

Академия наук
СССР

Academy of Sciences
USSR

ИНСТИТУТ
КОСМИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ



SPACE
RESEARCH
INSTITUTE

Н.М. Шотте

ЗАХВАЧЕННЫЕ И ВЫСЫПАЮЩИЕСЯ
ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ С ЭНЕРГИЯМИ,
МЕНЬШИМИ 20 КЭВ
В НИЗКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ

117810 Москва, ГСН-7. Профсоюзная 84/32

Телерадио: 111325 ПАРСЕН

Москва

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пр-818

Н.М.Шютте

ЗАХВАЧЕННЫЕ И ВЫСЫПАЮЩИЕСЯ
ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ С ЭНЕРГИЯМИ,
МЕНЬШИМИ 20 КЭВ В НИЗКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ

Представлено к печати
заместителем директора
В.М.Балебановым

1983

The general data of observing the charged particle fluxes with energies from ~ 100 eV to ~ 20000 eV at the lower and equatorial latitudes are presented. The measurement results beginning from 1961 were analysed. It was shown, that the precipitation of charged particle fluxes at the lower and equatorial latitudes are irregular and their intensity does not correlate with geomagnetic activity. For the most events the precipitation zones correspond to the lower magnitude of geomagnetic field. It may be supposed that these particle fluxes have at least a double nature-ring current and ionosphere.

В работе представлены данные наблюдений потоков заряженных частиц с энергиями от 100 до 20000 эВ в области низких и экваториальных широт. Проанализированы результаты измерений начиная с 1961 г. Показано, что высыпания заряженных частиц на низких и экваториальных широтах нерегулярны и их интенсивность не находится в непосредственной зависимости от геомагнитной активности. Географически они в большинстве случаев локализуются в областях с наименьшей напряженностью геомагнитного поля. Можно полагать, что выпадающие на нижних и экваториальных широтах частицы имеют по крайней мере двойную природу - кольцевой ток и ионосфера.

Последнее время низкие и экваториальные широты привлекают к себе все большее внимание. Если несколько лет назад полагали, что эта область широт не представляет существенного интереса и основное внимание уделялось полярным и авроральным широтам, то сейчас стало очевидным, что именно вблизи экваториальных широт наблюдаются трудно объяснимые и непонятные явления.

В работе будут представлены основные результаты наблюдений потоков заряженных частиц с энергиями от ~ 100 до 20000 эВ. в области низких и экваториальных широт.

Первые экспериментальные сведения о потоках заряженных частиц на низких широтах следует отнести к началу шестидесятых годов. Эти измерения охватывали в основном энергии, большие десятков и сотен килоэлектронвольт, поскольку в качестве чувствительных элементов использовались главным образом различные газоразрядные счетчики или твердотельные детекторы.

Исторически к числу наиболее ранних наблюдений потоков заряженных частиц на средних широтах малых высот следует отнести данные 1961 г. Фримана на спутнике ИНЖУН-1 [1], наблюдавшего существенные потоки протонов с энергиями от 500 эВ до 1 МэВ на ночной стороне магнитосферы. Последующие эксперименты как этой группы исследователей, так и многих других, не смогли ни подтвердить, ни опровергнуть первоначально полученные данные. Более того, в результате серии измерений Франка и Свишера в 1966 г. [2], а также Хилтона и др., было высказано мнение, что во внутреннем радиационном поясе интенсивных потоков протонов, описанных Фриманом [1], не наблюдается. На рис.1 приведены сравнительные данные Фримана и Франка (со спутников ОГО-3, 1966 г., [2]), свидетельствующие о существенном расхождении полученных значений интенсивности зарегистрированных потоков.

Позднее Моритц [3], а потом Ховештадт с сотрудниками [4] обнаружили вблизи магнитного экватора протоны с энергиями $250 \text{ кэВ} < E < 1,5 \text{ МэВ}$, а Мизера и Блейк [5] расширили эти измерения до 10 кэВ : Шолер и др. обнаружили ионы гелия с энергиями $\sim 2,5\text{--}8 \text{ МэВ}$ [6]. В этих экспериментах частицы имели узкое пичч-угловое распределение с максимумом вблизи $\sim 90^\circ$ и локализовались в районе $\pm 15^\circ$ от геомагнитного экватора. Авторы высказали предположение, что источником этих частиц может быть внутренний радиационный пояс. Однако отмечается, что диффузией из внутреннего радиационного пояса трудно объяснить постоянство наблюдаемых потоков в диапазоне $L \approx 1,01 \div 1,15$, а также характер энергетических распределений, а именно, большие интенсивности при малых значениях энергий.

Для энергичных частиц в интервале энергий от 130 кэВ до 1 МэВ получены энергетические спектры и выявлена динамика их поведения в зависимости от L [7]. Четко выраженные два энергетических максимума интерпретируются авторами как результат взаимодействия электронов с вистлеровскими модами электромагнитных волн.

Для энергий $E \lesssim 20 \text{ кэВ}$ число экспериментальных наблюдений до последнего времени очень ограничено, результаты во многих случаях противоречивы, а иногда и спорны.

Измерения Хейкиллы на спутнике ИСИС-1 [8], обнаружившего существенные потоки электронов и протонов на низких широтах вблизи экватора (рис.2), снова подняли интерес к необычным свойствам низкоширотной магнитосферы. Следует отметить, что ранее в работах Красовского и др. [9], Кнудсена [10] упоминалось о присутствии потока мягких частиц на высотах F-области низких широт. Однако неоднозначная природа этих потоков не привлекала к ним достаточное внимание. По данным Хейкиллы [8], соответствующих высотам $600\text{--}800 \text{ км}$ вблизи магнитного экватора, интенсивность электронных потоков достигала $\sim 10 \text{ эрг см}^{-2} \text{ ср}^{-1} \text{ с}^{-1}$ в диапазоне энергий от ~ 10 до 10^4 эВ , а протонов — $\sim 1 \text{ эрг см}^{-2} \text{ ср}^{-1} \text{ с}^{-1}$ в том же диапазоне энергий. Эти потоки были очень похожи на потоки частиц обычно наблюдаемые в связи с авроральными событиями (см.рис.3), кроме того, обладали необычной очень сильной пичч-угловой анизотропией и малой дрейфовой скоростью. Преимущественное направление движения этих частиц было на восток, а не на запад. В диапазоне энергий $E < 100 \text{ эВ}$ максимальные интенсивности потоков электронов и протонов регистрировались в противофазе.

В статье Хейкиллы не было дано удовлетворительного объяснения этим результатам, а в последствии отмечалось, что движение потока частиц в восточном направлении было представлено некорректно. Анализируя эти данные, Уиннингем [11] высказал мнение, что описанные в работе [8] потоки частиц были направлены по полю и что спектрометр частиц на спутнике ИСИС-1, как правило, фиксировал существенные, продольные, низкоэнергичные потоки электронов при прохождении магнитного экватора вблизи местного времени 2100 LT; эти потоки не наблюдались вблизи 0400 LT и 1000 LT и изредка появлялись в районе 1600 LT. Такая долготная зависимость была проинтерпретирована как наличие наибольших потоков между Африкой и западной стороной Южной Америки, а наименьших - вблизи Индии.

Обнаружение направленных по полю сильных потоков на экваториальной ионосферно-магнитосферной границе было довольно удивительно, поскольку это означало, что во многих случаях в этой области имеют место те же процессы, что и наблюдаемые в авроре. Было высказано предположение, что эти токовые системы, направленные по полю, некоторым образом связаны с известным для этих широт т.н. "рассыпанием" слоя F. Однако пока не удалось выяснить, какую роль заряженные частицы могут играть в рассыпании слоя F. С целью изучения экваториального F-рассеяния был проведен эксперимент ЭКВИН [12], представлявший собой комплекс наземных, спутниковых и ракетных измерений параметров ионосферной плазмы и потоков заряженных частиц. Однозначная связь между явлением F-рассеяния и экваториальными потоками электронов и протонов не была установлена, равно как и с наблюдениями свечений ночного неба в кислородных эмиссиях и с ориентацией энергоспектрометра частиц относительно векторов магнитного поля и скорости.

Потоки частиц на низких широтах ($L = 1,16$) наблюдали во время ракетного запуска Хилл и др. [13] с помощью пропорционального счетчика чувствительного как к электронам с энергиями $\sim 2-12$ кэВ, так и к протонам с энергиями от ~ 55 до 67 кэВ. Правда, интенсивность этих потоков $\sim 10^2 (\text{см}^2 \text{с ср кэВ})^{-1}$ была существенно ниже, чем по данным Хейкиллы [8]. В то же время, в других ракетных экспериментах примерно на тех же $L = 1,1$ были получены аналогичные результаты [14, 15] (см. рис.4). На рис.4 приведены результаты нескольких наблюдений, полученные в течение одного года. Характерно, что во всех случаях форма

спектра может быть представлена как $N(E) \cdot E^{-1}$. Авторы этих измерений полагают, что ввиду низкой высоты наблюдений (~300 км) можно ожидать некоторой деградации спектрального распределения из-за поглощения в атмосфере. Позднее Лайонс и Ричмонд [16] высказали предположение, что Хилл и др. [13] зафиксировали не электроны, а энергичные протоны (~60 кэВ). Одним из аргументов для такого предположения послужил тот факт, что Мизера и Блейк [5] в период фазы восстановления суббури наблюдали вблизи экватора потоки протонов интенсивностью $\sim 65 \text{ (см}^2\text{с ср кэВ)}^{-1}$ при энергии ~60 кэВ и что интенсивность потоков, измеренных Хиллом и др. [13] была примерно такая же.

