверждать, что  $T_i$  не превышает десятков тысяч градусов).

Весьма важным этапом в изучении этой области явилось обнаружение области «колена» в экваториальном высотном распределении электронной концентрации  $n_e$ , при анализе результатов наземных наблюдений распространения вистлеров (Карпентер, 1963). Эта работа явилась началом серии исследований, выполненных лично Карпентером и при его участии, в результате которых получены богатые в статистическом отношении данные, характеризующие изменения высоты области «колена» в экваториальной зоне периферийной части ионосферы в зависимости от местного времени и геомагнитной активности.

Рис. 2, взятый из первого сообщения Карпентера (1963), показывает профиль  $n_e$  по данным вистлеров; белыми кружками показаны значения ионной концентрации  $n_i$  на соответствующих геоцентрических расстояниях, определенных в 1959 г. по данным ловушек заряженных частиц на Луне-2. При этом автор работы считал согласие между этими данными удовлетворительным.

Рис. 2. Электронная плотность  $n_e$  (по данным свистящих атмосфериков) и ионная плотность  $n_i$  (по данным космического аппарата Луна-2) в функции геоцентрического расстояния. В верхней части графика приведены инвариантные (без скобок) и геомагнитные (в скобках) широты, пересекаемые Луной-2 (Карпентер, 1963)



Обсуждая различие между данными, полученными на Луне-2, и результатами Карпентера. Обаяши (1964) указал, что возможной причиной различия высотных зависимостей концентраций заряженных частиц может быть то, что измерения относятся к районам с различными геомагнитными широтами. Высотное распределение температуры ионосферной плазмы может сильно зависеть от геомагнитной широты—на высоких широтах температура может быть выше из-за того, что теплопроводность ионосферы имеет существенно анизотропный характер; это может отразиться на высотном распределении концентрации заряженных частиц. Карпентер и Смит (1964) отметили, что расхождение между относящимся к экваториальной плоскости  $n_e$  профилем на рис. 2, построенным по данным Луны-2, может быть связано с уменьшением концентрации на сравнительно малых высотах при росте геомагнитной широты, так как измерения  $n_e$  на Луне-2 начались на высоте  $\sim 2000$  км при геомагнитной широте  $60^\circ$ .



В дальнейшем Карпентер (1966) обработал весьма обширный экспериментальный материал по вистлерам, зарегистрированным на высокоширотных станциях в Антарктике, измеряемый сотнями тысяч сонограмм. На рис. 3 приведены усредненные данные о положении «колена» в плоскости геомагнитного экватора, относящиеся к дням с умеренной геомагнитной активностью ( $K_p=2-4$ ).

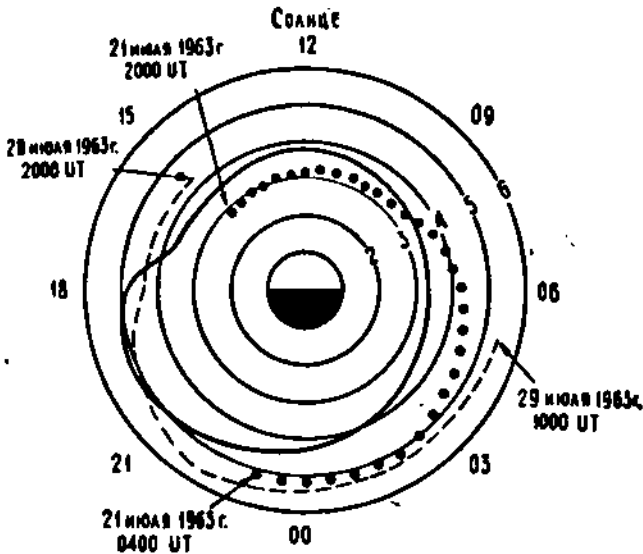


Рис. 3. Изменения положения плазмопаузы в зависимости от местного времени. Цифры указывают значения  $R$ , выраженные в  $R_E$ . Точечная кривая соответствует увеличению уровня магнитной активности, штриховая — уменьшению магнитной активности (Карпентер, 1966).

Штриховой линией показано положение «колена» с 15.00 LT 28 июля по 4.30 LT 29 июля 1963. Кривая, характеризующая усредненные суточные вариации положения «колена» (или, что то же, плазмопаузы), для дней с умеренной геомагнитной активностью имеет следующие особенности:

- 1) наименьшее геоцентрическое расстояние области «колена» наблюдается в утренние часы (около 6.00 LT) и составляет 3—3,5  $R_E$ ;
- 2) около 18.00 LT происходит резкое увеличение высоты области «колена», такое, что  $R$  меняется от 3,5 до 5. Движение области «колена» вниз происходит гораздо медленнее и длится приблизительно 10 часов;
- 3) от 6.00 LT до полудня высота области «колена» плавно увеличивается.

В первых же работах, в которых описывается «колени», отмечалось, что высота «колена» сильно зависит от уровня геомагнитной возмущенности (Карпентер, 1963; Карпентер и Смит, 1964). Подробные данные об этой зависимости опубликованы позже (Карпентер, 1966). Пример таких данных приводится на рис. 4, из которого ясно видно, что рост геомагнитных возмущений вызывает приближение «колена» к Земле. Автор отметил, что изменение уровня геомагнитной возмущенности отражалось на высоте «колена», как правило, через 6 часов.

Анализ многих данных, использованных Карпентером с учетом изложенных далее результатов масс-спектрометрических исследований

ионов (Тейлор и др., 1965), позволил ему предложить предварительную модель распределения тепловой плазмы вокруг Земли. Согласно этой модели Земля окружена плазменной оболочкой, вращающейся вместе с Землей. При умеренной геомагнитной активности проекция этой оболочки на плоскость геомагнитного экватора напоминает окружность (за исключением области 17.00 LT — 24.00 LT), рис. 3. С увеличением геомагнитной активности оболочка сжимается, а ее асимметрия растет. Напротив, с уменьшением  $K_p$  плазменная оболочка расширяется, а ее асимметрия уменьшается.

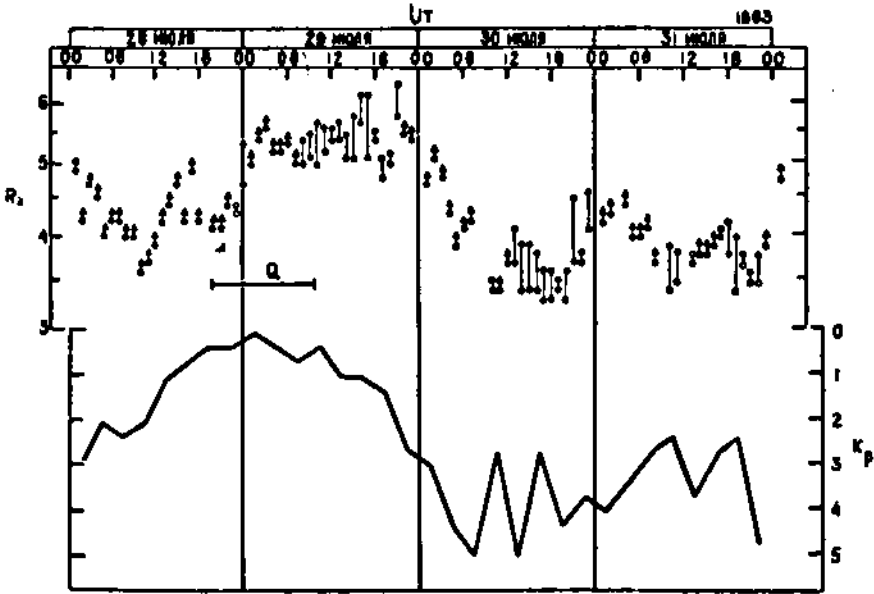
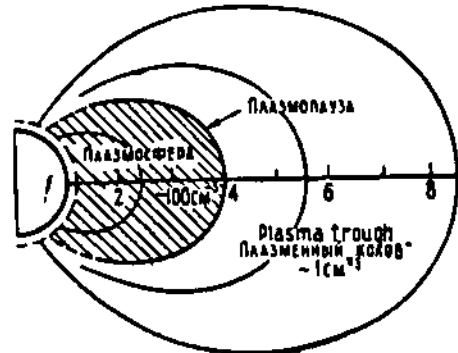


Рис. 4. Положение плазмосферы в функции геомагнитной активности за период времени с 28 июля по 31 июля 1963 года; время мировое (Карпентер 1956).

На рис. 5 показана идеализированная меридиональная проекция дневной части плазменной оболочки (~14.00 LT). Заштрихованная область ограничена магнитной оболочкой  $L = 4$  с концентрацией электронов  $n_e = 10^2 \text{ см}^{-3}$ , за пределами этой области  $n_e \sim 1 \text{ см}^{-3}$ . По мнению Карпентера, вдоль силовой линии  $L = 4$  при малых магнитных возмущениях существует довольно резкая граница этой области. С приближением к Земле, однако, различие величин  $n_e$  по обе стороны границы может значительно уменьшиться. На рис. 5 этот участок сило-

Рис. 5. Модель распределения тепловой плазмы в меридиональном сечении магнитосферы около 14.00 LT (при умеренной геомагнитной активности,  $K_p = 2-4$ ) (Карпентер, 1966).



вой линии обозначен пунктиром. Усредненные многочисленных результатов анализа записей вистлеров (Карпентер, 1966), зарегистрированных при умеренной геомагнитной активности, показало, что высотное распределение имеет резкий излом на геоцентрических расстояниях  $\sim 4R_3$  и в дневные, и в ночные часы. Если, однако, ночью изменение  $n_i$  составляет 30—100 раз на расстоянии  $0,15 R_3$ , то днем это изменение уменьшается до 10 раз.

Измерения ионного компонента окружающей Землю тепловой плазмы при помощи ловушек заряженных частиц, начатые на советских лунных ракетах в 1959 г., были продолжены в 1964 г. на спутниках типа Электрон. Некоторые предварительные результаты, полученные на спутнике Электрон-2 и относящиеся к экваториальным районам периферийной ионосферы, были опубликованы в 1965 г. (Безруких, Грингауз, 1965; Грингауз и др., 1966); более детальные результаты приводятся в работе Безруких, 1968. На рис. 6 и 7 приводятся образцы результатов измерений на спутниках Электрон. Из рис. 7 видно, что из данных, полученных на спутниках Электрон, можно сделать выводы, близкие к указанным выше выводам Карпентера.

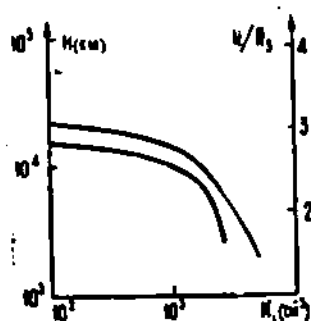


Рис. 6. Высотное распределение ионной плотности ( $n_i$ ) в области, близкой к магнитной экваториальной плоскости, по данным ловушек заряженных частиц на спутнике Электрон-2 (Безруких и Грингауз, 1965).

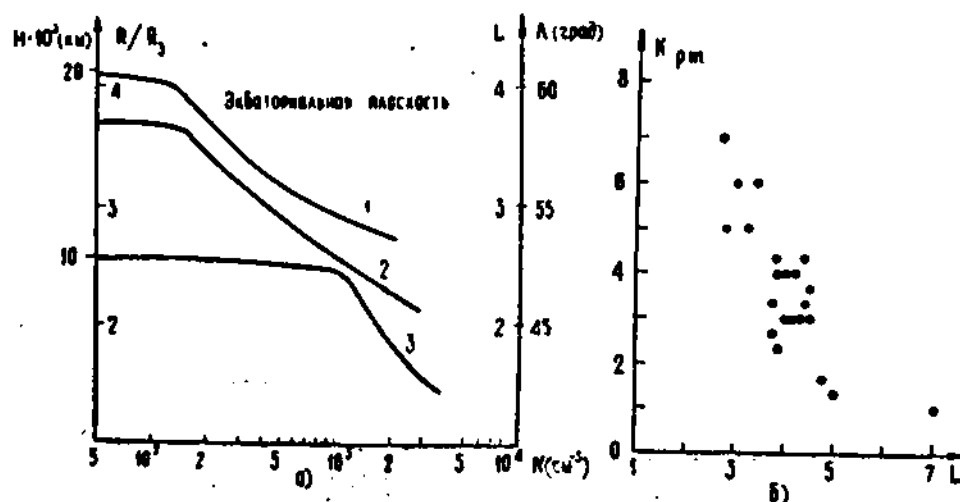


Рис. 7а. Ионная плотность  $n_i$  как функция высоты  $H$ , геоцентрического расстояния  $R$  и  $L$ -координат (ночные часы: январь—февраль 1964; данные спутника Электрон-2 (Безруких, 1968): 1)—31.01, 1964,  $K_{pm}=3$ ; 2)—12.02, 1964,  $K_{pm}=4$ ; 3)—14.02, 1964,  $K_{pm}=5$ ).

Рис. 7б. Связь между положением «колена» в  $L$ -координатах и максимальным  $K_p$ -индексом в течение дня, предшествующего измерениям по данным спутников Электрон-2 и Электрон-4 (Безруких, 1968).

Ионные компоненты периферийной части ионосферы изучались

также при помощи радиочастотного масс-спектрометра типа Беннета на спутниках Ого-1 и Ого-3 (Тейлор и др., 1965; Тейлор и др., 1968). На этих же спутниках данные о положении плазменпаузы были получены при помощи плазменных детекторов типа ловушки заряженных частиц (Василюнас, 1968). Кроме того, данные о периферийной части ионосферы были получены при помощи ловушек заряженных частиц на спутнике ИМП-2 (Сербу и Майер, 1966 а, 1966 б; Бинзак, 1967).

На рис. 8 и 9 показаны некоторые результаты ионных масс-спект-

Рис. 8. Плотности протонов и ионов гелия как функции координат по данным масс-спектрометра на спутнике ОГО-1 (Тейлор и др., 1965):

- — 2 ноября 1964;
- - - - 10 ноября 1964;
- · - · - 26 ноября 1964.

