

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ АН ССР МОСКВА
ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СЛОВАЦКОЙ АКАДЕМИИ НАУК БРАТИСЛАВА

СБОРНИК

ТРУДОВ МЕЖДУНАРОДНОГО СИМПОЗИУМА ПО ФИЗИКЕ ИОНОСФЕРЫ И МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ И СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Том 2

РЕДАКТОРЫ

Г.Л. ГДАЛЕВИЧ (ИКИ АН СССР)

С. ПИНТЕР (ГИ САН)

ГУРВАНОВО, 1977 г.

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ АН СССР МОСКВА
ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СЛОВАЦКОЙ АКАДЕМИИ НАУК БРАТИСЛАВА

СБОРНИК

ТРУДОВ МЕЖДУНАРОДНОГО СИМПОЗИУМА
ПО ФИЗИКЕ ИОНОСФЕРЫ И МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ
И СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Том 2

РЕДАКТОРЫ

Г.Л. ГДАЛЕВИЧ (ИКИ АН СССР)

С. ПИНТЕР (ГФИ САН)

ГУРВАНОВО, 1977 г.

В.Д.Озеров

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЯМЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИОНОСФЕРНЫХ
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ИСЗ "ИНТЕРКОСМОС-8"

Для измерения концентрации положительных ионов на спутнике "Интеркосмос-8" были установлены две трехэлектродные сферические ионные ловушки с тормозящим напряжением на внешней сетке, пилообразно изменявшимся от +15,6 до -4,9 В. Коллекторные токи этих ловушек зачастую испытывали низкочастотные колебания, наложенные на монотонную составляющую. Форма хаотических колебаний тока была довольно разнообразной, но квазипериодические колебания, как правило, имели форму трохойд (укороченных циклоид-траекторий точек внутри круга, катящегося без скольжения по прямой линии). При этом были обнаружены различные зависимости амплитуды колебаний тока от величины тормозящего напряжения (см. фиг. 1-3).

При учете воздействия потока плазмы на ионный коллекторный ток J сферической ионной ловушки, движущейся в ионосфере со сверхзвуковой скоростью, можно в первом приближении пренебречь влиянием теплового движения ионов и считать скорость потока плазмы одинаковой для всех ионов, регистрируемых ловушкой:

$$J = \begin{cases} \alpha envS \left(1 - \frac{2e\varphi}{mv^2}\right) \geq 0 & \text{при } 0 \leq \varphi \leq \frac{mv^2}{2e} \\ 0 & \text{при } \varphi \geq \frac{mv^2}{2e} \end{cases}$$