Следует отметить, что в настоящее время имеется довольно существенное число ракетных и спутниковых данных о наличии на малых высотах довольно интенсивных потоков ионов вблизи экватора [17-21]. Масс-спектрометрические ракетные измерения Гольдберга [17] обнаружили необычное увеличение фонового тока на высотах больших 200 км на магнитном экваторе. В результате анализа экспериментальных данных было высказано предположение, что источником этого тока могли быть потоки электронов или протонов с энергиями ~2-20 кэВ и интенсивностью $\sim 10^{10} \text{ ч/см}^2\text{с ср}$, что хорошо согласуется с результатами измерений на спутнике ИСИС-1. В то же время, во многих случаях были обнаружены существенно меньшие потоки частиц в районе экватора. Например, в комплексном эксперименте по изучению экваториальных нерегулярностей, проводившемся, правда, в относительно спокойных геомагнитных условиях ($K_p = 3^+$) [12], или в эксперименте Торр и др. [19] на спутнике АЕ-Ц, когда интенсивность зарегистрированных потоков не превышала $10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4} \text{ эрг/см}^2\text{с}$ при нормальных геомагнитных условиях.

Направление вверх интенсивные потоки ионов с энергиями 0,15-33 кэВ наблюдала группа французских ученых во время ряда ночных ракетных экспериментов в Аргентине ($L \approx 1,3$) [18] (см. рис. 5). Величины этих потоков были несколько меньше, чем при измерениях на спутнике ИСИС-1 [8], но больше, чем на АЕ-Ц. Результаты ракетного эксперимента в Аргентине хорошо согласуются с масс-спектроскопическими измерениями Шарпа и др., наблюдавших потоки кислородных ионов на $L > 2,9$ [22]. Авторы экспериментов [18, 22] полагают, что зарегистрированные ими потоки ионов имеют ионосферную природу.

В работе [21] были приведены результаты одновременных измерений потоков электронов и ионов в области экваториальных широт, полученные на полярном спутнике "КОСМОС-900" в апреле 1977 г. Энергетические спектры регистрировались при помощи двух идентичных пятиканальных электростатических анализаторов, нормали к входным окнам которых были ориентированы в противоположные стороны и составляли с продольной осью объекта угол 22° . На рис.6 показаны примеры энергетических спектров для северного полушария в диапазоне $L \approx 1,6-1,09$ и $\lambda \approx 235^\circ$, наблюдавшиеся в полдень в очень спокойных геомагнитных условиях ($K_p = 1$). Длительность регистрации каждого такого спектра составляла 20 с. Видно, что характер энергетических распределений в пределах рассматриваемого интервала измерения параметра L в целом довольно стабилен. Можно отметить, что с уменьшением L доля частиц меньших энергий несколько возрастает, а более высоких - уменьшается, интегральная интенсивность остается при этом практически неизменной. Кроме того, практически равными оказываются интегральные потоки ионов и электронов. Следует добавить также, что питч-углы регистрируемых потоков были близки к 90° . Преимущественная направленность этих потоков была в сторону Земли.

Энергетические распределения ионов и электронов, наблюдавшиеся в возмущенный период 6.04.1977 ($K_p = 7$; $\lambda \approx 207^\circ$) при такой же скорости передачи ТМ-информации, что в предыдущем случае, показаны на рис.7.

Сравнение результатов измерений для спокойных и возмущенных условий свидетельствует о том, что в обоих случаях для $L \approx 1,09-1,13$ ионные спектры были очень похожими, то есть мало зависели от геомагнитной активности, тогда как электронные - существенно различны. В случае $K_p = 7$ имели место значительные временные флуктуации потоков электронов с энергиями от сотен эВ до нескольких кэВ, амплитуда которых достигала трех порядков. Характерно также, что для $L > 1,7$ такие колебания интенсивности наблюдались и в спокойных условиях. Максимальные интенсивности низкоэнергичных потоков ($E < 300$ эВ) при $K_p = 7$ были примерно на два порядка меньше, чем в спокойных условиях, а высокоэнергичная часть ионных спектров менее устойчива. В обоих случаях можно проследить некоторую симметрию в изменении формы энергетических распределений в зависимости от L , а также постоянство

характера энергетических распределений - при меньших значениях энергий интенсивность всегда была более высокой. Этот результат согласуется с данными других экспериментов [4, 18]. Кроме того, как и в случае [8] при энергиях $E < 300$ эВ максимумы энергетических распределений для ионов и электронов были в противофазе.

Было установлено, что в стационарных, спокойных геофизических условиях приэкваториальные потоки заряженных частиц могут наблюдаться сравнительно длительное время (на протяжении 8 оборотов спутника, то есть примерно 12 ч) в широком диапазоне долгот (от 68 до 238°), без заметных изменений интенсивности и формы энергетических распределений. На рис. 8 и 9 приведены распределения для электронов и ионов, полученные подряд на протяжении шести витков на дневной стороне орбиты вблизи экватора для $L \approx 1,03-1,1$, но при более низкой, по сравнению с данными рис. 6 и 7, скорости передачи ТМ-информации. Видно, что энергетические распределения были для всех этих оборотов спутника одинаковы и мало отличаются от представленных ранее на рис. 6 и 7. В области $L \approx 1,01-1,15$ форма распределения не меняется, на что обращали внимание и авторы работ [4, 8].

Как правило, в спокойных условиях дневные потоки были более стационарные, чем ночные, и в отличие от ночных имели более четко выраженную зависимость от L . С ростом геомагнитной активности нестационарность ночных экваториальных потоков возрастала, что затрудняло практическую возможность их регистрации. Кроме того, в ночное время практически не наблюдались одновременно близкие по величине потоки электронов и ионов. Примеры ионных энергетических распределений, полученных на разных долготах 1 и 2 апреля 1977 года при $K_p = 1$ и $MLT = 0-0,5^h$, продемонстрированы на рис. 10. Электронные потоки в это время либо отсутствовали, либо носили исключительно случайный характер, а ионные спектры практически не зависели от L и B , менявшихся от 1,09 до 1,8 и от 0,22 до 0,4 Гс, соответственно.

Анализ полученных данных не дает оснований полагать, что появление приэкваториальных потоков заряженных частиц с энергиями от сотен эВ до нескольких кэВ однозначно связано с геомагнитной активностью. Потоки наблюдались как в спокойное, так и в возмущенное время, периодически. Например, 1.04.1977 г. при $K_p = 1$ были зарегистрированы интенсивные потоки с энергиями

от сотен эВ до десятков кэВ (см.рис.6, 8 и 9), а 8.04.1977 г. при $K_p = 5-4$ в том же самом географическом районе и в то же самое местное время - потоков практически не было. Ранее уже отмечалось, что в эксперименте ЭКВИН [12], который проводился в условиях умеренной геомагнитной активности при $K_p = 3^+$, потоки вблизи экватора также практически не наблюдались.

Итак, приэкваториальные потоки заряженных частиц с энергиями меньшими 20 кэВ наблюдались спорадически как в дневное время, так и ночью. Статистические данные о наблюдении этих потоков на различных долготах в апреле 1977 г. приведены в таблице. Первый столбец таблицы соответствует максимальному интервалу долгот; второй - исключает область южной магнитной аномалии (ЮМА); третий - соответствует только зоне долгот ЮМА.

Таблица

Число случаев наблюдения приэкваториальных потоков, %

Ориентация прибора	Время наблюдения	Интервал долгот λ		
		0-360°	0-300°	300-360° (ЮМА)
"Вверх"	день	40	33	90
"Вниз"		32	16	90
"Вверх"	ночь	26	12,5	72
"Вниз"		16	2	80

Из таблицы видно, что, во-первых, в дневное время потоки регистрировались чаще, чем в ночное, и что практически всегда, а именно в 90% случаев, они наблюдались в районе южной магнитной аномалии (ЮМА). Поскольку ночные приэкваториальные потоки были менее стационарны, чем дневные, не исключено, что этот результат обусловлен невысокой скоростью передач ТМ-информации на спутнике "Космос-900".

Спектральные распределения, наблюдавшиеся в районе ЮМА в дневные и ночные часы, были практически одинаковы и не зависели от геомагнитной активности. Вне южной магнитной аномалии случаи наблюдения дневных потоков составляли примерно 3%, а ночных - 12%. При этом число случаев одновременной регистрации этих по-

токов двумя приборами тоже было существенно меньше: 16 и 2%, соответственно.

Анализ имеющихся экспериментальных данных показывает, что вероятность появления, а также интенсивность дневных приэкваториальных потоков существенным образом связаны с напряженностью геомагнитного поля вблизи экватора. На рис. 11 приведена диаграмма, иллюстрирующая зависимость числа случаев наблюдения таких потоков электронов и ионов от величины напряженности геомагнитного поля B_{eq} , когда одновременно работали оба анализатора, ориентированные по местной вертикали в противоположных направлениях. Из рисунка видно, что в тех случаях, когда $B_{eq} < 0,23$ Гс потоки частиц регистрировались обоими приборами (зачерченные области), при $B_{eq} = 0,25-0,26$ Гс - только одним прибором, ориентированным в противоположном от Земли направлении (заштрихованные области), а при $B_{eq} > 0,25$ Гс - потоки отсутствовали.