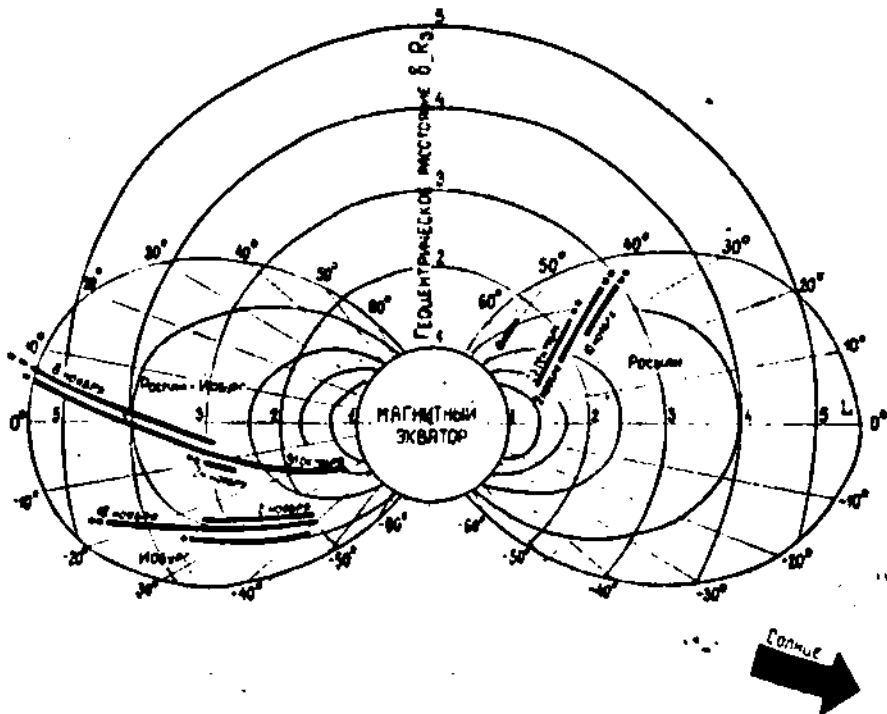
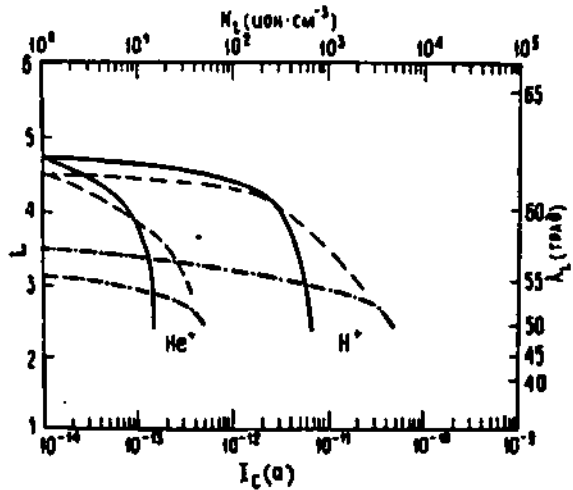


Рис. 9. Участки орбит, на которых наблюдался спад протонного тока для десяти пролетов спутника Ого-1. Сплошная часть каждой кривой соответствует области постепенного спада ионного тока с высотой; начало штриховой части указывает положение резкого спада тока (Тейлор и др., 1965).

рометрических измерений на Ого-1 (Тэйлор и др., 1965). Из данных этих измерений следовало, что в подавляющем большинстве случаев «плато» в высотном распределении  $n$ , опускается при высокой геомагнитной активности и поднимается при низкой. Вопросы сжатия периферийной части ионосферы в связи с геомагнитными возмущениями по данным ионных радиочастотных масс-спектрометров, полученным в 1965—66 гг. на спутниках Ого-1 и Ого-3, исследованы в статье Тэйлора и др. (1968), авторы которой приходят к выводу о существовании обратной корреляции между координатой  $L$  плазмопаузы и максимальным  $K_p$ -индексом за 24 часа, предшествующие измерениям. Во время событий, связанных с солнечными вспышками 15 июня 1965 г. и 7—9 июля 1966 г. при  $K_p = 5$ , плазмопауза опускалась от  $L = 6$  до  $L = 3,3$ .

Карпентер, Парк и Тэйлор (1968) во время полетов спутников Ого-1 и Ого-3 одновременно несколько раз наблюдали «колена» тремя независимыми способами: по анализу вистлеров, зарегистрированных в Антарктике, при помощи ионного масс-спектрометра на спутнике и по измерениям УНЧ излучения на спутнике. При последнем способе пересечение спутником плазмопаузы отличается резким изменением характера принимаемого УНЧ излучения. Наблюдаемые величины  $L$ -координаты «колена» лежали в пределах 3,2—5,5. Одновременные измерения на Земле и на спутнике при разнице местного времени около 1 часа определяют одну и то же положение плазмопаузы (в пределах экспериментальной ошибки  $\pm 0,2 R_E$ ). Измерения положения плазмопаузы на спутнике при помощи масс-спектрометра и УНЧ приемника в описываемых авторами случаях дали расхождение  $\sim 0,1 R_E$ .

Эти эксперименты показывают, что определения положения «колена» заслуживают доверия как в случае наземных наблюдений вистлеров, так и при измерениях на спутниках. Они свидетельствуют также о справедливости предположения, что плазмопауза (во всяком случае, на умеренных геомагнитных широтах) имеет форму геомагнитной оболочки.

На тех же спутниках Ого-1 и Ого-3 и на спутнике ИМП-2 устанавливались плазменные детекторы Массачузетского технологического института, предназначенные для регистрации электронов (Бинзак, 1967; Василюнас, 1968). Анализ показаний этих приборов и особенностей регистрации ими заряженных частиц показал, что вследствие некоторых вторичных процессов, на которых мы не останавливаемся, они уверенно регистрировали вхождение спутников в зону значительных концентраций положительных ионов, т. е. пересечение спутниками плазмопаузы. Сопоставление изменений положения плазмопаузы с изменениями геомагнитной активности привели авторов к выводам, близким к указанным выше выводам Карпентера и Тэйлора и др. В частности, Бинзак считает, что при магнитно спокойных условиях плазмопаузе соответствует  $L = 6$  и что при увеличении  $K_p$  координата, соответствующая плазмопаузе, может быть приближенно описана при помощи эмпирической формулы

$$\Delta = 6 - 0,6 K_p,$$

где  $K_p$ -индекс относится ко времени измерений.

Следует отметить, что на том же спутнике ИМП-2 одновременно проводились измерения как электронного, так и ионного компонентов плазменной оболочки Земли при помощи ловушек заряженных частиц (с анализом энергий частиц методом задерживающего потенциала, Сербу и Майер, 1966 а, 1966 б). При интерпретации данных этого эксперимента авторы не обнаружили «колена» в распределении концентрации заряженных частиц. Мы уже отмечали, что этот результат противоречит ряду других независимых наблюдений (Грингауз, 1967). Теперь к этому можно добавить, что он находится в противоречии даже с одно-

временными наблюдениями, выполненными на том же космическом аппарате (Бинзак, 1967). Причина этих противоречий нуждается в выяснении.

Из результатов тех же измерений, проведенных на спутнике ИМП-2, Сербу и Майер сделали вывод в том, что при  $4R_3 < R < 10R_3$  ионная температура существенно превышает электронную ( $T_e \sim 1-2 \text{ эв}$ ,  $T_i \sim 4-8 \text{ эв}$ ). Заметим, что эти величины  $T_i$  существенно превышают оценки верхнего предела  $T_i$  при  $R < 5,5 R_3$  по данным Электрона-2 (Безруких и др., 1967). Из теоретических температурных моделей периферийной части ионосферы (Гейслер и Боухил, 1965; Глиддон, 1966; Бауэр, 1967) следует, что при отсутствии селективных источников нагрева и охлаждения электронного и ионного газов  $T_i$  не должна превышать  $T_e$ ; сколько-нибудь удовлетворительного механизма такого селективного нагрева пока не обнаружено. Исследования нижней части ионосферы, проведенные в последние годы, показали, что геомагнитное поле в значительной степени контролирует поведение ионосферы. Ряд ионосферных особенностей, связанных с транспортировкой заряженных частиц вдоль геомагнитных силовых трубок, указан в обзоре Родерера (1967), посвященном явлениям в магнитосопреженных точках. Были обнаружены значительные широтные градиенты на высоких широтах, связанные с провалом (trough) электронной концентрации на высотах от 1000 км до максимума слоя F, по данным ионограмм, полученных со спутника Алуэт-1 (Томас и др., 1964), а также на высоте  $\sim 1000$  км по результатам зонда Ленгмюра на спутнике Эксплорер-22 (Брэйс и Редди, 1965). Поразительно малые величины обнаружены по данным высокоширотных ионограмм, полученных со спутника Алуэт-2, на высотах 1500—3000 км, где при  $L > 6$  определены значения  $n_e$  в пределах от 8 до 100  $\text{см}^{-3}$ , причем граница области существования 30  $\text{см}^{-3}$  смещается по геомагнитной широте от полудня к полуночи на  $8^\circ$  (Харг, 1967). Авторы этих экспериментов отмечают подобие упомянутых явлений, обнаруженных в высокоширотных областях на малых высотах, с «коленом», наблюдаемым на больших высотах при малых геомагнитных широтах. Хотя связь этих явлений представляется нам бесспорной, однако она не может служить полным объяснением существования «колена», хотя бы потому, что сами особенности высокоширотной ионосферы на малых высотах также нуждаются в объяснении. Кроме того, как отметили Ангерман и Карпентер (1966), имеются некоторые несоответствия между вариациями положения «колена» в экваториальной плоскости и вариациями нижней части ионосферы на высоких широтах.

В 1961 г. была опубликована теория высокоширотных геофизических явлений и магнитных бурь Эксфорда и Хайнса, в которой предлагалась модель магнитосферы, содержащая во внешних ее частях конвективно движущуюся плазму. Источником конвекции принималось вязкоподобное взаимодействие магнитосферной плазмы с солнечным ветром. В результате конвективного движения плазмы в магнитном поле в магнитосфере создаются электрические поля. Вблизи геомагнитного диполя образуется запрещенная зона, в которую плазма, участвующая в конвекции, не проникает, с размерами, определяемыми геомагнитной широтой  $62^\circ$ , что соответствует в экваториальной плоскости  $\sim 4,5 R_3$ . Совершенно ясно, что законы изменения плотности плазмы в зависимости от геоцентрического расстояния внутри запрещенной зоны и вне ее должны быть различными.

Тогда же была предложена модель магнитосферы с конвективным движением магнитосферной плазмы, вызываемым соединением силовых линий хвоста магнитосферы с силовыми линиями межпланетного магнитного поля (Данжи, 1961).

Таким образом, вскоре после опубликования первых эксперимен-

тальных данных, полученных на лунных ракетах, о распределении концентрации заряженных частиц при  $R$  порядка нескольких  $R_3$  и независимо от этих данных были опубликованы теоретические аргументы, позволяющие сделать вывод о существовании излома в распределении плазмы при  $R$  порядка  $4,5R_3$ . Позднее был опубликован ряд теоретических статей, в которых общей чертой было признание существования конвекции в магнитосфере и запрещенной зоны и в которых граница этой зоны прямо отождествляется с «коленом» (Блэк, 1966; Нишида, 1966; Данжи, 1966; Самохин, 1966, 1967, 1967 а, 1968; Каванах и др., 1968; Брайс, 1967). Эти работы отличаются друг от друга по выбору причин, создающих конвективное движение магнитосферной плазмы и запрещенную зону, по конфигурации постулируемых магнитосферных электрических полей; в одних работах существенное значение имеет вращение Земли, а в других оно не учитывается. Тем не менее конвективное движение плазмы является одной из основных особенностей рассмотренных магнитосферных моделей.

Необходимо отметить, что если до недавнего времени о наличии конвективной циркуляции плазмы в магнитосфере судили по косвенным данным (таким, как наземные наблюдения дрейфов полярных сияний и радиосияний, геомагнитных возмущений на высоких широтах и т. д.), то в последнее время измерения, проведенные на геостационарном спутнике АТС-1, по-видимому, дали прямые экспериментальные свидетельства существования конвекции (Фримен, 1967; Фримен и др., 1968; Фримен и Юнг, 1968). Установлено наличие движения со скоростью  $\sim 30$  км·сек<sup>-1</sup> магнитосферных ионов с тепловой энергией ( $E \sim 1$  эв). По оценке авторов это движение соответствует электрическому полю  $\sim 5$  мВ·м<sup>-1</sup>, направленному поперек магнитосферы с утренней стороны к вечерней.

В модели Десслера и Мичела (1966) распределение плотности плазмы в магнитосфере объясняется без использования конвективного движения на основе испарения плазмы из полярных областей ионосферы вдоль силовых линий открытого хвоста магнитосферы.

В последних работах Эксфорда (1968), Бэнкса и Холцера (1968) приводятся аргументы и расчеты, свидетельствующие в пользу сверхзвукового истечения плазмы из полярных областей ионосферы (названного ими «полярным ветром»), которое также может служить для объяснения существования «колена».

Рассмотренные упомянутых работ могло бы само быть предметом специального обзора и, по-видимому, будет в какой-то степени сделано в следующем докладе.

Резюмируя, можно сказать следующее. Совокупность имеющихся сейчас экспериментальных данных о холодной (тепловой) плазме в магнитосфере дает основание считать, что существует характерная поверхность — граница самой внешней части ионосферы — плазмопауза, которая, по-видимому, отделяет магнитосферную плазму, участвующую в конвективном движении, от плазмы, вращающейся вместе с Землей. Плазмопауза расположена внутри внешнего радиационного пояса; при увеличении геомагнитной активности она сжимается (приближается к Земле), а при уменьшении расширяется.

Возвращаясь к модели Карпентера (1966), определяемой в экваториальной плоскости, рис. 3, и в меридиональной, рис. 5, следует заметить, что, пользуясь ею, целесообразно иметь в виду следующее.