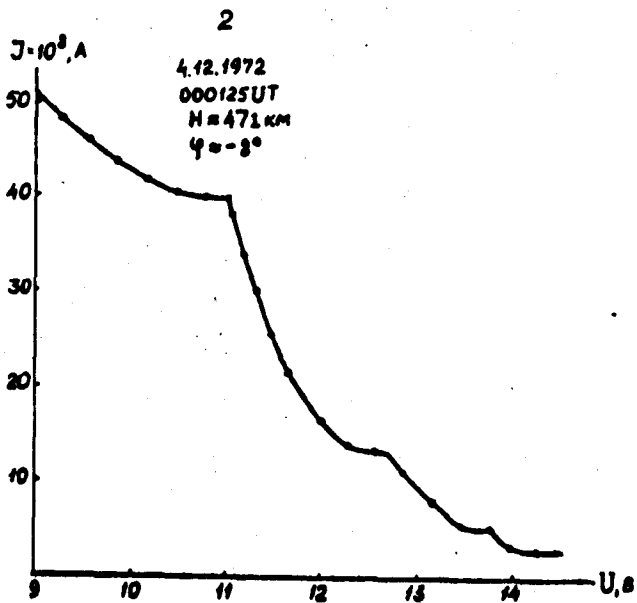
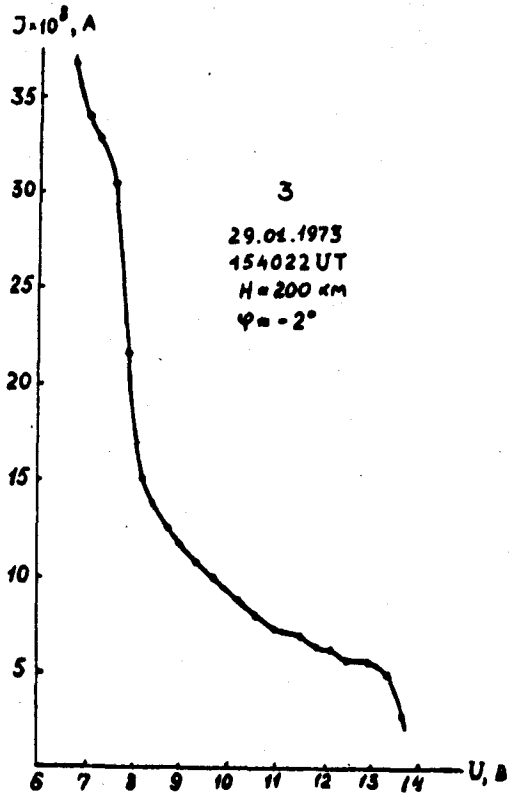
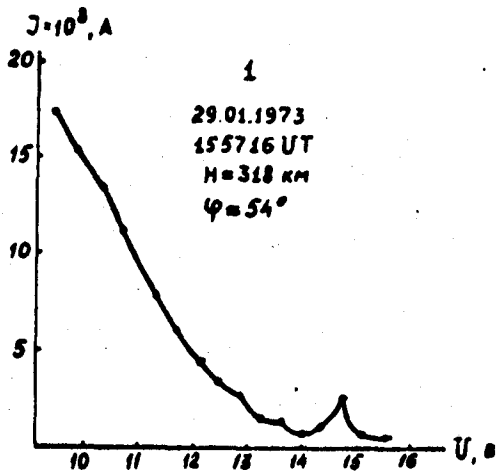
где α - коэффициент "прозрачности" системы сеток ловушки,

e - заряд электрона,

n и v - концентрация и скорость потока ионов относительно ловушки,

S - площадь поперечного сечения ловушки,

m - масса иона,



Фиг. I - 3

$\varphi = U + \varphi_k$ - потенциал внешней сетки ловушки (относительно плазмы),

U - напряжение на внешней сетке ловушки относительно корпуса спутника,

φ_k - потенциал корпуса спутника.

Если представить ток J в виде суммы двух составляющих - монотонно убывающей \bar{J} и немонотонной, колебательной, то колебания концентрации \tilde{n} , скорости потока плазмы \tilde{v} и потенциала спутника $\tilde{\varphi}_k$ должны привести к следующим зависимостям колебательной составляющей \tilde{J} тока J от тормозящего напряжения U :

$$\left. \begin{aligned} \tilde{J}(\tilde{\varphi}_k) &= -const_1 \cdot \tilde{\varphi}_k \\ \tilde{J}(\tilde{n}) &= const_2 \cdot (1 - const_3 \cdot U) \cdot \tilde{n} \\ \tilde{J}(\tilde{v}) &= -const_4 \cdot \left(const_5 \cdot \frac{\tilde{v}}{|\vec{v}_{cn} - \tilde{v}|} \cdot U - \left(1 - \frac{const_6}{|\vec{v}_{cn} - \tilde{v}|} \right) \cdot \tilde{v} \right) \end{aligned} \right| J = \bar{J} + \tilde{J} \geq 0$$