Кроме того, при регистрации приэкваториальных потоков имела место некоторая зависимость между пространственным распределением интенсивности этих потоков вдоль одной долготы и напряженностью геомагнитного поля B . А именно, в сопряженных точках, расположенных вдоль одного меридиана в области $L = 1,1-1,2$, наибольшим величинам потоков Φ соответствовали наименьшие значения B_{eq} . На рис. 12 показано, как меняется вдоль одной L оболочки величина отношения интенсивностей этих потоков в северном Φ_N и южном Φ_S полушариях в зависимости от величины отношения B_N/B_S . Можно, по-видимому, считать, что асимметрия в распределении плотности этих потоков относительно экватора обусловлена соответствующей асимметрией в распределении напряженности геомагнитного поля. Если отношение близко к единице, то потоки также оказываются практически равными. Долготное распределение плотности приэкваториальных потоков, приведено на рис. 13 ($\Phi_N/\Phi_S < 1$ - светлые линии, $\Phi_N/\Phi_S > 1$ - зачерненные линии). Длины линий соответствуют географическим широтам наблюдения этих потоков в пределах $L < 1,2$. Изменение отношения B_N/B_S в зависимости от долготы λ показано в верхней части рисунка. Видно, что пространственное распределение потоков заряженных частиц вблизи магнитного экватора на высоте ~500 км определяется характером распределения

напряженности геомагнитного поля в этой области. Интенсивность этих потоков увеличивается в областях более слабого поля.

Питч-угловая ориентация входов анализаторов во время появления потоков вблизи экватора колебалась от -100 до -60° . При этом было обнаружено, что наибольшие интенсивности приэкваториальных потоков на разных оборотах спутника соответствовали различным питч-углам приборов. Полученная зависимость значений питч-углов θ_0 (Φ_{\max}), при которых имела место максимальная интенсивность потоков, от величины напряженности магнитного поля B , показанная на рис. 14, свидетельствует о линейной взаимозависимости этих параметров. Этот факт должен означать, что зарегистрированные потоки квазизахвачены и их движение происходит в соответствии с сохранением адиабатических инвариантов.

Имеющиеся экспериментальные данные о потоках заряженных частиц вблизи магнитного экватора свидетельствуют, по-видимому, о том, что эти потоки наблюдаются нерегулярно и что интенсивность их варьируется в пределах нескольких порядков, а энергетические распределения для дневных и ночных условий - существенно различны. Сопоставляя многочисленные ракетные и спутниковые измерения, как прямые, так и косвенные, включая и наблюдения свечений воздуха в ультрафиолетовом и видимом диапазонах в длин волн, Восс и Смит [20] для ночных умеренно возмущенных условий представили экваториальную зону высыпаний (см. рис. 15). На рисунке во всех случаях максимальные интенсивности нормализованы к единице. Видно, что зона высыпаний ограничивается практически областью $\pm 20^\circ$ относительно геомагнитного экватора.

Полагают, что источником наблюдаемых экваториальных высыпаний ионов является кольцевой ток. А именно, протоны кольцевого тока в результате зарядо-обменного взаимодействия с нейтральным водородом превращаются в высокоскоростные атомы водорода, двигающиеся поперек силовых линий в область малых высот, где они снова становятся временно захваченными протонами в результате процесса столкновительной ионизации [3, 5, 20]. Предложенный зарядо-обменный механизм высыпаний ионов на низких и экваториальных широтах хорошо согласуется с результатами измерений высотных профилей потоков, энергетических спектров и питч-угловых распределений [3, 5, 20] и может объяснить быстрый дрейф энергичных частиц в перпендикулярном, относительно магнитных

силовых линий, направлении. Однако при этом трудно объяснить, почему максимум интенсивности наблюдается именно на магнитном экваторе и почему широтный диапазон этих высыпаний ограничен областью широт $\pm 20^\circ$. Кроме того, этот механизм нельзя использовать для интерпретации случаев регистрации потоков ионов вдоль поля [12, 18]. Учитывая временную динамику спектральных распределений, а также длительность наблюдения этих потоков, по-видимому, считать, что их единственным источником являются протоны кольцевого тока или внутреннего радиационного пояса, поступающие на малые высоты в результате зарядо-обменных процессов. В работах Блейка [5, 23], Тинслея [24], Лайонса и др. [25], было показано, что во время фазы восстановления суббури (через 24 часа) потоки заряженных частиц на низких широтах малых высот существенно обогащены тяжелыми ионами: гелием и кислородом. Косвенным подтверждением наличия интенсивных потоков гелия в районе магнитного экватора могут служить наблюдения свечений воздуха в диапазоне длин волн $\lambda \sim 304\text{\AA}$ [26] в результате комбинационной эмиссии энергичного гелия. Шарп и др. [22, 27] наблюдали ионы H^+ и O^+ на $L \approx 2,6-3,4$ во время главной фазы суббури и через 2 дня после нее. Они предположили наличие ионосферного источника этих ионов, считая, что во время главной фазы происходит инжекция тяжелых ионосферных ионов, относительный состав которых в период восстановления меняется за счет зарядо-обменных процессов. Обсуждая результаты измерений группы Шарпа [22, 27] и выводы, сделанные в работах [23-25] о наличии ионов гелия, Лайонс высказал предположение [28], что эти данные не противоречат друг другу. Он полагает, что из-за влияния питч-угловой диффузии, обусловленной резонансными взаимодействиями с ионно-циклотронными волнами, состав высыпающихся тяжелых ионов должен существенно зависеть от параметра L .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, совокупность имеющихся экспериментальных данных свидетельствует о том, что наблюдаемые высыпания заряженных частиц на низких и экваториальных широтах имеют по крайней мере двойную природу - как ионосферную, так и кольцевой ток. Даже в том случае, если их источником является кольцевой ток, проникновение этих потоков на малые высоты и их дальнейшее существование должно сопровождаться процессами взаимодействия с

окружающей атмосферой, т.е. существенным образом зависеть от ее состояния состава, плотности в данный момент времени и на данной высоте. Поэтому при рассмотрении зарядо-обменных процессов нельзя не принимать во внимание эффекты взаимодействий волна-частица, являющиеся существенным фактором динамики заряженных частиц на высотах, больших ~ 300 км. Во всяком случае эти процессы должны контролировать потери ионов после бури. А именно, энергичные протоны кольцевого тока должны генерировать ионно-циклотронные волны, которые, проникая в ионосферу, взаимодействуют с тепловой ионосферной плазмой (главным образом с ионами O^+) при выполнении резонансных условий, передавая ей часть энергии. При этом, в случае однородного (или постоянного) магнитного поля (то есть на магнитном экваторе) практически нет ограничений при передаче энергии от волны к иону и наоборот. Характеристики наблюдаемых приэкваториальных потоков могут свидетельствовать о влиянии взаимодействий волна-частица. Например, в работе [29] рассмотрена возможность интенсивного нагрева ионов окружающей плазмы до энергий ~ 400 эВ в перпендикулярном геомагнитному полю направлении ионно-циклотронными волнами. С этой точки зрения можно объяснить постоянство наблюдаемых потоков, их повышенные интенсивности при энергиях $\sim 100-200$ эВ, а также тот факт, что максимумы энергетических распределений для ионов и электронов в области энергий $E < 300$ эВ всегда находятся в противофазе [8, 21].

Косвенным подтверждением возбуждения ионно-циклотронных неустойчивостей при взаимодействии горячих ионов с холодной ионосферной плазмой могут быть наблюдения некогерентных электромагнитных волн вблизи $L \approx 1,1$ (так называемые шипения) в периоды сильной геомагнитной активности [30]. Реальная картина, безусловно, существенно сложнее, поскольку ионно-циклотронные волны не монохроматичны и, кроме того, необходимо учитывать затухание распространяющихся вниз к ионосфере волн, а также состояние окружающей плазмы. Так, авторы работы [29] отмечают, что эффекты поперечного ускорения ионов имели место, как правило, при очень низкой концентрации окружающей плазмы ($\sim 300 \text{ см}^{-3}$). Не исключено поэтому, что это обстоятельство может играть существенную роль в реализации возможностей возникновения этих потоков и их связи с геомагнитной активностью, объяснить причину их спорадичности,

наблюдения одинаковых спектральных и интегральных интенсивностей как в спокойные, так и в возбужденные периоды и пр. Поэтому оценке влияния процессов взаимодействий волна-частица на характеристики и поведение проэкваториальных потоков заряженных частиц с энергиями от сотен эВ до десятков кэВ должно быть уделено особое внимание.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. J.W. Freeman, J. Geophys. Res., 67, 921, 1962.
2. L.A. Frank, R.L. Swisher, J. Geophys. Res., 73, 442, 1968.
3. J. Moritz, Z. Geophys., 38, 701, 1972.
4. D.B. Hovestadt, B. Hausler, M. Scholer, Phys. Rev. Lett., 28, 1340, 1972.
5. P.F. Mizera, J.B. Blake, J. Geophys. Res., 78, 1058, 1973.
6. M. Scholer, D. Hovestadt, G. Morfill, J. Geophys. Res., 80, 80, 1975.
7. W.L. Imhof, E.E. Gains, J.B. Reagan, J. Geophys. Res., 78, 4568, 1973.
8. W.J. Heikkila, J. Geophys. Res., 76, 1076, 1971.
9. V.I. Krassovskii et al., Space Res., 4, 572, 1964.
10. W.C. Knudsen, J. Geophys. Res., 73, 841, 1968.
11. J.D. Winningham, NASA GSFC Rep. X-661-74-130, 1974.
12. F.A. Morse, B.C. Edgar et al., J. Geophys. Res., 82, 578, 1977.
13. R.W. Hill et al., J. Geophys. Res., 75, 7267, 1970.
14. T. Kohno, J. Geomagn. Geoelec., 25, 131, 1973.
15. S. Hayakawa, J. Geomagn. Geoelec., 25, 113, 1973.
16. L.R. Lyons, A.D. Richmond, J. Geophys. Res., 83, 2201, 1978.
17. R.A. Goldberg, J. Geophys. Res., 79, 5299, 1974.
18. R. Prange, Ann. Geophys., 34, 187, 1978.