1) Метод, используемый при получении концентрации электронов из данных вистлеров, позволяет определять значения  $n$ , только в экваториальной плоскости.

2) При построении модели холодной плазменной оболочки Земли в меридиональном сечении Карпентер частично опирался на результаты

Тэйлора и др. (1965), полученные на Ого-1. Однако этот спутник так же, как и спутники ИМП-2 и Ого-3, имеет сравнительно малый наклон орбиты к экватору, вследствие чего полученные данные относятся к области геомагнитных широт  $\leq 45^\circ$ . По-видимому, именно по этой причине автор модели отметил, что часть граничной силовой линии, показанная пунктиром, соответствует области, в которой структура «колена» недостаточно хорошо известна.

Следует отметить, что именно на профилях концентрации заряженных частиц, относящихся к геомагнитным широтам  $> 45^\circ$  и полученных в 1964 г. при помощи ловушки заряженных частиц на спутнике Электрон-4, четко выраженное «колено» отсутствует (Безруких, 1968).

Необходимо также иметь в виду, что определения концентрации положительных ионов по данным масс-спектрометров на спутниках Ого осуществлены с точностью до фактора 5 в связи с трудностями пересчета величин измеренных токов в концентрации частиц (Тэйлор и др., 1965) и что с аналогичными трудностями приходилось сталкиваться при обработке данных, полученных на спутниках Электрон (Безруких, Грингауз, 1965).

Поэтому к рассматриваемой модели следует подходить с некоторой осторожностью, не рассматривая ее как окончательную, тем более, что и сам автор называет ее «предварительной».

## 2. ПОТОКИ МАЛОЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ ( $E \leq 40$ кэВ) В ЗОНЕ ЗАХВАЧЕННОЙ РАДИАЦИИ

Оценки потоков частиц в радиационных поясах были первоначально сильно завышены авторами первых американских и советских экспериментальных исследований, а энергии их были приняты слишком малыми. Считалось, что во внешнем поясе поток электронов составлял  $10^{10} - 10^{11}$  см<sup>-2</sup>·сек<sup>-1</sup> при энергиях  $E > 20$  кэВ. Такие оценки были связаны с тем, что для интерпретации показаний приборов, применявшихся для наблюдений, приходилось делать недостаточно обоснованные предположения об энергетическом спектре изучаемых частиц. Несмотря на то, что данные ловушек заряженных частиц на аппарате Луна-2 показали, что полные потоки электронов во внешнем радиационном поясе не могли превышать  $2 \cdot 10^7$  см<sup>-2</sup>·сек<sup>-1</sup> (Грингауз и др., 1960; Грингауз и др., 1963), остальными экспериментаторами до 1962—63 гг. принимались величины потоков, завышенные на три порядка.

Столь большие потоки позволяли многим авторам считать, что энергичные заряженные частицы, захваченные во внешнем поясе, могут служить причинами магнитных бурь, высыпание их в атмосферу может непосредственно создавать полярные сияния и т. п.

Когда пониженные оценки потоков электронов и их более жесткий энергетический спектр стали общепризнаны, интерес к внешнему радиационному поясу, как к причине других важных геофизических явлений, значительно ослаб. Он, по-видимому, вновь возрастает сейчас, после того как установлено существование во внешнем поясе потоков малоэнергичных частиц, весьма сильно меняющихся во времени, плотность энергии которых иногда становится весьма значительной.

Начнем с рассмотрения внутреннего радиационного пояса ( $L \leq 2$ ).

Сообщения о потоках малоэнергичной плазмы в нем весьма малочисленны. Фримен (1962) интерпретировал результаты наблюдений при помощи кристаллического детектора CdS на спутнике Инджун-1 на высоте  $\sim 1000$  км при  $L > 1,7$  как свидетельствующие о потоках протонов с энергией  $0,5$  кэВ  $< 5 < 1$  МэВ, несущих поток энергии  $50$  эрг·см<sup>-2</sup>·сек<sup>-1</sup>.

Франк и Суншер (1968) на основании данных, полученных в 1966 г.,



при полете спутника Ого-3 при помощи электростатического анализатора, отметили, что при  $L < 1,7$  максимальные потоки энергии зарегистрированных протонов с энергиями от 100 эв до 50 кэв меньше величины, указанной Фрименом, в 10—100 раз. Они отметили также, что анализ полученных в 1965 г. результатов экспериментов на спутнике Инджун-4 (неопубликованные данные) показал, что поток энергии протонов с энергией  $E > 30$  кэв во внутреннем радиационном поясе также в 10—100 раз меньше величины, указанной Фрименом. Так как измерения на упомянутых трех спутниках были проведены в существенно разные времена, то нельзя исключить возможность того, что расхождение результатов связано с изменениями характеристик внутреннего пояса с 1961 г. до 1966 г.

Единственные, по-видимому, сообщенные до настоящего времени результаты измерений потоков протонов с энергиями  $E < 50$  кэв при  $L < 2$  относятся к периоду геомагнитных возмущений и приведены на рис. 10 (указаны верхние пределы, Франк, 1967 б). Какие-либо результаты измерений потоков электронов с энергиями  $E < 50$  кэв во внутреннем радиационном поясе не публиковались.

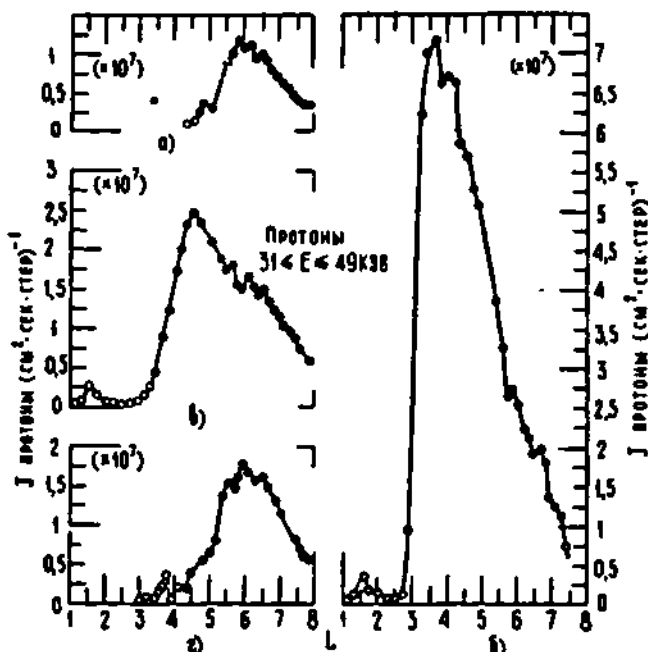


Рис. 10. Величины потоков протонов с энергией  $E < 50$  кэв в функции  $L$ -координат во время магнитного возмущения по данным электростатического анализатора на спутнике Ого-3 (Франк, 1967): а) — 7 июля 1966, перед магнитной бурей; б) — 9 июля, главная фаза; в) — 11 июля, фаза восстановления; г) — 13 июля, после магнитной бури. Условные обозначения: ●●● — интенсивность; ○○ — верхний предел.

Более полны сведения о малоэнергичной плазме во внешнем радиационном поясе.

При полете космического аппарата Луна-1 в январе 1959 г. при помощи ловушек заряженных частиц, начиная с геоцентрического расстояния  $\sim 5R_z$ , были обнаружены потоки электронов  $\sim 2 \cdot 10^8$   $\text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$  с энергией  $E > 200$  эв, превышающие по величине примерно

на порядок потоки высокоэнергичных электронов в максимуме внешнего радиационного пояса (Грингауз и др., 1960 b). Последующий анализ показал, что эти потоки частично зарегистрированы в утренней части магнитосферы внутри внешнего радиационного пояса.

Фримен и др. (1963) упоминали о том, что на Эксплорере-12 в дневном секторе магнитосферы иногда наблюдались малоэнергичные электроны с максимальными потоками при  $R \sim 7R_3$ , хотя в большинстве случаев эти электроны отсутствовали. Более детального описания этих наблюдений авторы не привели.

При ряде пролетов спутника Электрон-2 через внешний радиационный пояс при помощи установленной на нем ловушки заряженных частиц были зарегистрированы значительные потоки электронов (до  $3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ ) с энергиями  $100 \text{ эв} \leq E \leq 50 \text{ кэв}$ . Были также зарегистрированы случаи (при других пролетах спутника), когда указанные потоки электронов оказывались меньше чувствительности прибора, т. е. меньше  $2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$  (Безруких и др., 1965; Грингауз и др., 1966). Как в тех, так и в других случаях потоки захваченных во внешнем радиационном поясе электронов с энергией  $E > 100 \text{ кэв}$ , измерения которых описаны Верновым и др. (1965) и Кузнецовым и др. (1965), были почти неизменны (их значения колебались в пре-

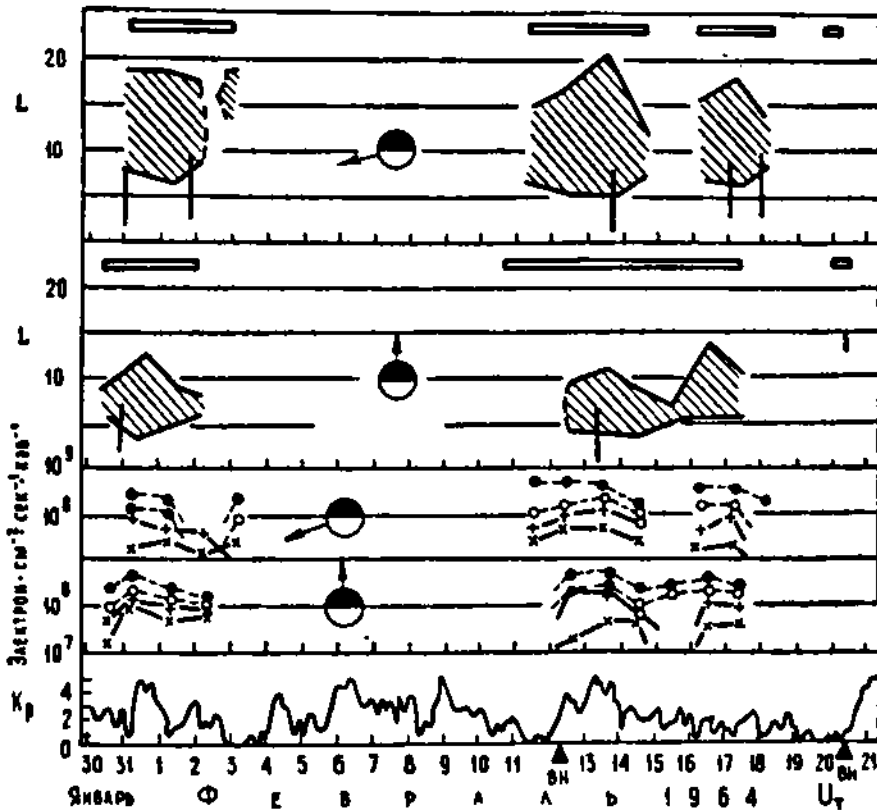


Рис. 11. Области повышенной интенсивности малоэнергичных электронов в  $L$ -координатах и максимальные величины потоков в различных энергетических интервалах по данным сферического электростатического анализатора на спутнике Электрон-2. Сплошные вертикальные линии соответствуют положению внешнего радиационного пояса (Вернов и др., 1965):  
 ●●● — 1 кэв; ○○○ — 2,5 кэв; +++ — 5 кэв; ××× — 10 кэв; □ — время, за которое имеется информация о работе анализатора;  
 ▲ — внезапное начало магнитной бури.

делах примерно  $\pm 10\%$ ). Это позволило авторам наблюдений сделать вывод о существовании мягкого электронного компонента внешнего радиационного пояса, отличающегося от энергичной захваченной радиации большей изменчивостью.

Этот вывод, подтвержденный результатами, полученными на том же спутнике при помощи электростатического анализатора (часть результатов приведена на рис. 11, Вернов и др., 1966), дополнен указанием границ внешнего радиационного пояса по данным измерений частиц с энергией  $E > 100$  кэв; можно видеть, что зарегистрированные в одних случаях внутри радиационного пояса потоки частиц с энергией от 0,1 до 10 кэв при других пролетах отсутствуют.

Рис. 12 показывает для некоторых пролетов (витков) спутника, при каких  $L$ -координатах и при каком местном времени регистрировались при помощи ловушек заряженных частиц потоки мягких электронов, описанные Безруких и др. (1965) и Грингаузом и др. (1966). Черные кружки и квадраты, соединенные пунктиром, показывают значения  $L$  и  $T$ , при которых во время одного пролета спутника регистрировались потоки мягких электронов, равные 0,5 от максимального значения потока, наблюдавшегося при этом пролете. Крестиком

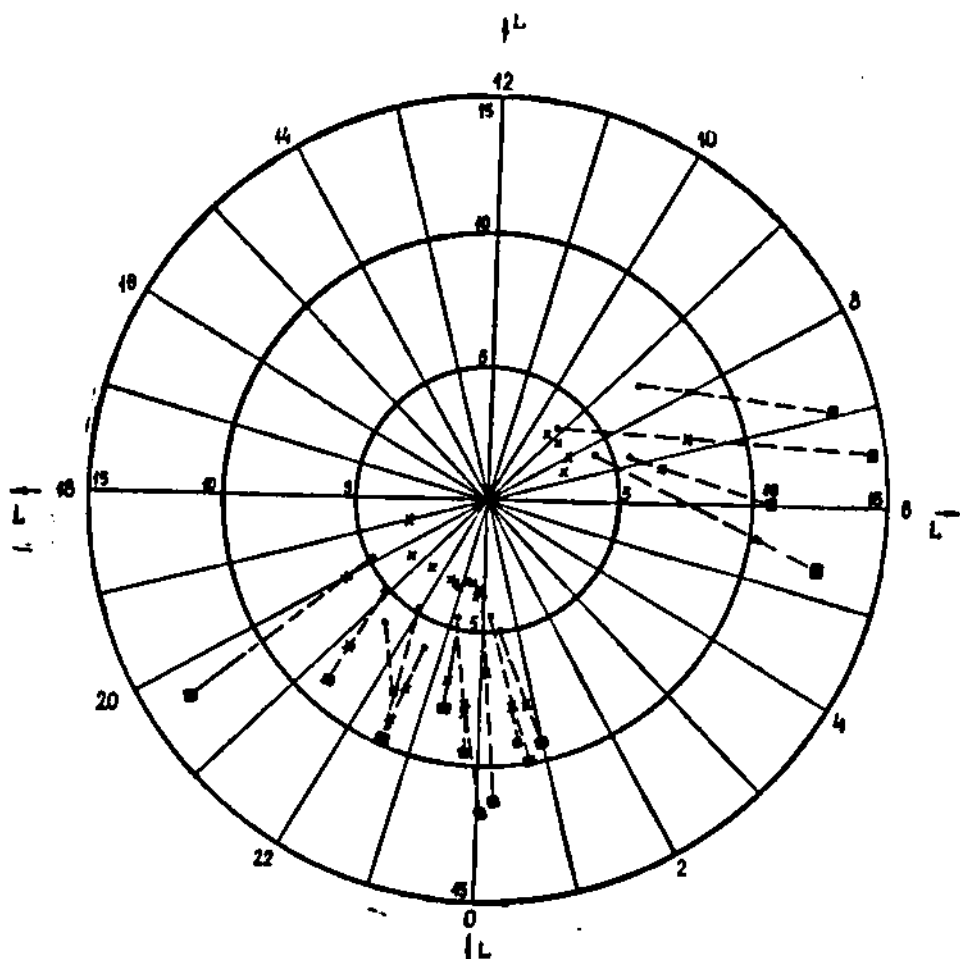


Рис. 12. Значения  $L$ -координат и местного времени, соответствующие регистрации потоков электронов с энергией  $E > 100$  эв при помощи ловушки заряженных частиц на спутнике Электрон-2 (подробнее см. текст).