$(const_i > 0, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6),$

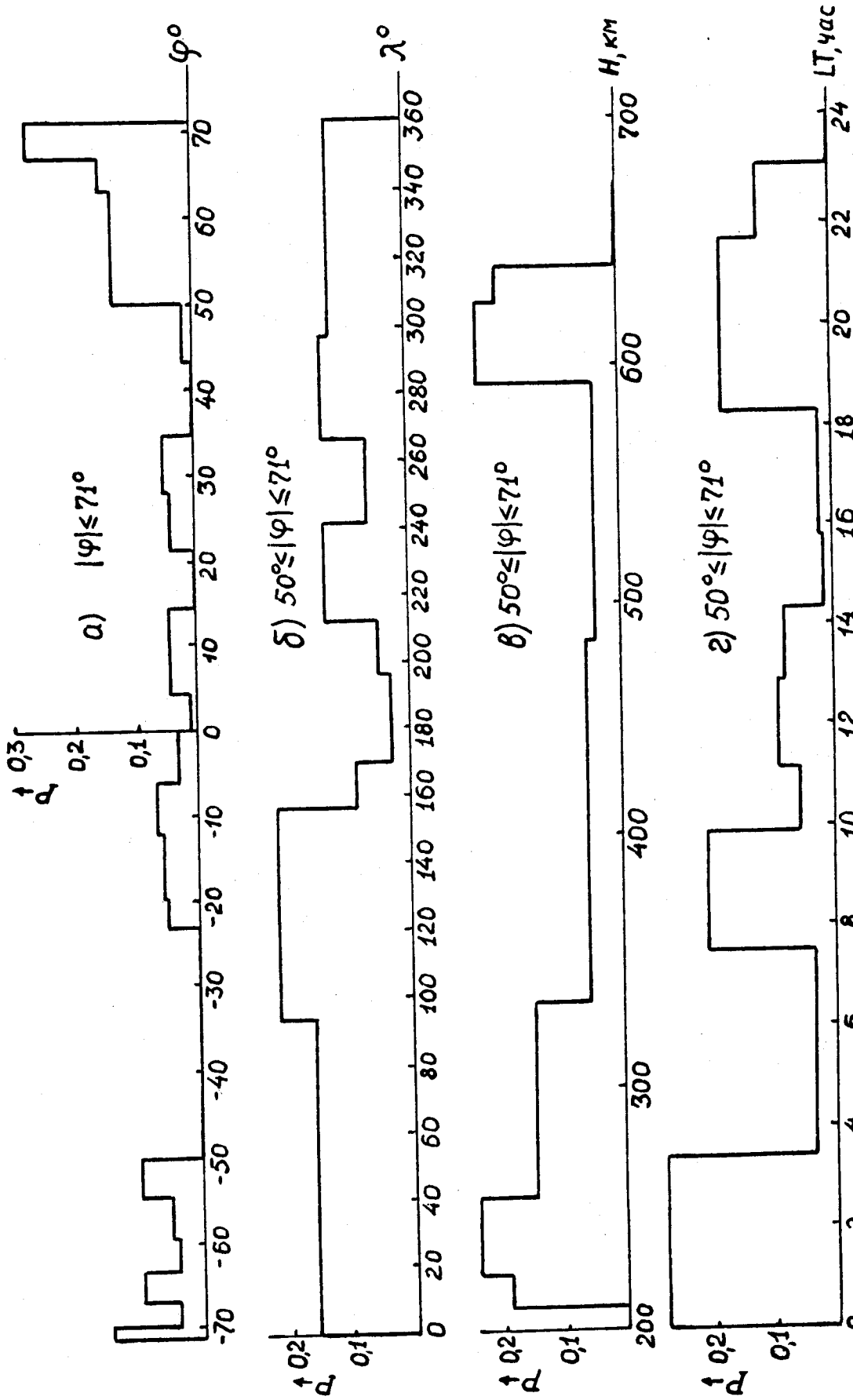
где \vec{v}_{cn} - вектор скорости спутника,
 \tilde{v} - вектор колебательной составляющей скорости потока ионов.

Отсюда видно, что колебания потенциала спутника создают колебания коллекторного тока постоянной амплитуды, колебания концентрации с ростом U приводят к постепенному падению амплитуды до нуля и лишь колебания скорости потока плазмы могут привести к нарастанию колебаний коллекторного тока с ростом тормозящего напряжения, причем очень малые колебания скорости, по сравнению со скоростью спутника, приводят к линейному нарастанию колебаний тока, а большие величины \tilde{v} вызывают ускоренный, нелинейный рост колебаний тока.