19. D.G. Torr, M.R. Torr et al., *Geophys. Res. Lett.*, 3, 305, 1976.
20. H.D. Voss, L.G. Smith, *J. Atm. Terr. Phys.*, 42, 227, 1980.
21. N.M. Shutte, A.I. Puolokainen, A.F. Kopylov, *Space Res.*, XIX, 357, 1979.
22. R.D. Sharp, R.G. Johnson, E.G. Shelley, *J. Geophys. Res.*, 81, 3283, 1976.
23. J.B. Blake, *J. Geophys. Res.*, 81, 6189, 1976.
24. B.A. Tinsley, *J. Geophys. Res.*, 81, 6193, 1976.
25. L.R. Lyons, D.S. Evans, *J. Geophys. Res.*, 81, 6197, 1976.
26. R.R. Meier, C.S. Weller, *J. Geophys.*, 80, 2813, 1975.
27. R.G. Johnson, R.D. Sharp, E.G. Shelley, *Geophys. Res. Lett.*, 4, 403, 1977.
28. L.R. Lyons, *J. Geophys. Res.*, 82, 2367, 1977.
29. E. Ungstrup, D.M. Klumpar, W.J. Heikkila, *J. Geophys. Res.*, 84, 4289, 1979.
30. B.T. Tsurutani, E.J. Smith, R.M. Thorne, *J. Geophys. Res.*, 80, 600, 1975.

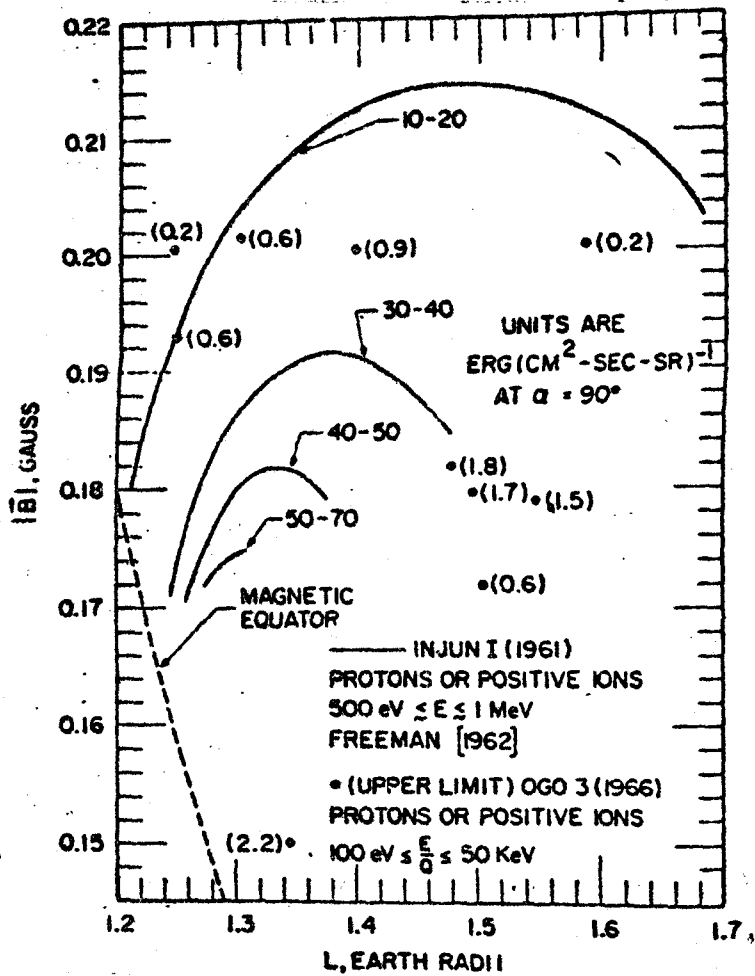


Рис. 1. Результаты наблюдений потоков протонов на спутниках "ИНЖУН-1" и "ОГО-3"

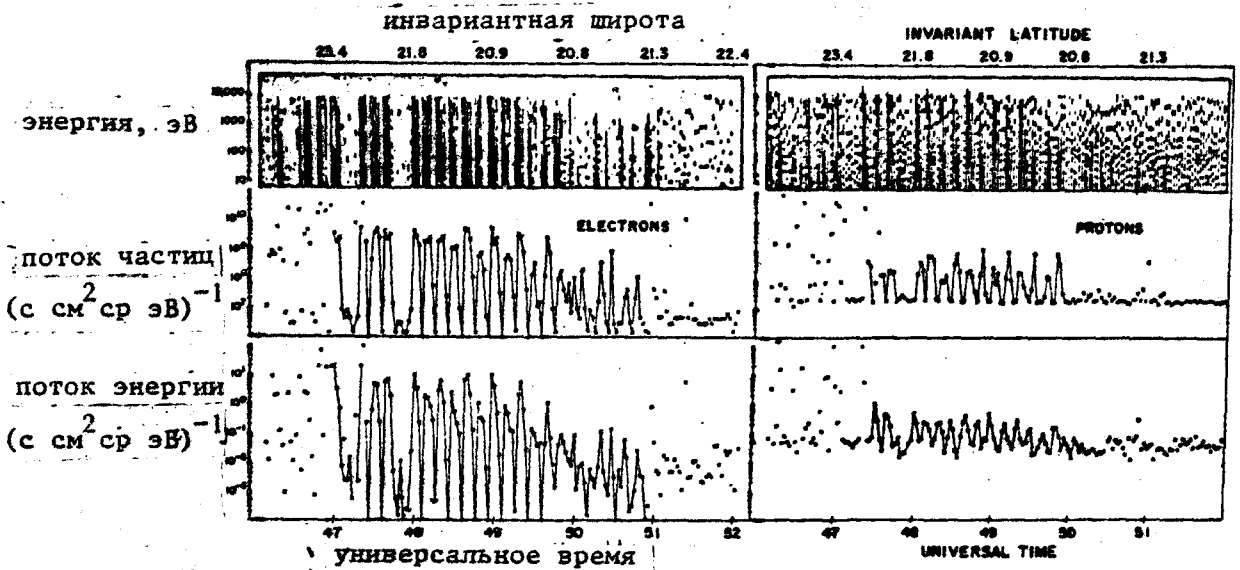


Рис. 2. Результаты измерений потоков протонов и электронов на спутнике "ИСИС-1"

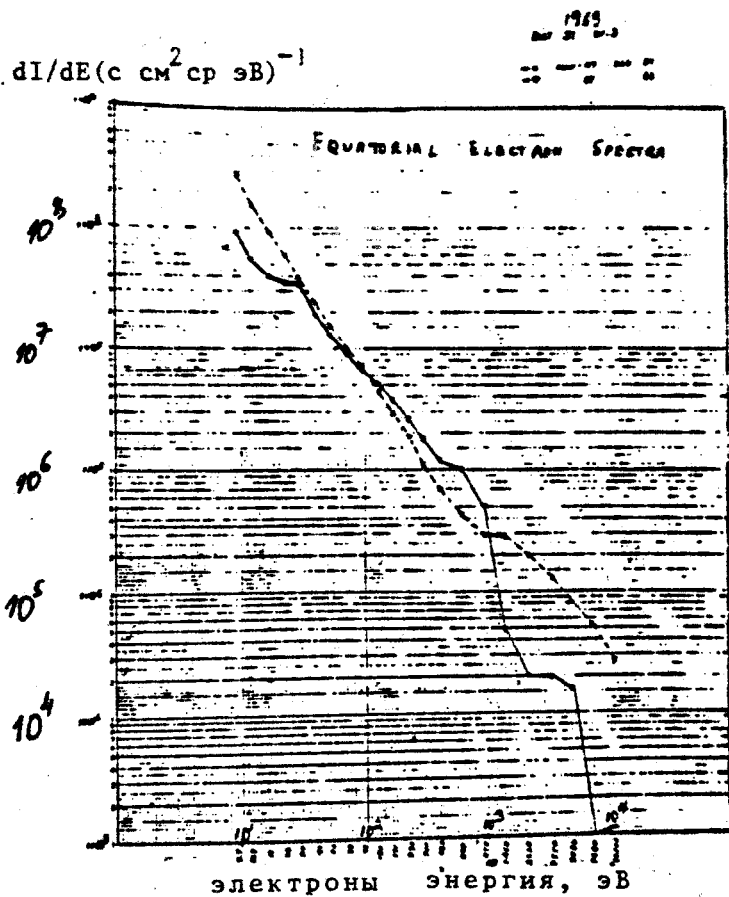


Рис. 3. Примеры электронных спектров, полученных на спутнике "ИСИС-1"