показаны границы внешнего радиационного пояса, определенные по резкому спаду потоков электронов с энергией  $E > 100$  кэв (Кузнецов и др., 1965). Пересечения внешней границы внешнего пояса никак не отражались на токе ловушки заряженных частиц; потоки электронов продолжали регистрироваться за пределами пояса.

Франк (1966) сообщил о наблюдениях временных вариаций интенсивностей малоэнергичных электронов во внешнем радиационном поясе во время геомагнитных бурь, проведенных при помощи детектора CdS на спутнике Эксплорер-12. Согласно выводам автора, в начале больших геомагнитных бурь 1 и 29 октября 1961 г. в области  $L = 2,8 - 4$  резко возрастали потоки энергий электронов в энергетическом интервале  $100 \text{ эв} < E < 40 \text{ кэв}$ , достигая максимальной величины  $1000 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ . Оценки возрастания величины потоков частиц не делались. Франк предположил, что зарегистрированные малоэнергичные электроны образуют кольцевой ток с центром, расположенным на  $L = 3$ , частично ответственный за главную фазу магнитных бурь.

В 1966 г. были также опубликованы некоторые результаты исследования потоков электронов с энергией  $E = 5 \div 10$  кэв на спутнике Эксплорер-14 (Пизелла, Дэвис и Уильямсон, 1966). Измерения проводились при помощи фотоумножителя с периодически изменявшимся поглотителем и с коллиматором, позволявшим измерятьpitch-углы регистрируемых электронов; регистрация велась в утренней части магнитосферы (местное время 8—10 час). В том же эксперименте регистрировались также и частицы больших энергий.

Вот некоторые выводы авторов эксперимента. Существует область захваченных электронов со средней энергией около 10 кэв и максимальной интенсивностью  $10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$  при  $L = 8$ , причем как максимальная интенсивность потоков, так и ее положение в  $L$ -координатах сильно меняются во времени. Эти электроны являются захваченными, так как они существуют в глубине утренней части магнитосферы (граница магнитосферы проходила через  $L = 12$ ) и их распределение по pitch-углам типично для захваченных частиц. Авторы отмечают, что энергетический спектр этих электронов имеет разрыв по сравнению с электронами при меньших значениях  $L$ , поэтому указанные электроны не должны рассматриваться как «хвост» более энергичных захваченных электронов и имеют иное происхождение и время жизни. При некоторых оборотах спутника они наблюдались, при других не регистрировались.

Пизелла и др. считают, что эти электроны относятся к электронам, обнаруженным при помощи ловушек заряженных частиц на Луне-1 2 января 1959 г. (Грингауз и др., 1960), когда внутренняя граница зоны существования этих электронов соответствовала  $L = 5$  на геомагнитной широте  $\sim 20^\circ$  и местное время было примерно таким же, как в описанных Пизеллой и др. измерениях.

Авторы экспериментов отметили отсутствие очевидной корреляции между измеренными величинами потоков электронов и геомагнитными условиями; детальный же корреляционный анализ они не проводили в связи с ограниченным количеством изученных данных.

Сравнивая данные Пизеллы и др. с описанными выше измерениями потоков электронов с  $E > 100$  эв на Электроне-2, можно заметить следующее. В числе измерений на Электроне-2 имеются проведенные в утренние часы, так же как и на Эксплорере-14 (см. рис. 12). В обеих сериях измерений наблюдались потоки электронов, весьма изменчивые по величине, но иногда значительно (более чем на порядок величины) превышавшие потоки высокоэнергичных электронов внешнего радиационного пояса. Эти общие черты позволяют предполагать, что потоки электронов со средней энергией 5—10 кэв, измеренные на

Эксплорере-14 во внешнем радиационном поясе, имеют то же происхождение и обладают теми же свойствами, что и электроны, зарегистрированные во внешнем поясе на Электронс-2 (так же как и на Луне-1).

Измерения потоков заряженных частиц с энергиями порядка сотен и тысяч электронвольт проводились также на пересекавших внешний радиационный пояс спутниках Ого-1 и Ого-3.

Плазменные детекторы МТИ, ловушки заряженных частиц модуляционного типа, позволявшие регистрировать электроны с энергиями от 40 эв до  $E \leq 2$  кэв, установленные на этих спутниках, имели сравнительно низкую чувствительность. Эти приборы в вечернем и ночном секторах внешнего радиационного пояса не обнаружили потоков электронов (Васильюнас, 1968).

На Ого-3 были также установлены электростатические анализаторы с энергиями от  $\sim 100$  эв до  $\sim 50$  кэв с чувствительностью, существенно превышавшей чувствительность приборов для изучения малоэнергичной плазмы, при помощи которых ранее проводились измерения в радиационных поясах (Франк, 1967 б, в). На рис. 13 приведены энергетические спектры малоэнергичных электронов, полученные во внешнем радиационном поясе на различных магнитных оболочках (при  $3,4 < L < 8$ ) 23 июня 1966 г. (в магнитно спокойный день) и 25 июня 1966 г. (при сильном магнитном возмущении). Как видно из графиков, в обоих случаях при всех указанных значениях  $L$  зарегистрированы значительные потоки электронов с максимальными

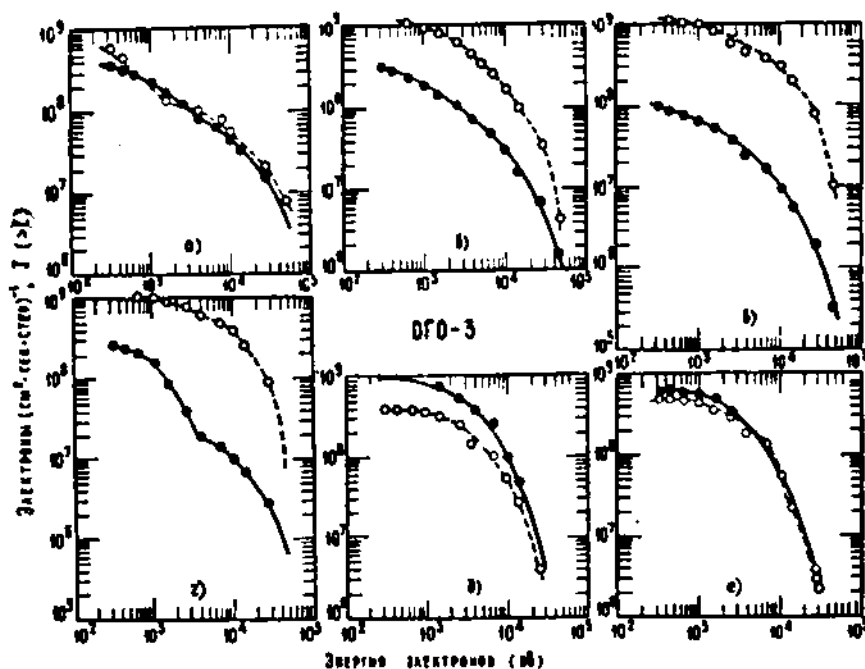


Рис. 13. Интегральные энергетические спектры малоэнергичных электронов по данным электростатического анализатора на спутнике Ого-3 (Франк, 1967б):

- |                |                        |                        |
|----------------|------------------------|------------------------|
| a) $L = 3,4$ ; | $\lambda = 1^\circ$ ;  | $\alpha = 94^\circ$ ;  |
| b) $L = 4,0$ ; | $\lambda = 4^\circ$ ;  | $\alpha = 100^\circ$ ; |
| в) $L = 5,0$ ; | $\lambda = 8^\circ$ ;  | $\alpha = 108^\circ$ ; |
| г) $L = 6,0$ ; | $\lambda = 11^\circ$ ; | $\alpha = 113^\circ$ ; |
| д) $L = 7,0$ ; | $\lambda = 14^\circ$ ; | $\alpha = 117^\circ$ ; |
| е) $L = 8,0$ ; | $\lambda = 15^\circ$ ; | $\alpha = 120^\circ$ ; |

●●● — измерения в магнитно спокойный день,  
 ○○○ — измерения в магнитно возмущенный день.

потоками в области энергий от нескольких сот электронвольт до 1 кэв. Наличие геомагнитного возмущения соответствует резкое увеличение электронных потоков. На рис. 14 приведен один из электронных спектров, полученный при  $L = 3,9$  15 июня 1966 г., на котором потоки электронов с энергиями  $10^3 - 10^4$  эв на несколько порядков ниже, чем на предыдущем рисунке (Франк, 1967).

Эти данные подтверждают наличие весьма изменчивого во времени мягкого электронного компонента внешнего радиационного пояса и впервые дают детальные энергетические спектры частиц этого компонента.

На Ого-3 Франком (1967 с, d) получены также уникальные данные о мягком протонном компоненте внешнего пояса. Ранее детекторы малоэнергичных заряженных частиц на спутниках, пересекавших зону захваченной радиации, включая электростатические анализаторы на спутниках ИМП-1 (Вулф и др., 1966 а) и Электрон-2 (Вернов и др., 1966), были недостаточно чувствительны и не регистрировали положительные ионы в радиационных поясах, позволяя определять лишь верхние пределы потоков протонов. Образцы определенных потоков протонов с  $E < 49$  кэв при  $L = 8$  по данным анализаторов Франка уже приводились на рис. 10. Пример дифференциального энергетического спектра таких протонов при  $L = 3,9$  (вместе с одновременно полученным спектром электронов) приведен на рис. 14. Анализируя результаты

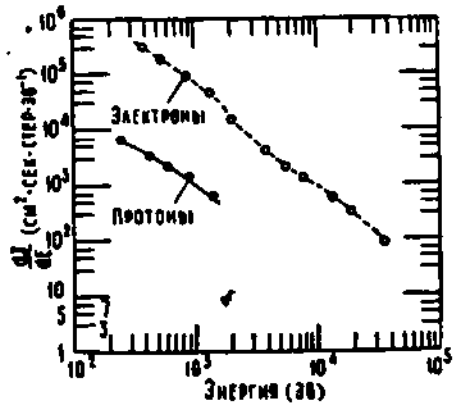


Рис. 14. Энергетический спектр электронов по данным электростатического анализатора на спутнике Ого-3 15 июня 1966 в 01:04 UT на расстоянии  $3,4 R_E$ ;  $L = 3,9$  (Франк, 1967 b).

измерений магнитного поля, выполненных на Электроне-2, Долгинов и др. (1965) сделали вывод о существовании токового кольца, образованного мягкими протонами внешнего радиационного пояса, о которых, как отметили авторы, в то время еще не имелось информации.

Анализ значительных вариаций потоков малоэнергичных протонов и электронов во внешнем радиационном поясе в июне—июле 1966 г. в периоды умеренных магнитных бурь привел Франка (1967 d) к выводу о том, что суммарная энергия этих частиц во время возрастания этих потоков достаточна для создания наблюдавшегося на поверхности Земли уменьшения магнитного поля на низких и средних широтах и что именно эти частицы создают в период бури внеземное токовое кольцо (подобное предположенному Чэпменом и Ферраро (1932)). Оценка показала, что наблюдавшемуся  $D_{st}$  возмущению — 50γ соответствовали следующие суммарные энергии частиц с  $200 \text{ эв} \leq E \leq 50 \text{ кэв}$ , заключенных между магнитными оболочками  $L = 1$  и  $L = 8$ : для протонов  $2,1 \cdot 10^{22}$  эрг, а для электронов —  $5,3 \cdot 10^{21}$  эрг. Наблюдавшиеся времена жизни τ протонов с энергиями 30—50 кэв в процессе быстрого убывания их потоков после главной фазы магнитной бури были порядка десятка часов. Суншер и Франк (1968) показали, что эти значения τ могут быть хорошо объяснены процессом перезарядки протонов с атомами водорода экзосферы.

### 3. ПОТОКИ МАЛОЭНЕРГИЧНЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ЗА ПРЕДЕЛАМИ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ

Во Введении было упомянуто о первом обнаружении потоков малоэнергичных электронов ( $E > 200$  эв) за границами внешнего радиационного пояса при помощи первых лунных космических аппаратов в 1959 г. (Грингауз и др., 1960 а, 1960 б, 1961 б). По интенсивности эти потоки существенно (не менее чем на порядок) превышали потоки электронов с энергией  $E > 50$  кэв во внешнем поясе.