Обнаруженные колебания скорости потока плазмы соответствуют колебаниям самой плазмы в виде непосредственных колебательных движений ионов. По предварительным выводам, преобладающие колебания скорости потока чаще наблюдаются

в высокоширотных областях ионосферы. Видна также разница в протяженности неоднородностей, вычисляемой по длительности регистрации соответствующего участка вольт-амперной характеристики конной донутки: на малых широтах эта протяженность часто оказывается значительно больше, чем в высоких широтах. Одной из причин этого может быть широтная зависимость угла наклона орбиты спутника к вектору геомагнитного поля. Другая возможная причина - уменьшение длины волн колебаний плазмы с ростом широты.

Распределение относительной частоты появления неоднородностей ионосферной плазмы, представленных аномальными (возмущенными) характеристиками конных донутки спутника "Интеркосмос-8" (см., например, фиг.4) обладает максимумами (до 20-25%) широтной зависимости - в полярных и приэкваториальных областях, высотной зависимости - на высотах 200-250 км и 600-650 км и суточной зависимости - от ~0 до ~3 ч, от ~7 ч до ~10 ч и от ~18 ч до ~22 часов по местному времени. Кроме того, широтно-долготное распределение выявляет тенденцию к образованию максимумов в областях повышенных градиентов геомагнитного поля вблизи геомагнитных полюсов и мировых геомагнитных аномалий (Бразильской и Восточно-Сибирской). Как известно, высоты ~200 км и ~600 км, а также область экваториальной аномалии, характерны повышенными градиентами ионизации, зачастую пространственно немонотонными, а в утренние и вечерние часы максимальны горизонтальные градиенты температуры и концентрации ионосферной плазмы (вокруг солнечного терминатора). Совокупность этих особенностей распределения частоты появления ионосферных неоднородностей указывает на их связь с градиентами ионосферной плазмы и геомагнитного поля, что характерно для градиентно-дрейфовых колебаний магнитоактивной плазмы [1-3]. Повышение вероятности появления неоднородностей в направлении к высокоширотным областям и в полуденные часы может быть, кроме того, связано с усилением авроральных электронов и ростом неоднородной структуры плазмы. Аналогичный вывод был сделан также при интерпретации результатов



Фиг. 4. Р-относительная частота появления неоднородностей по данным ионных ловушек ИСЗ "Интеркосмос-8", φ - широта, λ - долгота, Н-высота, LT-местное время

исследований ионосферной плазмы при помощи сферической ионной ловушки с плавающим потенциалом внешней сетки, установленной на спутнике "Космос-378" [4,5]. С точки зрения волнового механизма образования неоднородностей получает объяснение и квазициклоидальная форма колебаний коллекторного тока ионной ловушки. Зависимость фазы w колебаний частиц, регистрируемых наблюдателем, от величины и направления смещения $\vec{\xi}$ этих частиц от положения равновесия в общем случае приводит к нелинейной зависимости этой фазы от времени, то есть к фазовой автомодуляции измеренных колебаний плотности потока частиц. Например, пусть колебания частиц заданы простой гармонической волной вида

$$\vec{\xi} = \vec{a} \cos w,$$

где $w = \omega t - \vec{k} \vec{x}$, ω и \vec{k} - частота и волновой вектор исходной волны, t - время, \vec{x} - векторная координата положения равновесия частиц, \vec{a} - амплитудное отклонение частиц от положения равновесия. В этом случае закон изменения фазы w колебаний регистрируемых частиц во времени имеет следующий вид [4]:

$$w - \vec{a} \vec{k} \cos w = \omega_0 t, \quad (I)$$

где $\omega_0 = \omega - \vec{k} \vec{V}_T$, \vec{V}_T - скорость движения ловушки. Как известно, колебательная скорость частиц

$$\vec{v} = \frac{\partial \vec{\xi}}{\partial t} = -\vec{a} \omega \sin w.$$

Рассматривая изменение объема колеблющейся плазмы при ее смещении от положения равновесия, можно получить следующую зависимость концентрации частиц от $\vec{\xi}$:

$$n = \frac{n_0}{1 + \text{div} \vec{\xi}} = \frac{n_0}{1 + \vec{a} \vec{k} \sin w} \quad (|\text{div} \vec{\xi}| < 1, |\vec{a} \vec{k}| < 1) \quad (2)$$