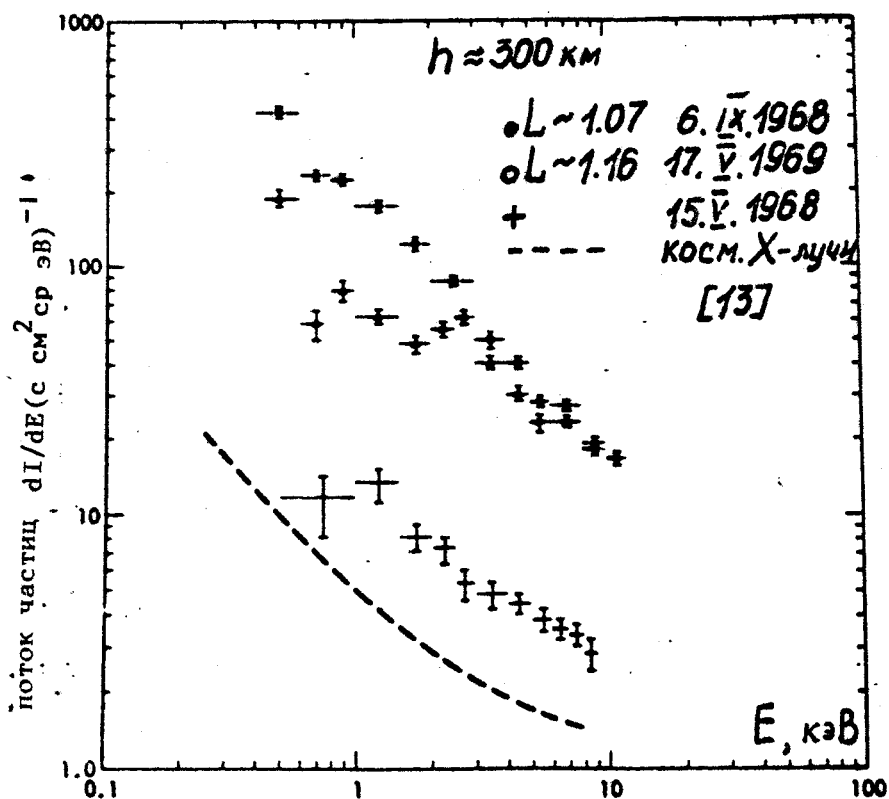


Рис. 4. Результаты ракетных экспериментов 1968-1969 гг.

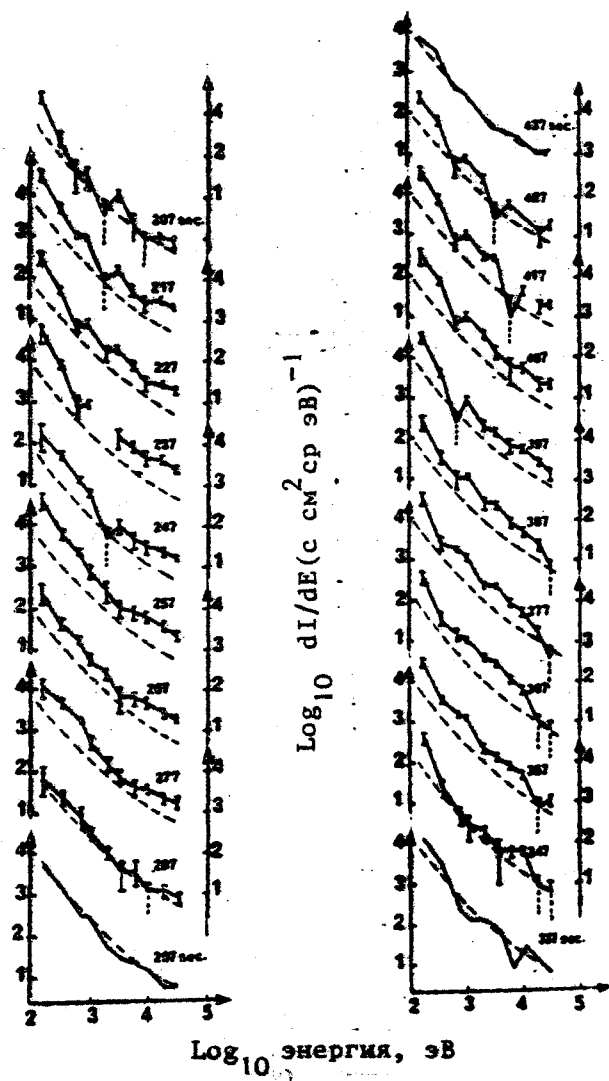


Рис. 5. Примеры энергетических спектров, зарегистрированных в ракетном эксперименте |18|

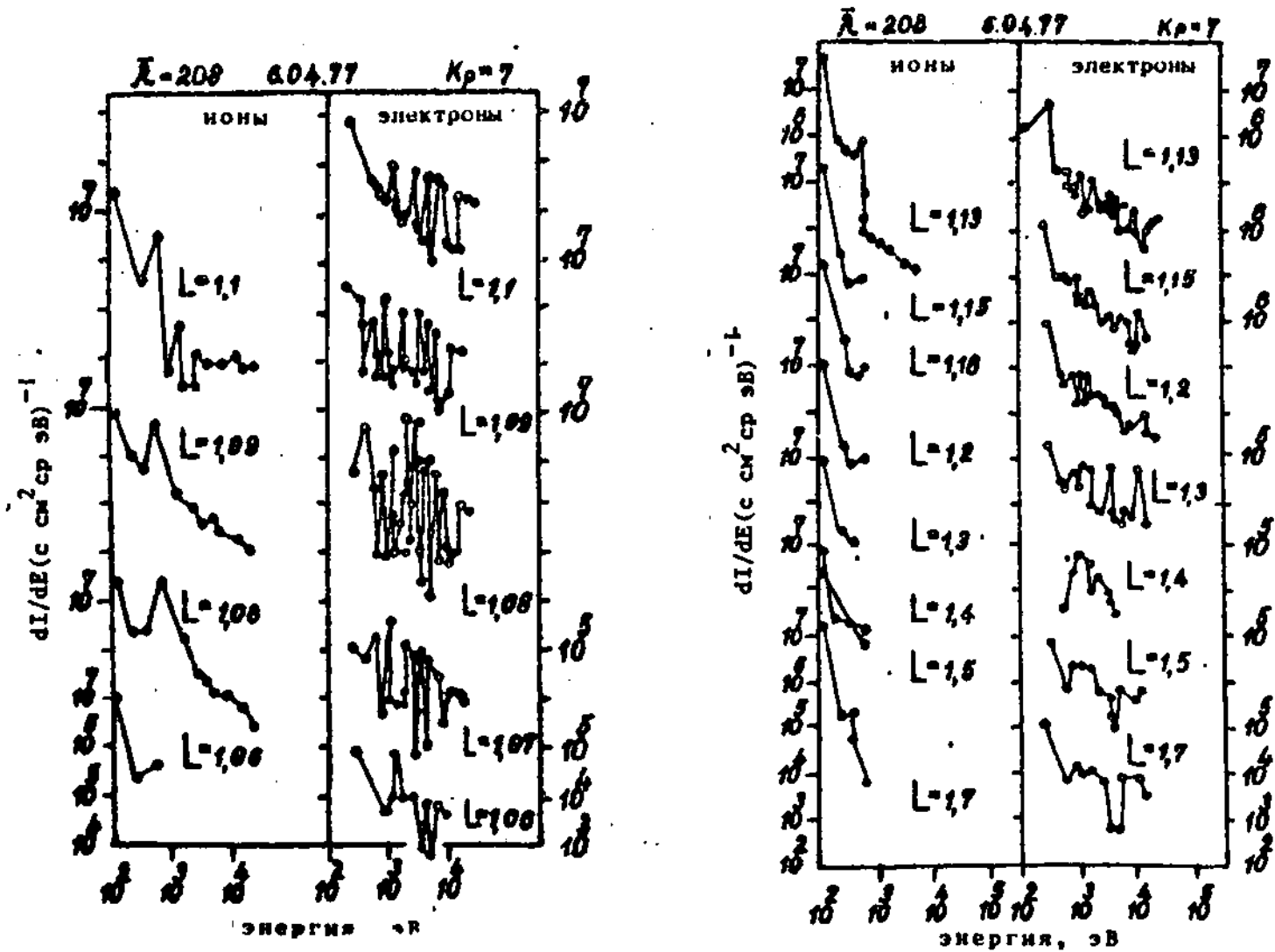


Рис. 7. Энергетические спектры ионов и электронов, полученные на спутнике "Космос-900" при $Kr=7$