Начиная с 1961 г., подобные потоки наблюдались на ряде советских и американских космических аппаратов (которые будут упомянуты далее; напомним, что некоторые данные об орбитах этих аппаратов приведены в таблице во Введении).

Самый внешний пояс заряженных частиц, под которым в 1961 г. подразумевалась промежуточная зона между радиационными поясами Земли и солнечным ветром, как это стало ясно в течение последних лет, включает в себя с полуденной стороны переходную зону между фронтом ударной волны (созданной при обтекании сверхзвуковым потоком солнечной плазмы геомагнитного поля) и границей магнитосферы («магнитопаузы»). С ночной стороны он включает в себя плазменный слой, внутри которого находится магнитно нейтральный слой (Грингауз и Хохлов, 1965; О'Брайен, 1967). В настоящий обзор включены краткие сведения о плазме в переходном слое не только потому, что он первоначально включался нами в самый внешний пояс заряженных частиц, но и потому, что если потоки малоэнергичной плазмы попадают в магнитосферу через нейтральные точки (как это предполагают некоторые авторы, например, Плетнев и др. (1965)), то источником их может быть не плазма возмущенного солнечного ветра, а именно трансформированная плазма переходного слоя, граничащего с магнитосферой.

Пониманию физической природы потоков малоэнергичных заряженных частиц в различных областях магнитосферы и вблизи нее во многом помогли магнитные измерения в околоземном пространстве, которые, в частности, привели к обнаружению предсказанных ранее теоретически (например, Эксфорд, 1962) важных характерных особенностей фронта ударной волны и границы магнитосферы (магнитопаузы) при помощи спутника Эксплорер-12 (Кэхилл и Амазин, 1963) и магнитно нейтрального слоя в ночной части магнитосферы при помощи спутника ИМП-1 (Несс и др., 1964).

Как уже отмечалось, современным представлениям о геометрии околоземного магнитного поля соответствует рис. 1.

При многократных пересечениях дневной части магнитопаузы спутником Эксплорер-12 в 1961 г. при помощи кристаллического детектора CdS, реагирующего на малоэнергичные заряженные частицы, были получены результаты, которые были интерпретированы как свидетельствующие о наличии в переходном слое электронов с энергией  $200 \text{ эв} < E < 40 \text{ кэв}$ , с потоками  $10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$  (Фримен и др., 1963).

В 1963—64 гг. на спутнике ИМП-1 при пересечении им переходного слоя были измерены потоки электронов  $\sim 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$  с энергией  $E > 100$  эв (Сербу, 1965), потоки электронов  $\sim 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$  с энергиями  $65 \leq E \leq 210$  эв и спектры положительных ионов в переходном слое (Бридж и др., 1965). Спектры положительных ионов на ИМП-1 измерялись также Вулфом и др. (1966 а).

В дальнейшем характеристики потоков малоэнергичных заряженных частиц в переходном слое измерялись неоднократно, в частности, при помощи электростатических анализаторов положительных ионов

на спутниках Ого-1 и ИМП-2 (Вулф и др., 1966 а, б) и электростатических анализаторов электронов и ионов на спутниках Вела-2 (Гослинг и др., 1967).

Полученные в период после запуска спутника ИМП-1 результаты можно кратко суммировать следующим образом. В переходном слое имеются электроны с энергиями  $E > 100$  эв (Сербу, 1965) и в диапазоне  $165 \leq E \leq 210$  эв (Бридж и др., 1965) с потоками  $\sim 10^8$  см<sup>-2</sup>·сек<sup>-1</sup>, отсутствующие в невозмущенном солнечном ветре. Энергетический спектр электронов в переходном слое по данным спутника Вела-2 показан на рис. 15 а (Бэйм и др., 1967). Протонный компонент плазмы солнечного ветра претерпевает за фронтом ударной волны следующие изменения: энергетический спектр значительно расширяется, направленная скорость падает, а концентрация возрастает примерно в два раза, температура возрастает примерно в 5 раз. Кинетическая энергия протонов в переходном слое вдвое меньше, чем в невозмущенном солнечном ветре; по-видимому, потеря ее объясняется нагревом электронов и генерацией гидромагнитных волн в переходном слое (Вулф и др., 1966). Интересно отметить, что сразу же после первых экспериментов на лунных ракетах (Грингауз и др., 1960; Шкловский и др., 1960) образование потоков электронов с энергией  $E > 200$  эв за зоной захваченной радиации объясняли именно передачей энергии протонов солнечного ветра электронам при набегании плазмы солнечного ветра на геомагнитное поле.

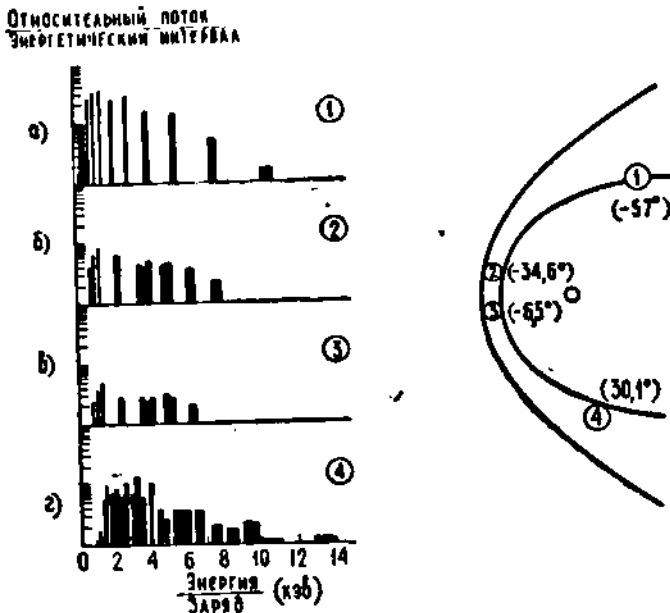


Рис. 15. Энергетические спектры протонов, измеренные в переходной зоне на различных спутниках (Вулф и др., 1966 б):  
а) Вела 2В, 5 октября 1964, 1903—1916 UT;  
б) ИМП-2, 5 октября 1964, 2029—2224 UT;  
в) ИМП-2, 5 октября 1964, 0654—0917 UT;  
г) Ого-1, 4 октября 1964, 2010—2030 UT.

В правой части рисунка цифры, обведенные кружками, соответствуют положению спутников в переходной зоне во время измерения спектров.

Энергетические спектры протонов, полученные в течение короткого промежутка времени 4—5 октября 1964 г. на спутниках Вела-2В



(Гослинг и др., 1966), ИМП-2 и Ого- (Эго)-1 в различных участках переходного слоя, показаны на рис. 15 (Вулф и др., 1966 б).

Перейдем к ночной части магнитосферы. Измерения, проведенные при помощи кристаллов CdS на спутнике Эксплорер-12, подтвердили существование потоков электронов с энергией 200 эв за границей внешнего радиационного пояса в ночной части магнитосферы. Картина распределения электронов с энергией  $200 \text{ эв} \leq E \leq 40 \text{ кэв}$  в экваториальной плоскости магнитосферы в том виде, в каком она рисовалась в 1964 г. с учетом данных Эксплорера-12, приведена на рис. 16 (Ван Аллен, 1964), на котором между дневной и ночной зонами имеется большой пространственный разрыв.

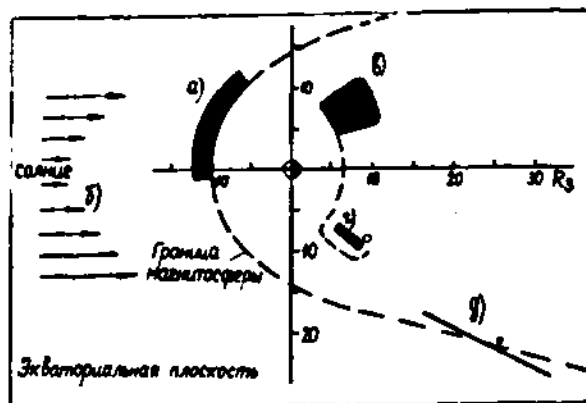


Рис. 16. Распределение потоков электронов с энергиями  $200 \text{ эв} < E < 40 \text{ кэв}$  в экваториальной плоскости (Ван Аллен, 1964): — — — — возможная экстраполяция; — — — — разрывы в наблюдении потоков частиц;

- ○ — измерения, повернутые в геомагнитную экваториальную плоскость вокруг линии Солнце—Земля;  
 а) Фримен,  $200 \text{ эв} < E_e < 40 \text{ кэв}$ ,  $J_0 \sim 10^8 - 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ ;  
 б) Нейгебауэр и Снайдер,  $E_p \sim 1 \text{ кэв}$ ,  $J_0 \sim 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ ;  
 в) Фримен,  $200 \text{ эв} < E_e < 40 \text{ кэв}$ ,  $J_0 \sim 10^8 - 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ ;  
 г) Грингауз и др.,  $E_p > 200 \text{ эв}$ ,  $J_0 < 2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ ;  
 д) Бридж и др.,  $E_p \sim 500 \text{ эв}$ ,  $J_0 \sim 10^7 - 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ .

В конце 1962 г. при помощи ловушек заряженных частиц на космическом аппарате Марс-1 в ночной части магнитосферы были зарегистрированы потоки электронов с энергией  $E > 70 \text{ эв}$  после пересечения границы внешнего радиационного пояса на малых геоцентрических расстояниях ( $2R_3 < R < R_3$ ), но на высоких инвариантных геомагнитных широтах  $\Lambda \sim 65-67^\circ$  (Грингауз и др., 1964; Грингауз, 1964). Этот эксперимент подтвердил первоначальное предположение, содержащееся в гипотезе о «третьем радиационном поясе» (Грингауз и др., 1960), что внутренняя граница потоков мягких электронов располагается вдоль внешней границы радиационного пояса, т. е. по магнитным оболочкам.

Позднее Фритц и Гарнет (1965) сообщили, что на спутнике Инджун-3 наблюдались потоки электронов с энергией 10 кэв за границей внешнего пояса на тех же геомагнитных широтах, что и на Марсе-1. По мнению авторов они наблюдали те же потоки, которые были обнаружены на Луне-2 и Марсе-1.

В 1964 г. на спутнике Электрон-2 потоки электронов с энергиями от 100 эв до 10 кэв регистрировались вне пояса захваченной радиации при помощи сферического электростатического анализатора в южной

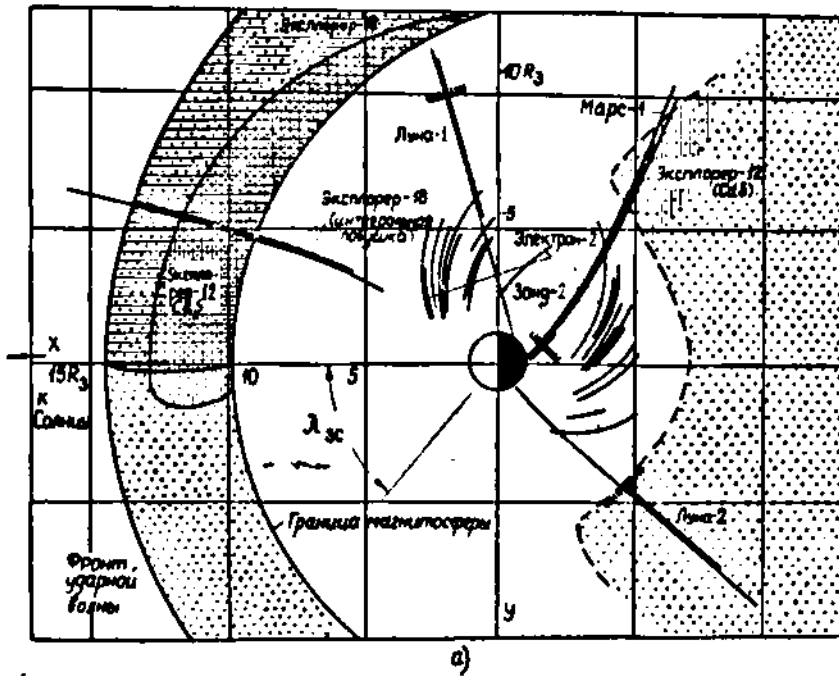
части магнитосферы на геомагнитных широтах до  $\sim 60^\circ$  в утренние часы и вблизи полуночи (Вернов и др., 1965; Вернов и др., 1966). Регистрируемые потоки достигали значений  $\sim 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{кэв}^{-1}$  при энергии  $E = 0,2 \text{ кэв}$  и  $\sim 5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{кэв}^{-1}$  при  $E \sim 10 \text{ кэв}$ ; было найдено, что протяженность области существования потоков электронов с энергиями  $\sim 1 \text{ кэв}$  больше, чем у электронов с энергией  $\sim 10 \text{ кэв}$ . Была замечена тенденция к смягчению спектра электронов по мере удаления от Земли. Протяженность области и величины потоков в ней сильно менялись с характерными временами порядка суток и положительно коррелировали с геомагнитной активностью.

Некоторые области, в которых на Электроне-2 при помощи ловушки заряженных частиц наблюдались потоки электронов с энергиями  $E > 100 \text{ эв}$  за пределами внешнего радиационного пояса, были показаны на рис. 12.