где n_0 - равновесная концентрация частиц. Отсюда плотность потока частиц \vec{j} равна

$$\vec{j} = n \cdot (\vec{v} - \vec{V}_T) = - \frac{n_0 (\vec{a} \omega \sin w + \vec{V}_T)}{1 + \vec{a} \vec{k} \sin w} \quad (3)$$

При $\vec{a}\vec{k} \neq 0$ это выражение можно записать иначе:

$$\vec{J} = \frac{n_0}{\omega_0} \left(\frac{\vec{a}\omega}{\vec{a}\vec{k}} - \vec{V}_T \right) \cdot \omega - \frac{\vec{a}\omega}{\vec{a}\vec{k}} n_0 \quad (3a)$$

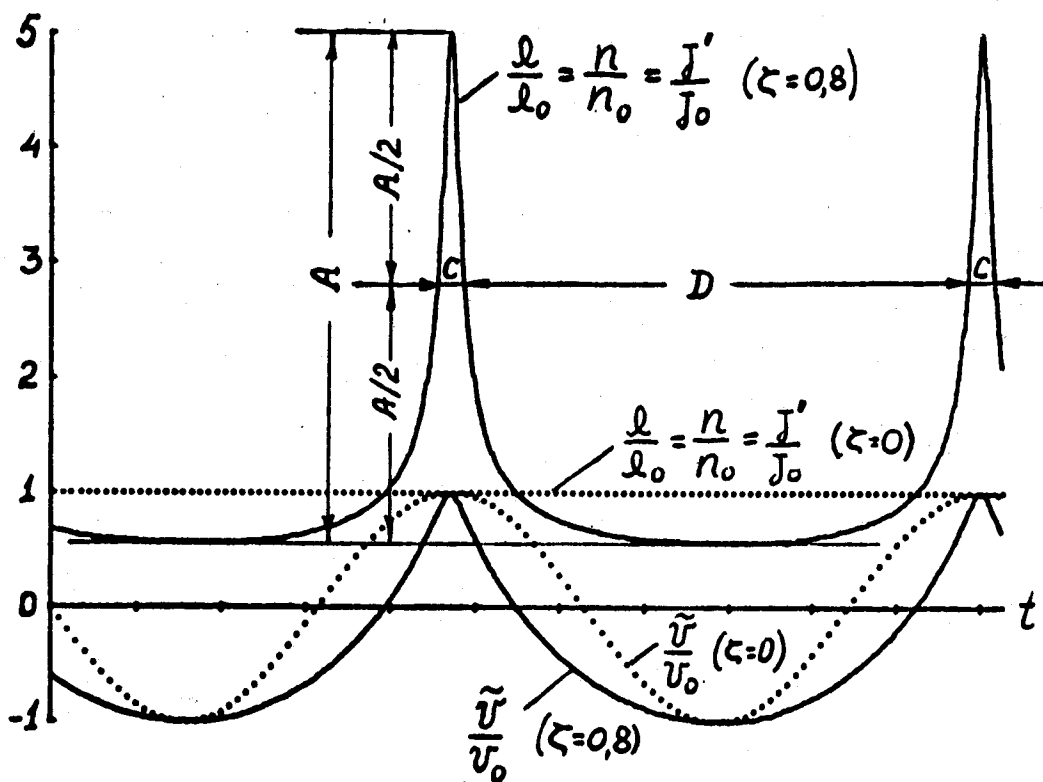
где $\omega = dw/dt = \frac{\omega_0}{1 + \vec{a}\vec{k} \sin w}$ - мгновенная частота.