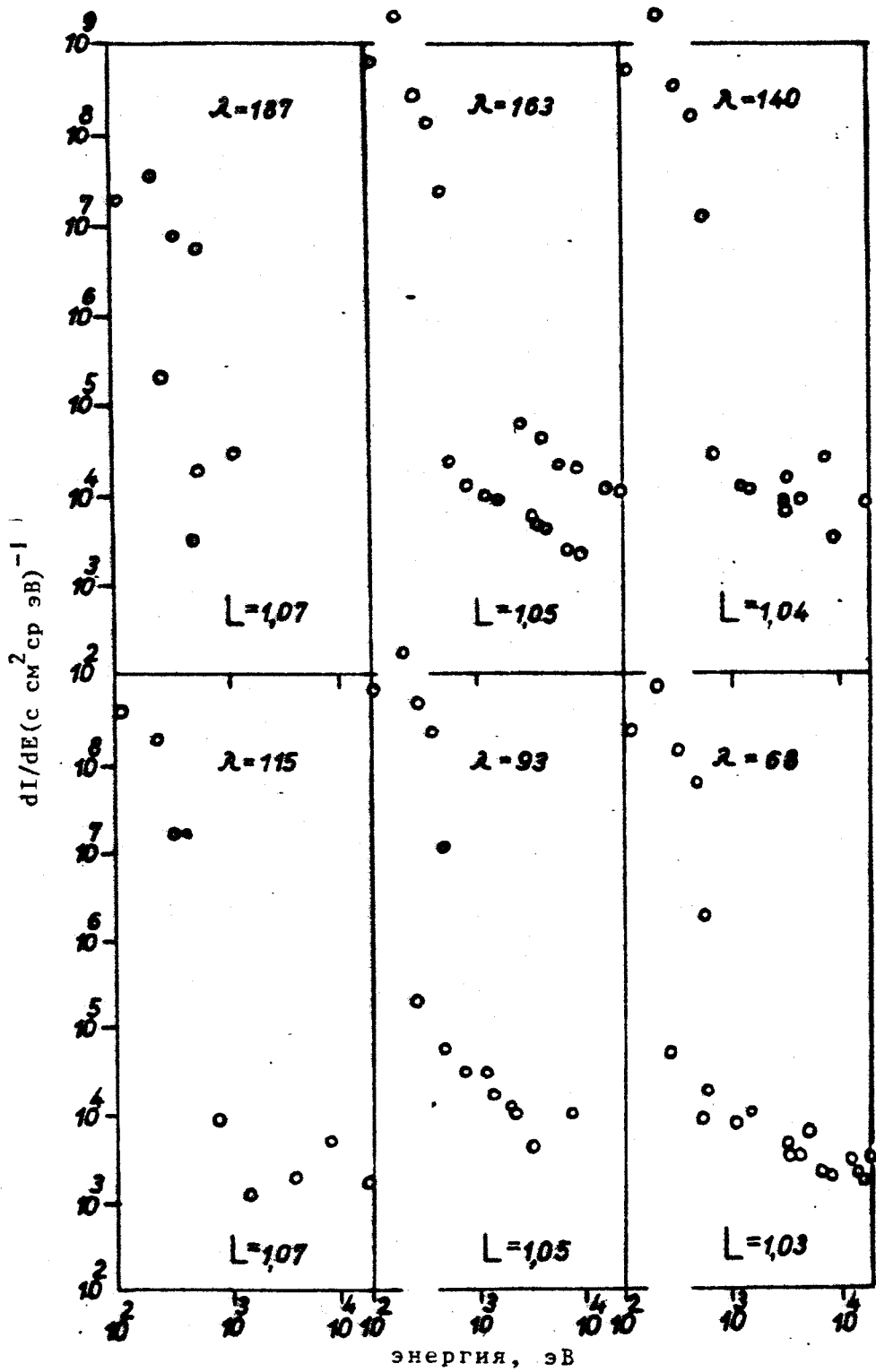


рис.8. Долготная зависимость приэкваториальных потоков электронов ($Kp=1$)

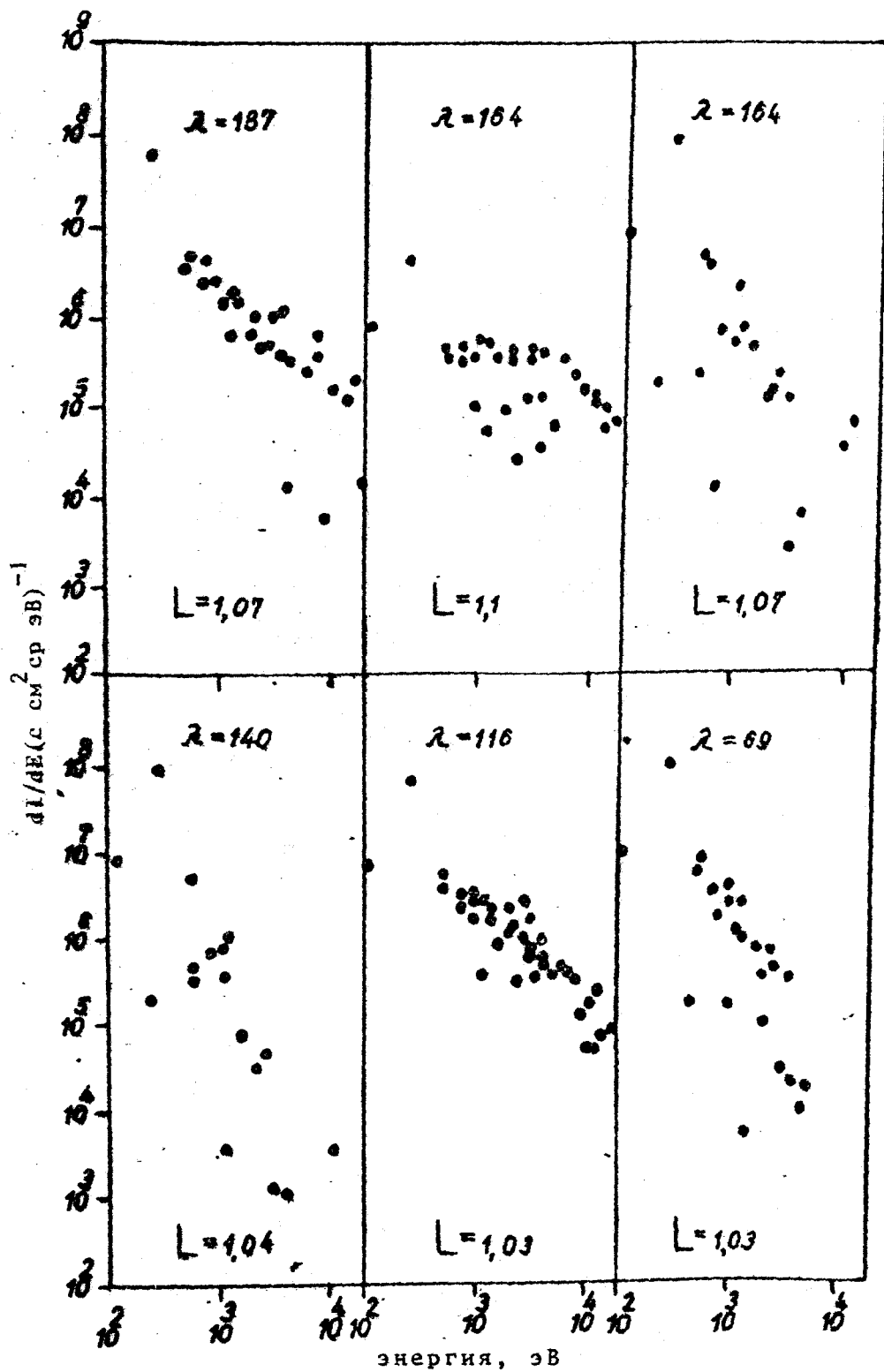


Рис.9. Долготная зависимость энергетических распределений приэкваториальных потоков ионов ($K_p=1$)

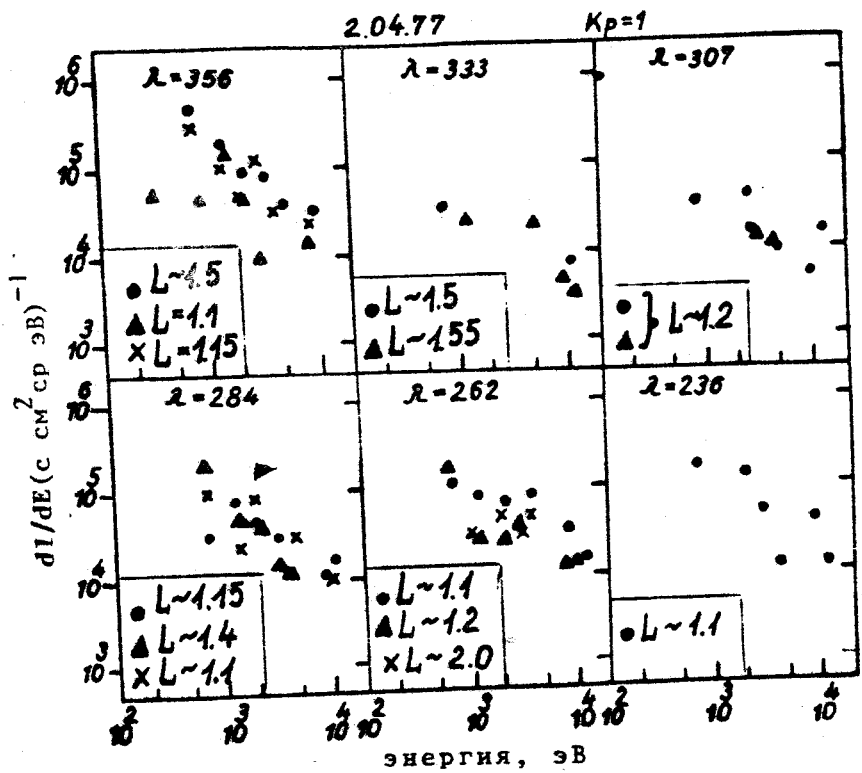


Рис.10. Энергетические распределения ночных ионосферных потоков (Kp=1)