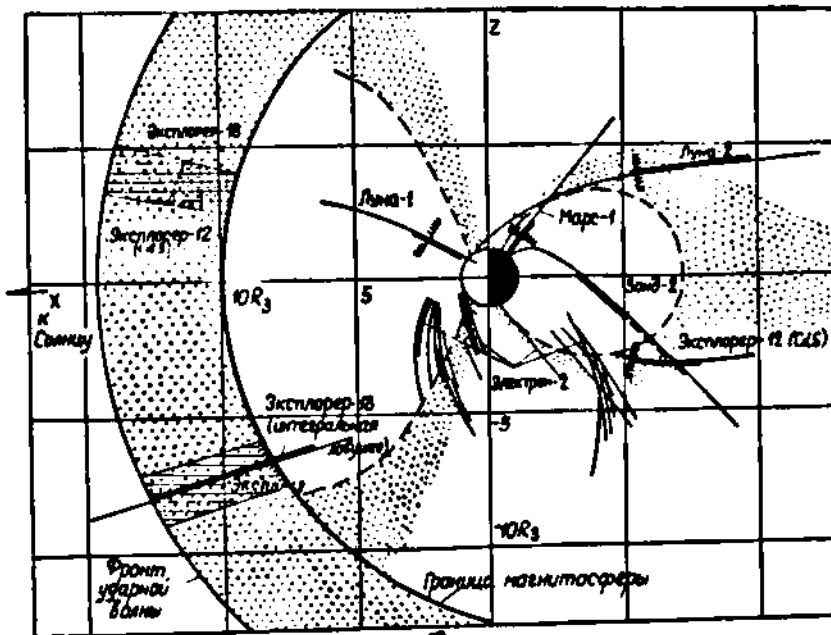
На рис. 17 приведено распределение потоков малоэнергичных заряженных частиц в околоземном пространстве (с учетом данных наблюдений на различных космических аппаратах), как оно представлялось в 1965 г. (Грингауз и Хохлов, 1965). Даны проекции на плоскость эклиптики (а) и на меридиональную плоскость (б) в солнечной эклиптической системе координат. В комментариях к этому рисунку отмечалось, что в то время (1965) не имелось доказательства того, что ночная и дневная области существования потоков электронов с энергиями  $E \leq 40 \text{ кэв}$  за пределами зоны захваченной радиации соединены и образуют некую единую зону (см. рис. 17 б), хотя результаты высокоширотных измерений на Марсе-1 и Электроне-2 (рис. 17 б) давали основания предполагать, что ночная и дневная области соединяются между собой по крайней мере на высоких широтах, составляя единую область сложной конфигурации. С другой стороны, не было также известно, чтобы какой-либо космический аппарат, на котором имелись детекторы таких электронов, пересек границу внешнего пояса и не обнаружил за ней потоков малоэнергичных электронов. Так как внешняя граница зоны захваченной радиации замкнута, то можно было предположить, что зоны существования потоков малоэнергичных электронов, расположенные за ней, также составляют единую область. Это не должно означать, что потоки плазмы в дневной и ночной частях этой области должны иметь общее происхождение и одинаковые свойства.

На основании указанных соображений авторы рис. 17 сочли возможным предположить, что потоки малоэнергичных электронов в меридиональной плоскости расположены в области, отмеченной точками на рис. 17. Заметим, что даже в настоящее время недостаток измерений в высокоширотной области магнитосферы не дает возможности полностью проверить степень справедливости рис. 17 б. Результаты, полученные на Электроне-2, дали основания Грингаузу и Хохлову (1965) для предварительного вывода о наличии связи между интенсивностью наблюдавшихся потоков мягких электронов и ориентацией оси магнитного диполя Земли относительно направления на Солнце, а именно, максимальные потоки электронов наблюдались на утренних участках орбит спутника, когда южный магнитный полюс максимально наклонен в сторону Солнца, т. е. условия проникновения в магнитосферу солнечной плазмы из переходного слоя через южную нейтральную точку наиболее благоприятны. Этот вывод был подкреплён дальнейшей обработкой указанных результатов Хохловым (1966), который отметил также существование восточно-западной асимметрии в распределении потоков мягких электронов (в утренней части магнитосферы потоки были более интенсивны и чаще наблюдались, чем в вечерней).

К числу важнейших научных результатов полета спутника ИМП-1



а)



б)

Рис. 17. Распределение потоков малоэнергичных заряженных частиц в околоземном пространстве (Грингауз и Хохлов, 1965):

а) — проекция на плоскость эклиптики;

б) — проекция на меридиональную плоскость в солнечно-эклиптической системе координат.

Участки траекторий космических аппаратов, где были зарегистрированы потоки малоэнергичных заряженных частиц, показаны сплошными и штриховыми линиями; для спутника Электрон-2 показаны только те участки орбит, где наблюдались мягкие электроны (по данным ловушки заряженных частиц). Внешняя граница внешнего радиационного пояса показана тонкой штриховой линией и знаком в форме гребенки. Предполагаемое положение самой внешней зоны заряженных частиц показано точками.

относятся подтверждения того, что магнитосфера сильно вытянута в антисолнечном направлении. Об этом также свидетельствовали ранее проведенные магнитные измерения на Эксплорере-10 (Хеппнер и др., 1963) и на Эксплорере-12 (Кэхилл, 1963) и открытие принципиально нового явления — магнитно нейтрального слоя в ночной магнитосфере (Несс и др., 1964; Несс, 1965), см. рис. 1.

Как отметили Эксфорд и др. (1965), для существования нейтрального слоя в хвосте магнитосферы необходимо, чтобы он был заполнен потоками плазмы повышенной интенсивности для того, чтобы сбалансировать давление магнитных полей, расположенных по обе стороны от него и противоположно направленных. Измеренное на спутнике ИМП-1 магнитное поле хвоста (вне нейтрального слоя) составляло  $\sim 17 \gamma$ . В связи с этим Несс (1965) изобразил на одном графике (рис. 18) результаты выполненных различными авторами наблюдений потоков заряженных частиц в ночной магнитосфере, которые могли бы создать давление плазмы, необходимое для существования нейтрального слоя. Область величин потоков и энергий, удовлетворяющая данным магнитных измерений, заштрихована. Так как результаты наших измерений попали в эту область, то Несс (1965) предположил, что измеренные на Луне-2 потоки электронов связаны с магнитно нейтральным слоем (такое же предположение было высказано Грингаузом и Хохловым, 1965). Впоследствии (1966 г.) при помощи Пионера-7 были проведены одновременные магнитные и плазменные измерения при пересечении магнитным аппаратом ночной магнитосферы на геоцентрических расстояниях до  $\sim 40 R_E$ , подтвердившие правильность представлений о квазистатическом магнитосферном хвосте, в котором сумма парциальных магнитного и плазменного давлений постоянна (Лазарус, Сиско и Несс, 1968). Несколько подробнее об этом эксперименте будет сказано ниже.

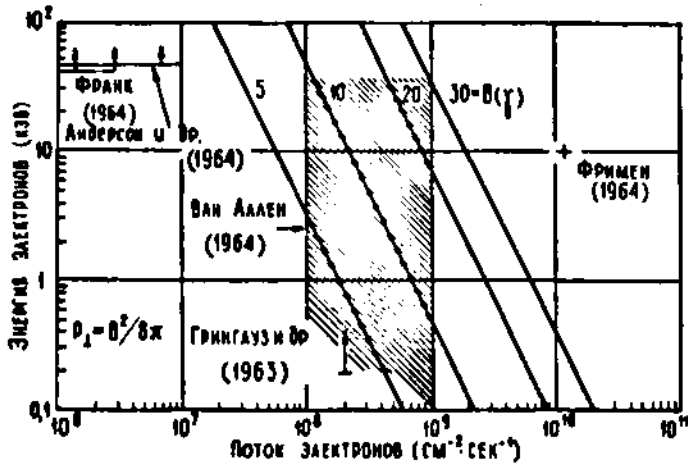


Рис. 18. Предполагаемый баланс давлений между магнитным полем в геомагнитном хвосте (без учета наличия плазмы) и немагнитным электронным газом в идеализированной модели нейтрального слоя. На график нанесены результаты наблюдений заряженных частиц, имеющие отношение к интерпретации нейтрального слоя в геомагнитном хвосте.

Начиная с 1964 г., были проведены детальные измерения энергетических спектров электронов с энергиями  $350 \text{ эВ} < E < 20 \text{ кэВ}$  в сечениях хвоста магнитосферы на геоцентрических расстояниях  $R \sim 17 R_E$  при помощи сферических электростатических анализаторов на спутни-

ках Вела (Бэйм и др., 1967). Образцы полученных спектров приведены на рис. 19 (б, в, г). Помимо электронов впервые в этой области были обнаружены положительные ионы (по-видимому, в основном протоны). Поток их оказался, естественно, гораздо меньше, чем поток электронов; согласно оценкам авторов экспериментов концентрации протонов и электронов примерно равны и достигают  $1 \text{ см}^{-3}$ ; форма протонных энергетических спектров близка к форме электронных. Средние энергии электронов лежат в диапазоне от 200 эв до 12 кэв. Потoki их часто изотропны, однако величина анизотропии достигает 2.

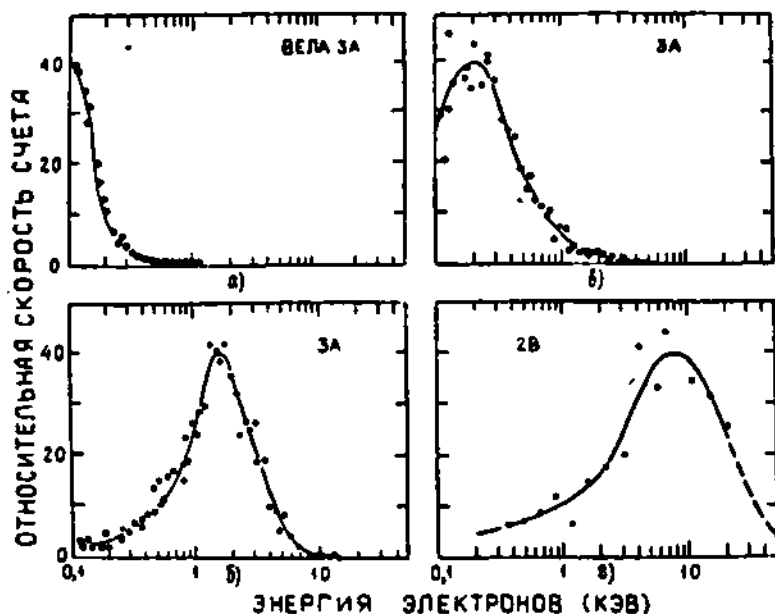


Рис. 19. Энергетические спектры электронов, измеренные на спутнике Вела а) в переходном районе (за фронтом ударной волны) и б, в, г) в плазменном слое хвоста магнитосферы (Бэйм и др., 1967).

Детальные исследования плазмы с энергиями частиц от  $\sim 200$  эв до  $\sim 50$  кэв, часть которых, относящаяся к радиационным поясам, описана в разд. 2, велись также при помощи высокочувствительных цилиндрических электростатических анализаторов на спутнике Ого-3 в хвосте магнитосферы при  $8 R_3 < R < 20 R_3$  (Франк, 1967); эти исследования хорошо дополнили измерения на спутниках Вела. Сведения о положении области существования потоков плазмы в магнитосферном хвосте по данным электростатических анализаторов на Веле и на Ого-3 можно суммировать следующим образом: магнитно нейтральный слой находится всегда внутри плазменного слоя; последний по толщине существенно превышает первый. На Веле было произвольно принято, что на границе плазменного слоя потоки электронов составляют  $6 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ . При таком определении и при  $R \sim 17 R_3$  толщина плазменного слоя составляла несколько  $R_3$ . На Ого-3 электронные потоки наблюдались при  $R \sim 19,5 R_3$  на расстоянии  $\sim 12 R_3$  над нейтральным слоем (для данного измерения посредине между нейтральным слоем и северной границей магнитосферы).

Андерсон (1965) и Франк (1965) сообщили о наблюдениях в хвосте магнитосферы на спутниках спорадически возникающих и исчезающих «островов» электронов с  $E > 45$  кэв. Бэйм и др. (1967) и Франк (1967 а) считают, что эти электроны принадлежат к хвостам энергетиче-

ческих спектров малоэнергичных электронов плазменного слоя, а их возникновение и исчезновение объясняется быстрым разогревом (возрастанием средней энергии) электронов в плазменном слое и их внезапным охлаждением, т. е. быстрыми изменениями энергетических спектров электронов. Франк (1967 а) отмечает также быстрые пространственные и временные вариации величин потоков электронов в плазменном слое. Плотность энергии вблизи «пиков» электронных потоков не убывает с ростом  $R$  (при  $R > 13R_3$ ) и почти всегда составляет  $10^{-9}$  эрг·см<sup>-3</sup>, несмотря на то, что средние энергии электронов убывают с увеличением  $R$  (последнее было отмечено Верновым и др. (1966) по данным Электрона-2).

Смещение пиков энергетических спектров с уменьшением  $R$  в сторону больших энергий, сопровождаемое расширением спектров, дает основание предполагать, что процесс ускорения электронов эффективен по крайней мере в области магнитного хвоста от  $\sim 10$  до  $20 R_3$ , и так как пик энергетических спектров сдвигается на расстоянии  $\sim 10 R_3$  на несколько килоэлектронвольт, то это можно приписать существованию в этой области электрического поля  $\sim 5000$  в/10  $R_3 \approx 100$  мв·км<sup>-1</sup> (Франк, 1967 а).

Указанная выше величина плотности энергии электронов в плазменном слое в хвосте магнитосферы свидетельствует о том, что они существенно влияют на магнитное поле при  $R > 8R_3$ .

В упоминавшихся выше одновременных измерениях плазмы и магнитного поля в хвосте магнитосферы на Пионере-7 (Лазарус, Сиско и Несс, 1968) регистрировались лишь электроны с энергией  $E < 1,6$  кэв. Как видно из результатов измерений Франка (1967 а), при значениях  $R$ , близких к  $8R_3$ , плазменным детектором на Пионере-7 можно наблюдать лишь наименее энергичную часть существующих в этой области электронов; при этом аккуратное определение давления плазмы затруднительно. Тем не менее результаты одновременных магнитных и плазменных измерений впечатляющи и свидетельствуют в пользу квазистатической модели магнитосферного хвоста, в которой суммарное давление магнитного поля и частиц в хвосте должно быть постоянно и равно суммарному (динамическому, тепловому и магнитному) давлению обтекающей магнитосферу солнечной плазмы, нормальному к граничной поверхности магнитосферы. В пользу такой модели говорят, в частности, одновременные резкие уменьшения магнитного давления и возрастания плазменного давления, наблюдавшиеся, когда Пионер-7 входил в плазменный слой, и обратные изменения при выходе из этого слоя, а также явления при входе в магнитно нейтральный слой (концентрация частиц почти не изменилась, а средняя скорость их существенно возросла).