Исходя из этого, на основе уравнения (I) можно изобразить изменение во времени основных параметров колеблющегося потока, регистрируемого наблюдателем: мгновенной частоты ω , концентрации n и скорости V частиц, а также плотности потока J - см. фиг.5, где $\zeta = \vec{a}\vec{k}$,

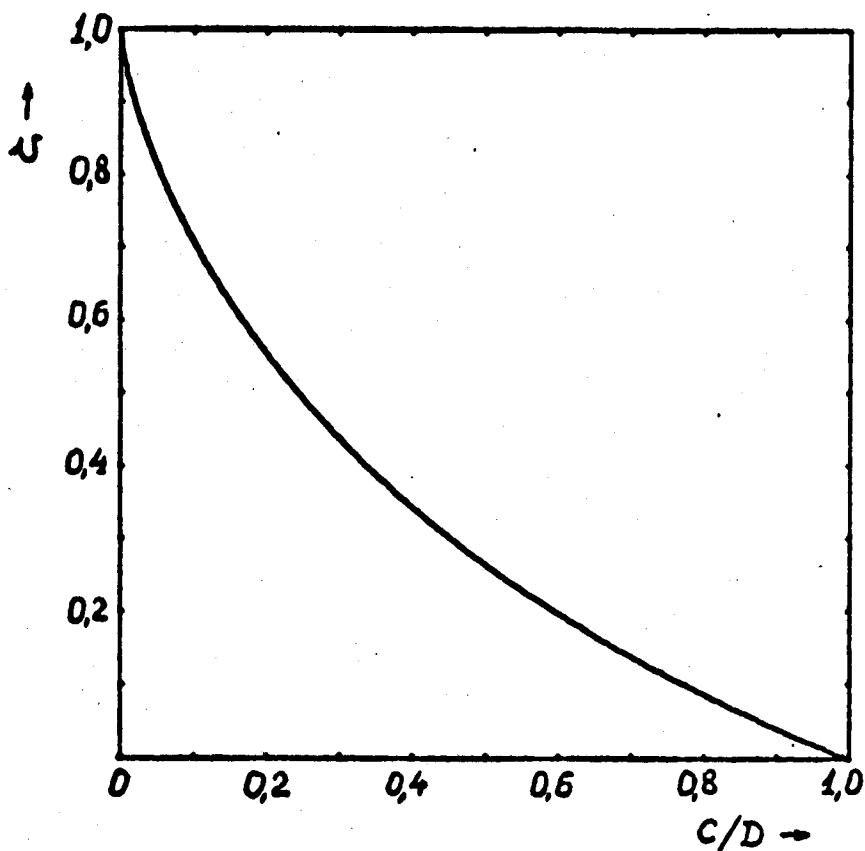
$$\frac{V}{V_0} = \frac{-a\omega \sin w}{a\omega} = -\sin w, \quad \frac{J'}{J_0} = \left| \vec{J} + \frac{\vec{a}\omega}{\zeta} n_0 \right| / \left(\left| \frac{\vec{a}\omega}{\zeta} - \vec{V}_T \right| n_0 \right) = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{n}{n_0} = \frac{1}{1 + \zeta \sin w}$$

Совместное рассмотрение выражений (I-4) приводит к выводу, что при малых величинах $|\zeta| \neq 0$ зависимости $\omega(t)$, $J(t)$ и $n(t)$ описываются законом тригонометрии, а при больших - несколько более сложной кривой (показанной на фиг.5), которую можно назвать акустоидой (в виду её связи с акустикой и близости по форме к циклоидам).