Число наблюдений

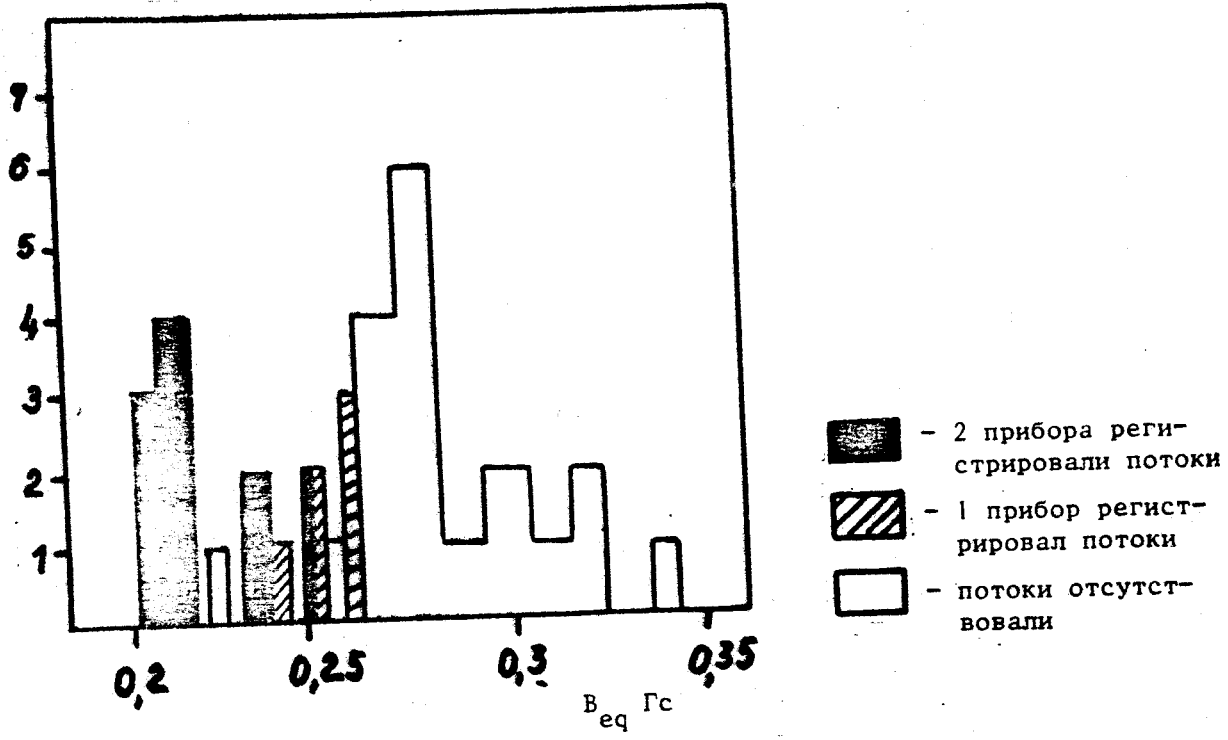


Рис.11. Наблюдения приэкваториальных потоков на спутнике "Космос-900" в зависимости от напряженности геомагнитного поля

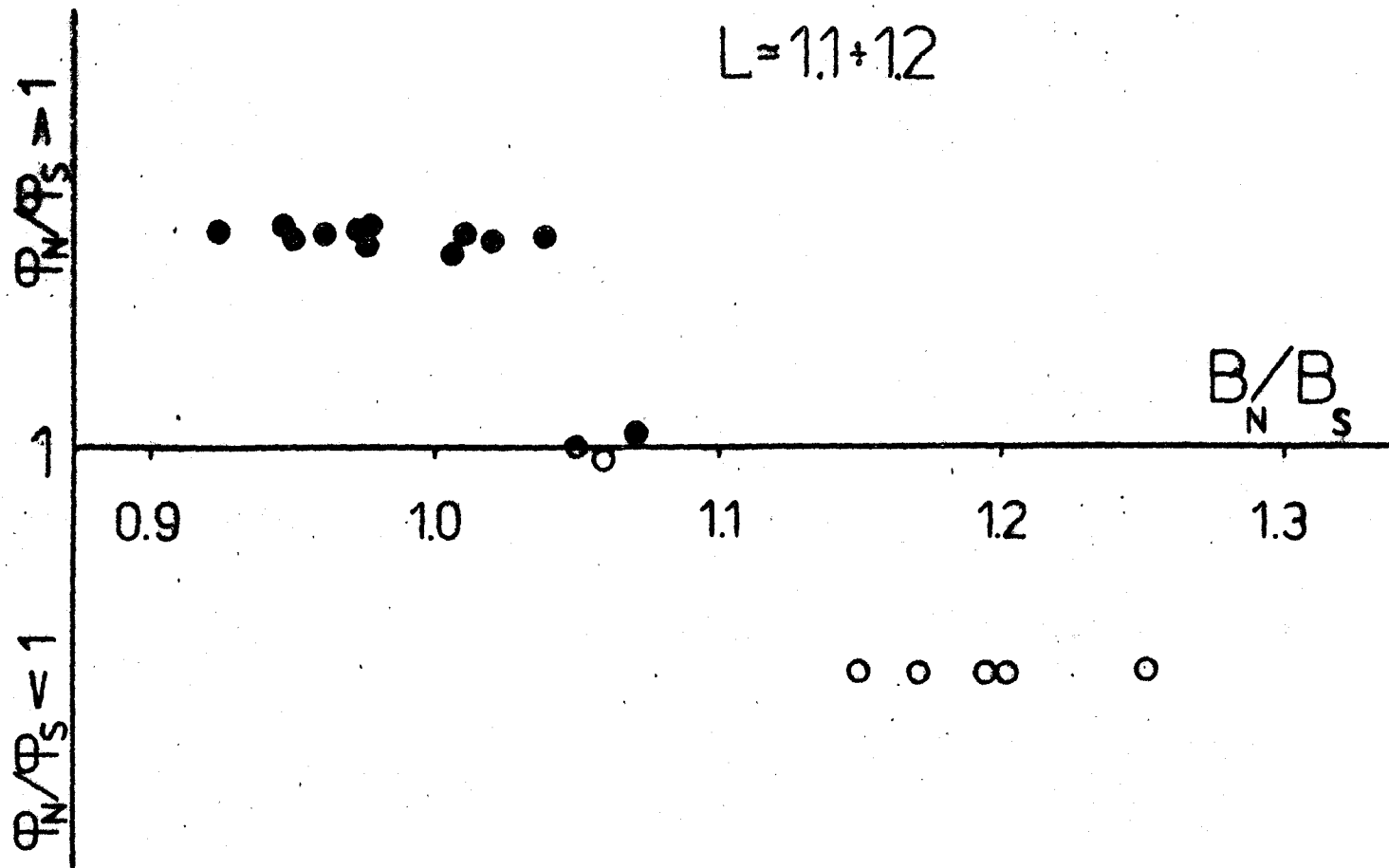
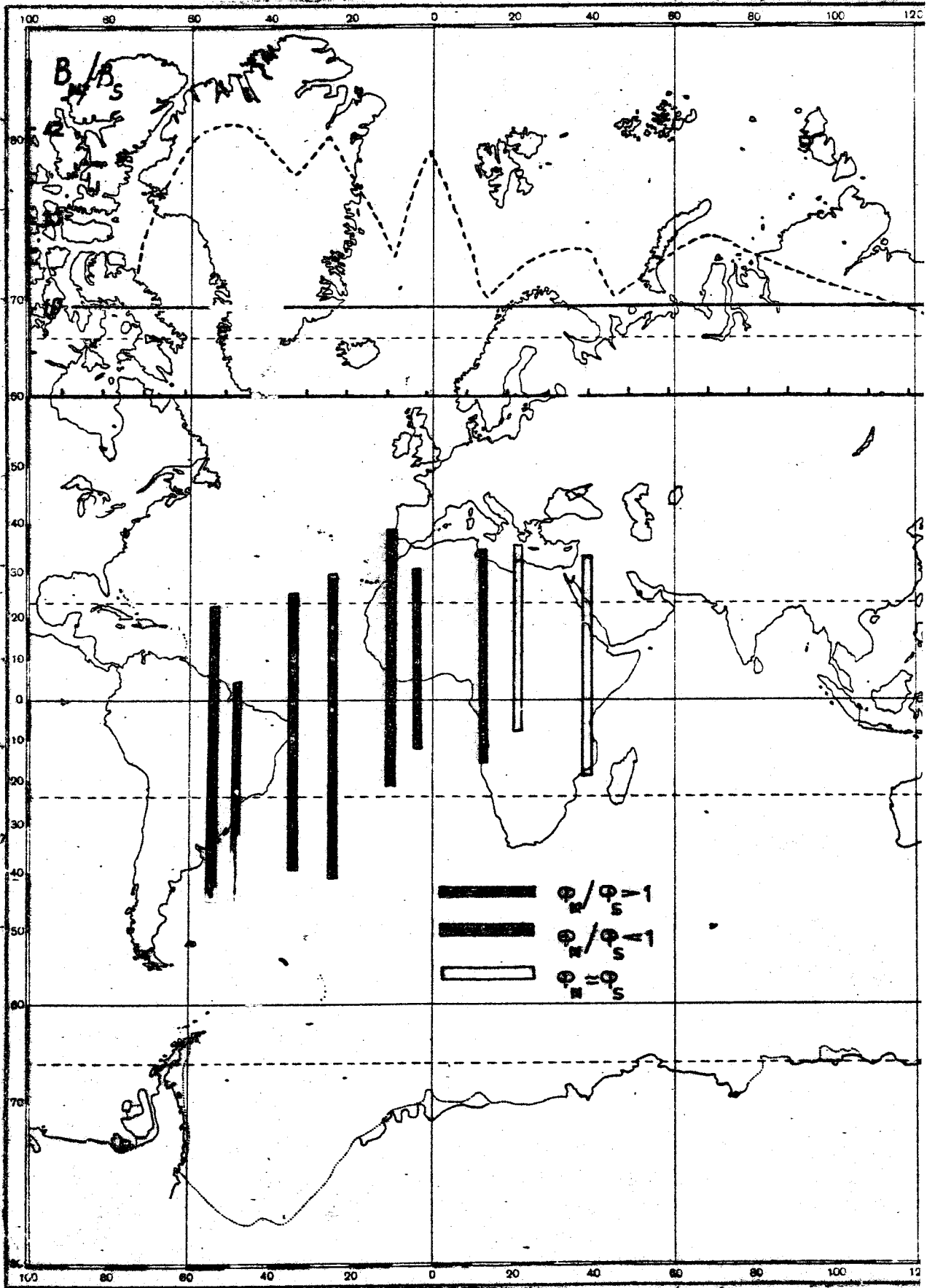
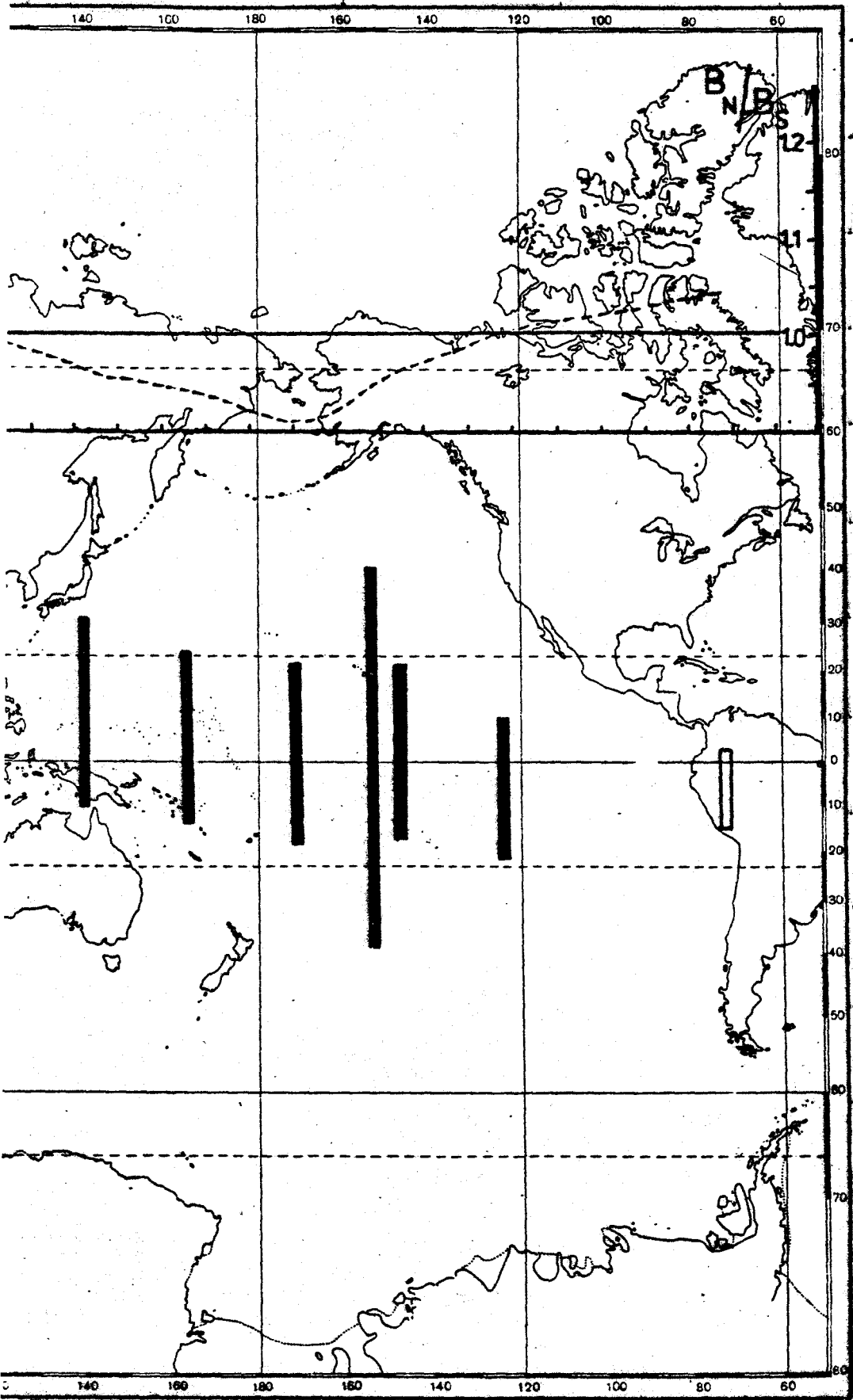