Бейэм и др. (1967) предположили, что плазменный слой в хвосте магнитосферы начинается у ночной границы области захваченной радиации и что ориентация его вначале совпадает с плоскостью геомагнитного экватора, а вдали от Земли соответствует направлению солнечного ветра. На рис. 1 плазменный слой изображен именно таким образом (Несс, 1967). Измерения других авторов не противоречат этому, а результаты Василюнаса (1968 б), полученные на спутниках Ого-1 и Ого-3, прямо подтверждают это предположение. Эти результаты получены при помощи упоминавшихся выше плазменных детекторов МТИ, позволявших регистрировать наименее энергичную часть электронов плазменного слоя в хвосте магнитосферы ( $100$  эв  $\leq E \leq 1650$  эв). На рис. 20 показано распределение потоков малоэнергичных электронов в экваториальной плоскости магнитосферы, построенное по данным спутников Вела и Ого. С внешней стороны границей зоны существования этих потоков является граница магнитосферы

(определяемая по появлению значительных потоков положительных ионов); с внутренней стороны она имеет четкую границу, близкую к границе зоны захваченной радиации (а может быть, и совпадающую с ней). Аналогичное распределение в меридиональном сечении магнитосферы, соответствующем позднему вечеру (линия  $CC'$  на рис. 20), показано на рис. 21. Для построения этого распределения на высоких геомагнитных широтах использованы данные, полученные на Марсе-1.

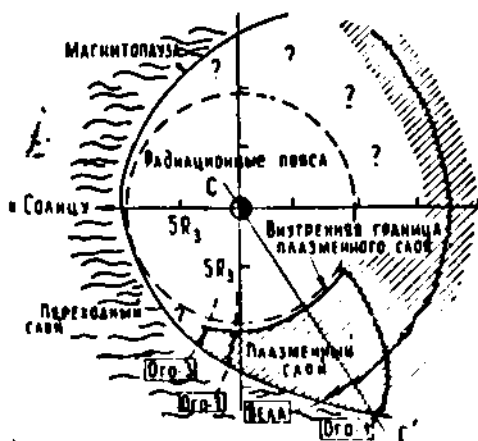


Рис. 20. Положение области повышенной интенсивности малоэнергичных электронов ( $E < 1,7$  кэв) в плоскости геомагнитного экватора (Васильюнас, 1968); //—область интенсивных потоков малоэнергичных электронов.

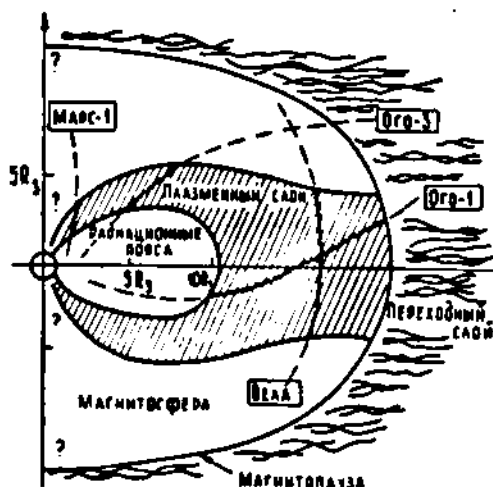
Наблюдения, описанные Васильюнасом, показывают, что потоки малоэнергичных заряженных частиц непосредственно за границей внешнего радиационного пояса не являются особенностью только ночной области магнитосферы, но всегда имеются и в ее вечерней области, а возможно, и в дневной. Будет очень интересно познакомиться с данными наблюдений Васильюнаса в дневной области магнитосферы. Эти результаты сильно поддерживают представления о самом внешнем поясе заряженных частиц, высказанные нами ранее (Грингауз, 1961 а, 1964; Грингауз и Хохлов, 1965). Несколько неожиданной, однако, является четкость внутренней границы наблюдавшихся потоков электронов, резко обрывающихся вблизи границы внешнего радиационного пояса. Указанное явление не наблюдалось на некоторых других космических аппаратах (см., например, на рис. 12 и 17 данные ловушки заряженных частиц, регистрировавшей электроны с энергией  $E > 100$  эв на Электроне-2). По-видимому, столь четкая граница не наблюдалась и Франком на Ого-3; во всяком случае это не указано в его публикациях (1967 а, б). Возможно, что она является особенностью лишь электронов тех малых энергий ( $E < 1,6$  кэв), распределение которых показано на рис. 19 и 20.

Во время магнитных бурь (типа «бухты») наблюдалось приближение к Земле внутренней границы зоны существования мягких электронов, показанное на рис. 22 (Васильюнас, 1968). Автор отметил возможную взаимную связь этого явления с упоминавшимся ранее движением к Земле во время магнитной бури ионных потоков Фрименом и Мэджайром (1967).

В заключение этой части обзора остановимся на плазменных измерениях в отдельных частях хвоста магнитосферы. Существование хвоста магнитосферы на расстояниях  $R < 31 R_E$  было доказано при помощи измерений на спутнике ИМП-1 (Несс и др., 1964). С точки зрения характеристик плазмы, хвост магнитосферы отличается от невозмущенного межпланетного пространства и переходного слоя за

фронтом ударной волны, в частности, резким уменьшением потоков протонов. Использование этого признака на основе данных ловушек заряженных частиц на первом спутнике Луны—космическом аппарате Луна-10, запущенном в марте 1966 г.,—позволило сделать вывод о том, что Луна ежемесячно в течение четырех суток пересекает хвост магнитосферы, т. е. что длина его не менее  $\sim 80 R_3$  (Грингауз и др., 1966). Внутри хвоста наблюдались потоки электронов  $\sim 10^8 \text{ сек}^{-2} \cdot \text{см}^{-1}$  с энергией  $E > 70 \text{ эв}$  (по-видимому, принадлежащие к плазменному слою хвоста).

Рис. 21. То же самое, что на рис 20, меридиональное сечение по линии  $CC'$  на рис. 20 (Васильянас, 1968);  $////$ —область интенсивных потоков малоэнергичных электронов.



В том же 1966 г. магнитные измерения на спутнике Земли Эксплорер-33 показали, что длина магнитосферного хвоста не менее 510000 км, и, таким образом, подтвердили вывод, сделанный на основе измерений малоэнергичной плазмы на Луне-10 о том, что Луна пересекает магнитный хвост Земли (Несс и др., 1967; Несс, 1967).

Исключительный интерес представляют плазменные и магнитные измерения, проведенные на Пионере-7 на расстоянии  $\sim 1000 R_3$  от Земли. Пока доступны лишь предварительные сообщения об этих измерениях.

В отличие от плазменных измерений в хвосте магнитосферы на ИМП-1 (Вулф и др., 1966 с) и на Луне-10 (Грингауз и др., 1966) измерения, проведенные при помощи электростатического анализатора во время пересечения Пионером-7 области пространства, окружающей линию Солнце—Земля на указанном расстоянии от Земли, не обнаружили резкого падения величин потоков ионов солнечной плазмы, но показали заметные искажения формы энергетических спектров ионов (Вулф и др., 1967). Авторы этих измерений считают, что либо Пионер-7 оказался в турбулентной зоне, образовавшейся за магнитосферой Земли, либо на столь больших расстояниях солнечный ветер диффундирует внутрь хвоста магнитосферы.

Несс и др. (1967) описали одновременные измерения магнитного поля, которые также показали отличия наблюдавшегося поля от невозмущенного межпланетного, но, по мнению авторов, еще не позволили сделать окончательное заключение о природе этих отличий. Фэйрфилд (1968), сравнивая данные одновременных магнитных измерений, проведенных на Пионере-7 на расстоянии  $\sim 1000 R_3$  и на Эксплорере-33 и Эксплорере-35 в межпланетном пространстве около Земли, пришел к выводу, что Пионер-7 наблюдал качания магнитосферного хвоста.



Нам, однако, кажется, что для окончательного решения этого вопроса необходимы дополнительные сопоставления одновременных плазменных и магнитных измерений, проведенных на Пионере-7.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение малоэнергичной плазмы в различных областях магнитосферы показывает, что ее характеристики (в частности, расположение) меняются при изменениях геомагнитной возмущенности. Это справедливо как в отношении плазмы в периферийной части ионосферы, по-видимому, вращающейся вместе с Землей, так и в отношении плазмы, расположенной над плазмопаузой.

Сейчас ни у кого не вызывает сомнений, что геомагнитная возмущенность отображает изменения некоторой характеристики (а может быть, нескольких характеристик) солнечного ветра, хотя различные авторы имеют разные мнения по этому поводу. В качестве характеристик солнечного ветра, определяющих величину  $K_p$ -индекса, рассматривались величина скорости солнечного ветра (Снайдер и др., 1963), направление межпланетного магнитного поля (Десслер и Уолтерс, 1964), направление вектора скорости плазмы (П. Колман, 1967) и т. д. Независимо от того, кто из упомянутых авторов ближе к истине, совершенно ясно, что положение плазмопаузы и границы зоны захваченной радиации, распределение и характеристики магнитосферной плазмы с энергией  $100 \text{ эв} < E < 50 \text{ кэв}$  и вызываемые частицами этой плазмы полярные сияния и магнитные бури—все эти явления в конечном счете связаны с процессами, происходящими в межпланетной среде. Совместное изучение измерений в магнитосфере Земли и вне ее пока привело лишь к некоторым грубым эмпирическим соотношениям, подобным соотношению между скоростью солнечного ветра и  $K_p$ -индексом Снайдера и др. (1963) или между электрическим полем в плоскости вечернего меридиана и скоростью солнечного ветра (Васильюнас, 1968 а).

Есть все основания ожидать, что в близком будущем эксперименты позволят выбрать из обилия имеющихся гипотез о связи процессов внутри магнитосферы и вне ее единственную верную либо создать новую теорию, если существующие гипотезы не оправдают себя. Результаты дальнейших измерений малоэнергичной плазмы явятся наряду с данными магнитных измерений фундаментом для построения такой теории.

Хотелось бы отметить некоторые важные, но еще не решенные задачи экспериментальных исследований малоэнергичной магнитосферной плазмы, а также связанные с ней проблемы, не отраженные (или недостаточно отраженные) в этом обзоре.

1) Несмотря на значительные успехи, достигнутые в последние годы в изучении малоэнергичной магнитосферной плазмы как с тепловыми энергиями, так и с энергиями от сотен электронвольт до десятков килоэлектронвольт (особенно при помощи спутников серии Ogo), работа по картографированию распределений потоков малоэнергичных заряженных частиц в магнитосфере и по изучению их вариаций еще далека от завершения.

В области геоцентрических расстояний  $R > 2R_z$  при геомагнитных широтах  $\varphi_m > 45^\circ$  до настоящего времени единственными измерениями остаются проведенные на Марсе-1 и спутниках Электрон. Эта область, промежуточная между интенсивно изучаемой зоной магнитосферы с  $\varphi_m < 45^\circ$  и областью, в которой происходят полярные сияния и связанные с ними явления и которая характеризуется высокими геомагнитными широтами, но малыми высотами, безусловно нуждается в дальнейших исследованиях.

2) Как отмечалось в предыдущем разделе обзора, данные, полученные на Электроне-2, свидетельствуют в пользу зависимости наблюдавшихся потоков мягких электронов от угла наклона геомагнитного диполя и поддерживают гипотезу о проникновении солнечной плазмы из переходного слоя в магнитосферу через нейтральные точки магнитопаузы. Для проверки этого были бы очень полезны прямые измерения величин и направлений потоков малоэнергичной плазмы в непосредственной близости от нейтральных точек, для чего необходимы спутники с соответствующими орбитами.

3) Пока неясно, каков источник малоэнергичной плазмы, участвующей в конвективном движении в магнитосфере, — является ли этим источником земная ионосфера или солнечная плазма, проникающая в магнитосферу через открытый магнитный хвост или сквозь магнитопаузу. По-видимому, в первом случае эта плазма должна быть заметно холоднее, чем во втором.

Поэтому весьма важно разработать надежный способ измерения температуры плазмы порядка долей и единиц электронвольт при концентрациях порядка  $10^2 \text{ см}^{-3}$  (внутри периферийной части ионосферы) и порядка единиц  $\text{см}^{-3}$  (над плазмопаузой).

4) В вышеприведенном обзоре не нашлось места для проблемы электрических полей в магнитосфере (хотя о них упоминалось в связи с обнаружением конвекции малоэнергичной плазмы при помощи спутника АТС-1 и эффектом ужесточения энергетических спектров электронов вне радиационных поясов в ночной магнитосфере по мере приближения к границе внешнего пояса (Ого-3, Электрон-2). Действием электрического поля объясняется и движение электронов с  $E \leq 2 \text{ кэВ}$  во время магнитной бури, показанное на рис. 22. Заметим, что специально крупномасштабным электрическим полям в магнитосфере посвящен последний обзор Обаяши и Нишиды (1968).

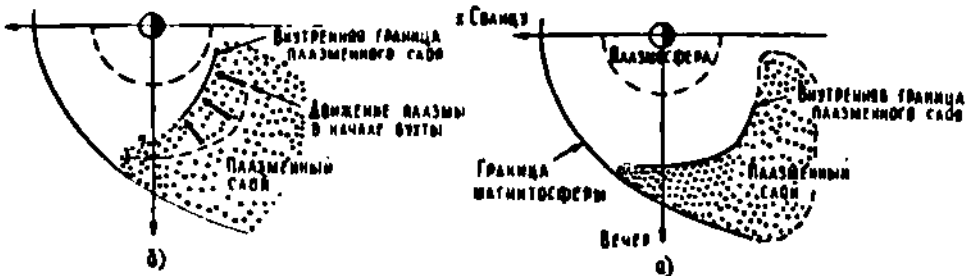


Рис. 22. Схематическое распределение малоэнергичных электронов ( $E < 1,7 \text{ кэВ}$ ) в экваториальной плоскости в вечернем секторе магнитосферы (Васильюнас, 1968): а) в магнитоспокойный период; б) в магнитовозмущенный период.