Рис. 12. Зависимость интенсивности потоков заряженных частиц вблизи экватора от напряженности геомагнитного поля





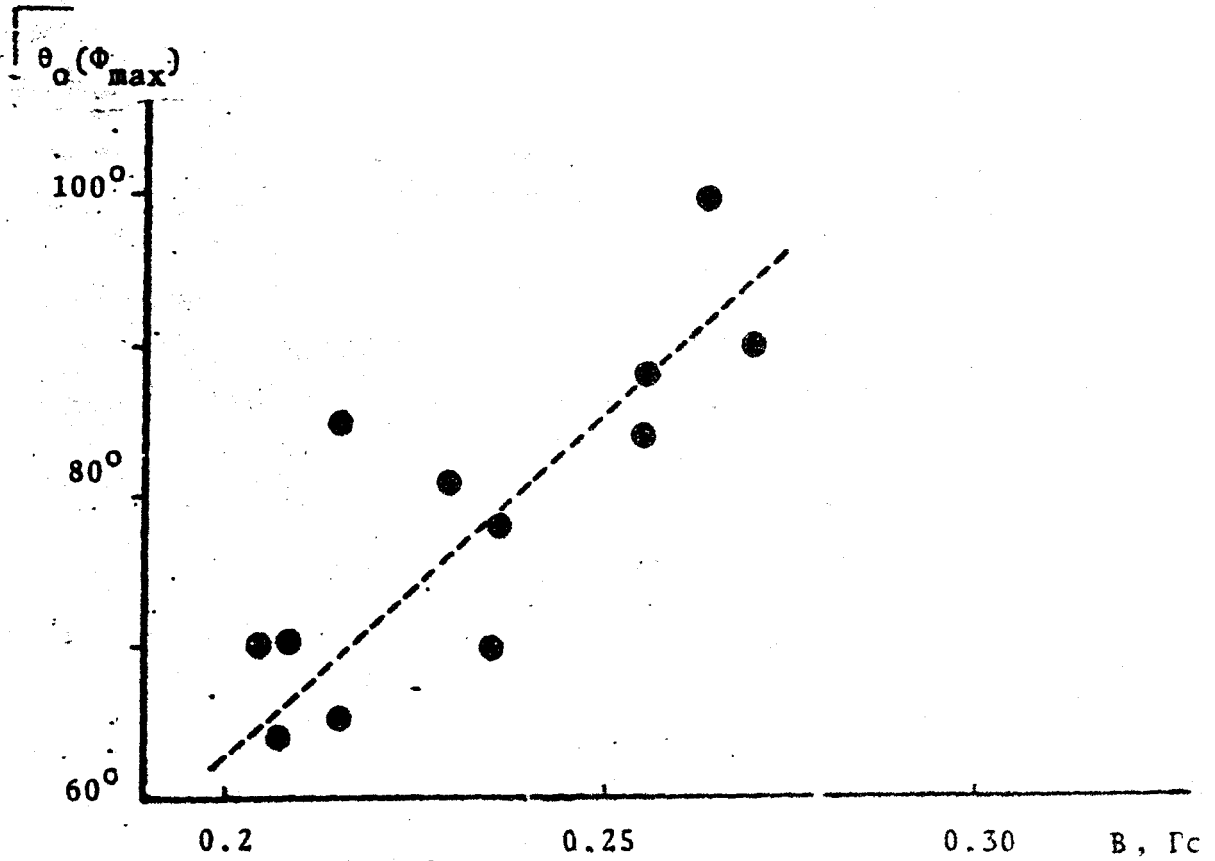


Рис. 14. Питч-угловая зависимость наибольших значений зарегистрированных приэкваториальных потоков

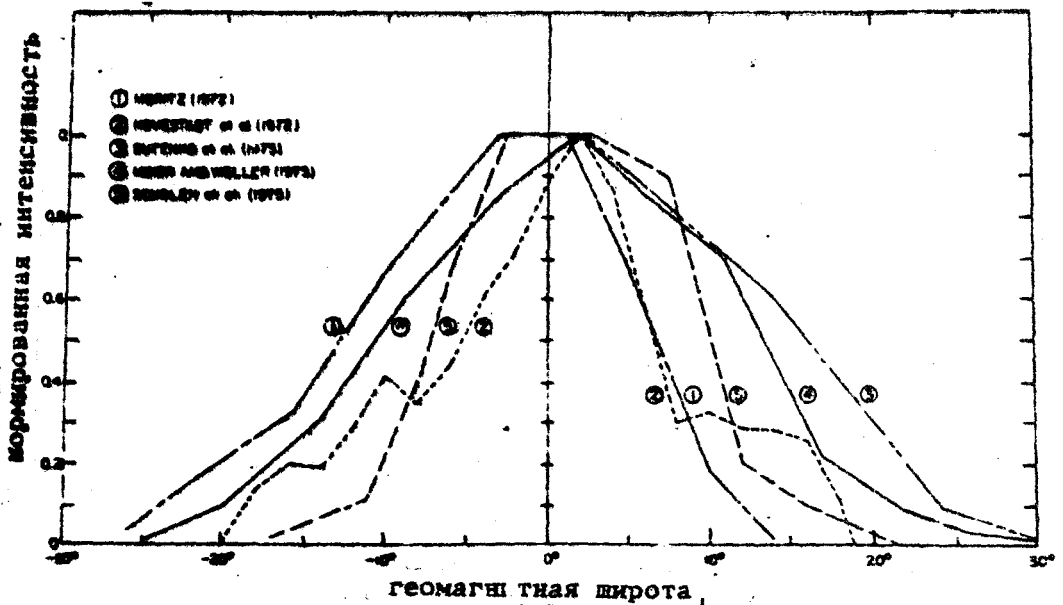


Рис. 15. Обобщенные данные о наблюдениях приэкваториальных потоков заряженных частиц