Нет сомнения в том, что движение заряженных частиц в магнитосфере (особенно малоэнергичных) в значительной степени определяется электрическими полями. Поэтому прямые измерения электрических полей обязательно должны входить в программу будущих исследований малоэнергичной плазмы.

Автор считает своим приятным долгом поблагодарить В. В. Безруких и Э. К. Соломатину за помощь при подготовке настоящего обзора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R. A. Anderson, J. Geophys. Res., 70, 4741 (1965).
2. J. J. Angerami, D. L. Carpenter, J. Geophys. Res., 71, 711 (1966).
3. W. I. Axford, C. O. Hines, Canadian J. Physics, 39, № 10, 1397 (1961).
4. W. I. Axford, J. Geophys. Res., 67, 3791 (1962).

5. W. I. Axford, E. E. Petschek, J. L. Siscoe, *J. Geophys. Res.*, 70, 1231 (1965).
6. W. I. Axford, *J. Geophys. Res.*, 73, 6855 (1968).
7. P. Bauer, Preprint, The cooling of the Photonosphere. Scientific Report, The University of Michigan, 1967.
8. S. J. Bame, J. R. Asbridge, H. F. Felthouser, E. W. Hones, I. B. Strong, *J. Geophys. Res.*, 72, 113 (1967).
9. P. M. Banks, F. E. Hoizer, Preprint, The Polar wind Report of Institute for Pure and Applied Physical Sciences, JPAPS-67/68-213, 1968.
10. В. В. Безруких, К. И. Грингауз, Исследования космического пространства, изд. Наука, М., 1965, стр. 177.
11. В. В. Безруких, К. И. Грингауз, Л. С. Мусатов, Э. К. Соломатина, Исследования космического пространства, изд. Наука, М., 1965, стр. 418.
12. V. V. Bezrukikh, K. I. Gringauz, M. Z. Khokhlov, L. S. Musatov, R. Ye. Rybchinsky, *Space Res.*, 6, 862 (1966).
13. В. В. Безруких, Т. К. Бреус, К. И. Грингауз, Космические исследования, 5, 798 (1967).
14. В. В. Безруких, Доклад на Симпозиуме по физике магнитосферы, Вашингтон, 1968.
15. J. H. Binzack, *J. Geophys. Res.*, 72, 5231 (1967).
16. J. L. Block, *J. Geophys. Res.*, 71, 885 (1966).
17. L. H. Brace, B. M. Reddy, *J. Geophys. Res.*, 70, 5783 (1965).
18. H. S. Brice, *J. Geophys. Res.*, 72, 5193 (1967).
19. H. S. Bridge, A. Egidi, A. Lazarus, E. Lyon, *Space Research*, 5, 969 (1965).
20. J. A. Van Allen, Report to the V Assembly IGY, Moscow, 1958.
21. J. A. Van Allen, *J. Geophys. Res.*, 69, 1011 (1964).
22. V. M. Vasyliunas, *J. Geophys. Res.*, 73, 2529 (1968 a).
23. V. M. Vasyliunas, *J. Geophys. Res.*, 73, 2339 (1968 b).
24. С. Н. Вернов, А. Е. Чудаков, Доклад на V Ассамблее МГГ, Москва, 1958.
25. С. Н. Вернов, А. Е. Чудаков, П. В. Вакулов, Е. В. Горчаков, С. Н. Кузнецов, Ю. И. Логачев, А. Г. Николаев, Э. Н. Осноев, И. А. Рубинштейн, В. Г. Столбовский, В. А. Эльтсов, Исследования космического пространства, изд. Наука, М., 1965, стр. 394.
26. С. Н. Вернов, В. В. Мельников, И. А. Савенко, Б. И. Савин, Т. И. Первая, Исследования космического пространства, изд. Наука, М., 1965, стр. 381.
27. S. N. Vernov, V. V. Melnikov, I. A. Savenko, B. I. Savin, *Space Res.*, 6, 746 (1966).
28. J. H. Wolfe, R. W. Silva, M. A. Myers, *J. Geophys. Res.*, 71, 1319 (1966 a).
29. J. H. Wolfe, R. W. Silva, M. A. Myers, *Space Res.*, 6, 680 (1966 b).
30. J. H. Wolfe, R. W. Silva, D. D. McKibbin, R. H. Mason, *J. Geophys. Res.*, 72, 4577 (1967).
31. J. S. Geisler, S. A. Bowhill, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 27, 457, 1119 (1965).
32. J. E. C. Gliddon, Aeronomy Report № 12, University of Illinois, 1966.
33. J. T. Gosling, J. R. Asbridge, S. I. Bame, I. B. Strong, *Trans. Amer. Geophys. Union*, 47, 141 (1962).
34. J. T. Gosling, J. R. Asbridge, S. I. Bame, I. B. Strong, *J. Geophys. Res.*, 72, 101 (1967).
35. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, В. Д. Озеров, Р. Е. Рыбчинский, ДАН СССР, 131, 1301 (1960).
36. К. И. Грингауз, В. Г. Курт, В. И. Мороз, И. С. Шкловский, *Астрон. ж.*, 37, 716 (1960).
37. K. I. Gringauz, *Space Research*, 2, 539 (1961 a).
38. K. I. Gringauz, *Space Research*, 2, 574 (1961 b).
39. K. I. Gringauz, S. M. Balandina, T. A. Bordovsky, N. M. Shutte, *Space Research*, 3, 432 (1963).
40. K. I. Gringauz, V. V. Bezrukikh, L. S. Musatov, R. Ye. Rybchinsky, *Space Research*, 4, 621 (1964).
41. K. I. Gringauz, *J. Geophys. Res.*, 69, 1007 (1964).
42. К. И. Грингауз, М. З. Хохлов, Исследования космического пространства, изд. Наука, М., 1965, стр. 467.
43. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, М. З. Хохлов, Г. И. Застенкер, А. П. Ремизов, Л. С. Мусатов, Космические исследования, 4, 857 (1966).
44. K. I. Gringauz, V. V. Bezrukikh, L. S. Musatov, R. Ye. Rybchinsky, E. K. Solomatina, *Space Res.*, 6, 850 (1966).
45. K. I. Gringauz, *Solar-Terrestrial Physics*, edited by J. W. King and W. S. Newman, Academic Press, 1967, p. 341.
46. E. L. Hagg, *Canadian J. Phys.*, 45, 27 (1967).
47. J. P. Harrner, N. F. Ness, C. S. Scarce, T. L. Skillman, *J. Geophys. Res.*, 68, 1 (1963).

48. A. J. Dessler, R. D. Junday, *Planetary and Space Science*, 13, №1, 63 (1965).
49. A. J. Dessler, G. K. Walters, *Plan. Space Science*, 12, 227 (1964).
50. A. J. Dessler, F. C. Michel, *J. Geophys. Res.*, 71, 1421 (1966).
51. Ш. Ш. Долгинов, Е. Г. Ерошенко, А. Н. Жуагов, *Исследования космического пространства*, изд. Наука, М., 1965, стр. 342.
52. J. W. Dungey, *Phys. Rev. Lett.*, 6, 47 (1961).
53. J. W. Dungey, *J. Geophys. Res.*, 70, 1735 (1965).
54. Дж. В. Данжн, *Солнечно-земная физика*, перевод с английского под редакцией Н. А. Жулина и Г. А. Скуридина, изд. Мир, М., 1968, стр. 153.
55. L. D. Kavanagh, J. W. Freeman, A. J. Chen, *J. Geophys. Res.*, 72, 5511 (1968).
56. L. J. Cahill, P. G. Amazeen, *J. Geophys. Res.*, 68, 1835 (1963).
57. L. J. Cahill, *Trans. Amer. Geophys. Union*, 45, 231 (1964).
58. D. L. Carpenter, *Report to XIV General Assembly of URSI, Tokyo, 1963.*
59. D. L. Carpenter, R. L. Smith, *Reviews of Geophys.*, 2, 415 (1964).
60. D. L. Carpenter, *J. Geophys. Res.*, 71, 693 (1966).
61. D. L. Carpenter, C. J. Park, M. J. Taylor, *Trans. Amer. Geophys. Union*, 49, 254 (1968).
62. S. Chapman, V. C. A. Ferraro, *Terrestrial Magn. and Atm. Electr.*, 87, 147, 421 (1932).
63. P. J. Coleman, *J. Geophys. Res.*, 72, 5518 (1967).
64. С. Н. Кузнецов, Э. Н. Сосновец, В. Г. Столповская, *Исследования космического пространства*, изд. Наука, М., 1965, стр. 420.
65. A. J. Izargus, G. L. Siscoe, N. F. Ness, *J. Geophys. Res.*, 73, 2399 (1968).
66. C. E. McIlwain, *J. Geophys. Res.*, 68, 3681 (1961).
67. N. F. Ness, C. S. Scarse, J. B. Seak, *J. Geophys. Res.*, 69, 3531 (1964).
68. N. F. Ness, *J. Geophys. Res.*, 70, 2969 (1965).
69. Н. Ф. Несс, *Солнечно-земная физика*, перевод с английского под редакцией И. А. Жулина и Г. А. Скуридина, изд. Мир, М., 1968, стр. 115.
70. N. F. Ness, K. W. Behannon, S. C. Cantarano, C. S. Scarse, *J. Geophys. Res.*, 72, 927 (1967).
71. N. F. Ness, C. S. Scarse, S. C. Cantarano, *J. Geophys. Res.*, 72, 3769 (1968).
72. A. Nishida, *J. Geophys. Res.*, 71, 5669 (1966).
73. T. Obayashi, *The Report on Ionosphere and Space Res. in Japan*, 28, 3, 228 (1964).
74. T. Obayashi, A. Nishida, *Space Science Rev.*, 8, 3 (1968).
75. J. O'Brien, *J. Geophys. Res.*, 68, 989 (1963).
76. J. O'Brien, *Preprint, Relation of Auroral Radiation to the Magnetopause and to Van Allen Radiation Department of Space Science Rice, University, Houston, Texas, 1966.*
77. Дж. О'Брайен, *Солнечно-земная физика*, перевод с английского под редакцией И. А. Жулина и Г. А. Скуридина, изд. Мир, М., 1968, стр. 243.
78. I. Pizzella, L. P. Davis, J. W. Williamson, *J. Geophys. Res.*, 71, 5495 (1966).
79. Ы. Д. Плетнев, Г. А. Скуридин, В. П. Шалимов, П. Н. Швачунов, *Исследования космического пространства*, изд. Наука, М., 1965, стр. 285.
80. J. G. Roderer, *Conjugate Point Phenomena. Preprint of the paper presented to IQSY/COSPAR Symposium, London, 1967.*
81. М. В. Самохин, *Геомагнетизм и аэрономия*, 6, 983 (1966).
82. М. В. Самохин, *Геомагнетизм и аэрономия*, 7, 411 (1967а).
83. М. В. Самохин, *Космические исследования*, 5, 378 (1967б).
84. М. В. Самохин, *Доклад на Симпозиуме по физике магнитосферы*, Вашингтон, 1968.
85. G. P. Serbu, *Space Research*, 4, 564 (1965).
86. G. P. Serbu, E. J. R. Maier, *J. Geophys. Res.*, 71, 3755 (1966).
87. G. P. Serbu, E. J. R. Maier, *Space Res.*, 7, 527 (1967).
88. C. W. Snyder, M. Neugebauer, U. R. Rao, *J. Geophys. Res.*, 68, 6361 (1963).
89. R. L. Swisher, L. A. Frank, *J. Geophys. Res.*, 73, 5665 (1968).
90. H. A. Taylor, H. C. Brinton, C. R. Smith, *J. Geophys. Res.*, 70, 5769 (1965).
91. H. A. Taylor, H. C. Brinton, M. W. Pharo, *J. Geophys. Res.*, 73, 961 (1968).
92. J. O. Thomas, A. Y. Sader, *J. Geophys. Res.*, 69, 4561 (1964).
93. D. H. Fairfield, *J. Geophys. Res.*, 73, 6179 (1968).
94. L. A. Frank, *J. Geophys. Res.*, 70, 1593 (1965)

95. L. A. Frank, *J. Geophys. Res.*, 71, 4631 (1966).
96. L. A. Frank, *J. Geophys. Res.*, 72, 185 (1967 a).
97. L. A. Frank, *J. Geophys. Res.*, 72, 1905 (1967 b).
98. L. A. Frank, *On the Distribution of Low Energy Protons and Electrons in the Earth's Magnetosphere*, Preprint, Department of Physics and Astronomy, The University of Iowa, 1967 b.
99. L. A. Frank, *J. Geophys. Res.*, 72, 3753 (1967 g).
100. L. A. Frank, R. L. Swisher, *J. Geophys. Res.*, 73, 442 (1968).
101. J. W. Freeman, *J. Geophys. Res.*, 67, 921 (1962).
102. J. W. Freeman, J. A. Van Allen, L. J. Cahill, *J. Geophys. Res.*, 68, 2121 (1963).
103. J. W. Freeman, *J. Geophys. Res.*, 69, 1691 (1964).
104. J. W. Freeman, *J. Geophys. Res.*, 73, 4151 (1968).
105. J. W. Freeman, J. J. Maguire, Preprint, Particle Dynamics at the Synchronous Orbit, Department of Space Science, Rice University, Houston, Texas, 1967.
106. J. W. Freeman, C. S. Warren, J. J. Maguire, *J. Geophys. Res.*, 73, 5719 (1968).
107. J. W. Freeman, D. T. Young, *Trans. Amer. Geophys. Union*, 49, 227 (1968).
108. L. A. Fritz, D. A. Gurnett, *J. Geophys. Res.*, 70, 2485 (1965).
109. М. Э. Хохлов, Тезисы доклада, представленного на Белградский симпозиум по солнечно-земной физике, 1966.
110. И. С. Шкловский, В. И. Мороз, В. Г. Курт, *Астрон. ж.*, 37, 931 (1960).

Радиотехнический институт  
АН СССР

Поступила в редакцию  
7 февраля 1969 г.