Наблюдавшиеся колебания коллекторного тока очень похожи на расчетную временную зависимость плотности потока. Это является указанием на то, что причиной колебаний коллекторного тока, по-видимому, были колебания ионосферной плазмы типа волн сжатия-разрежения. Такой же вывод был сделан относительно колебаний коллекторного тока сферических ионных ловушек с тормозящим полем, установленных на Третьем ИСЗ [6]. В этом опыте, как и на спутнике "Космос-378", колебания коллекторного тока имели совершенно аналогичную квазициклоидальную форму. Кроме того, в ходе одновременной работы двух ловушек, расположенных на противоположных сторонах корпуса спутника, неоднократно отмечались случаи колебаний с несовпадающими фазами. Это объясняется наличием некоторого угла между вектором скорости спутника и направлением колебаний ионов. В результате мгновенная полная скорость потока ионов относительно каждой из ловушек испытывает колебания не только по величине, но и по направлению. При этом, вследствие попеременного частичного затенения



Фиг. 5



Фиг. 6

ловушек корпусом спутника, колебания их коллекторных токов оказываются взаимно сдвинутыми по фазе. Это является несомненным признаком колебаний скорости потока ионов, иначе говоря — непосредственных колебательных движений ионосферной плазмы. Наиболее низкочастотные колебания (с частотами $\sim 0,2$ Гц и менее) обнаруживались в виде квазипериодических немонотонных изменений кинетической энергии ионного потока, измеряемой длиной проекции линейного участка вольт-амперной характеристики ловушки на ось тормозящих напряжений [6].

На основе допущения о гармоническом законе колебаний частиц, используя указанную выше особенность формы колебаний плотности потока, можно выработать способ оценки величины ζ и, следовательно, глубины колебаний концентрации n .

Назовем "высокочастотным" и "низкочастотным" импульсы колебаний J , вершины которых соответствуют максимальной и минимальной частотам ω , а основания — минимальной и максимальной частотам Ω , соответственно. На основании (3), выразим значения фаз $W = W_{cp}$, при которых J имеет значение $J = J_{cp}$, равное среднему арифметическому ее экстремумов:

$$J_{cp} = - \frac{n_0 (\bar{a}\omega \sin W_{cp} + \bar{V}_T)}{1 + \zeta \sin W_{cp}} = \frac{n_0 (\bar{a}\omega \zeta - \bar{V}_T)}{1 - \zeta^2}$$

Отсюда

$$W_{cp} = \arcsin(-\zeta).$$

Уравнение (I) в данном случае преобразуется так:

$$W_{cp} \pm \zeta |\sqrt{1 - \zeta^2}| = \Omega_0 t_{cp} = Z_{cp}.$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Отсюда } W_{cp} - Z_{cp} &= +\zeta |\sqrt{1 - \zeta^2}| \text{ при } \frac{\pi}{2} + 2\pi q \geq W_{cp} \geq -\frac{\pi}{2} + 2\pi q \\ W_{cp} - Z_{cp} &= -\zeta |\sqrt{1 - \zeta^2}| \text{ при } \frac{\pi}{2} + 2\pi q \leq W_{cp} \leq \frac{3}{2}\pi + 2\pi q \end{aligned} \right\}$$

$(q = 0, 1, 2, \dots)$.

На протяжении одного периода колебаний J величины W_{cp} и Z_{cp} имеют по три значения, причем разности между соседними значениями Z_{cp} , $\Delta_1 Z$ и $\Delta_2 Z$ соответствуют величинам полуширины "низкочастотного" и "высокочастотного"

импульсов:

$$\Delta_1 z = \pi + 2(\arcsin \zeta + \zeta \sqrt{1 - \zeta^2}),$$
$$\Delta_2 z = \pi - 2(\arcsin \zeta + \zeta \sqrt{1 - \zeta^2}).$$

В случае линейных масштабов графика $J(t)$ длины отрезков C и D , равных ширине "высокочастотного" и "низкочастотного" импульсов на уровне среднеарифметической величины $J = J_{cp}$ (см. фиг.5) пропорциональны указанным разностям фаз:

$$\frac{\pi - 2(\arcsin \zeta + \zeta \sqrt{1 - \zeta^2})}{\pi + 2(\arcsin \zeta + \zeta \sqrt{1 - \zeta^2})} = \frac{C}{D}$$

Отсюда

$$\arcsin \zeta + \zeta \sqrt{1 - \zeta^2} = \frac{\pi}{2} \frac{1 - C/D}{1 + C/D}$$

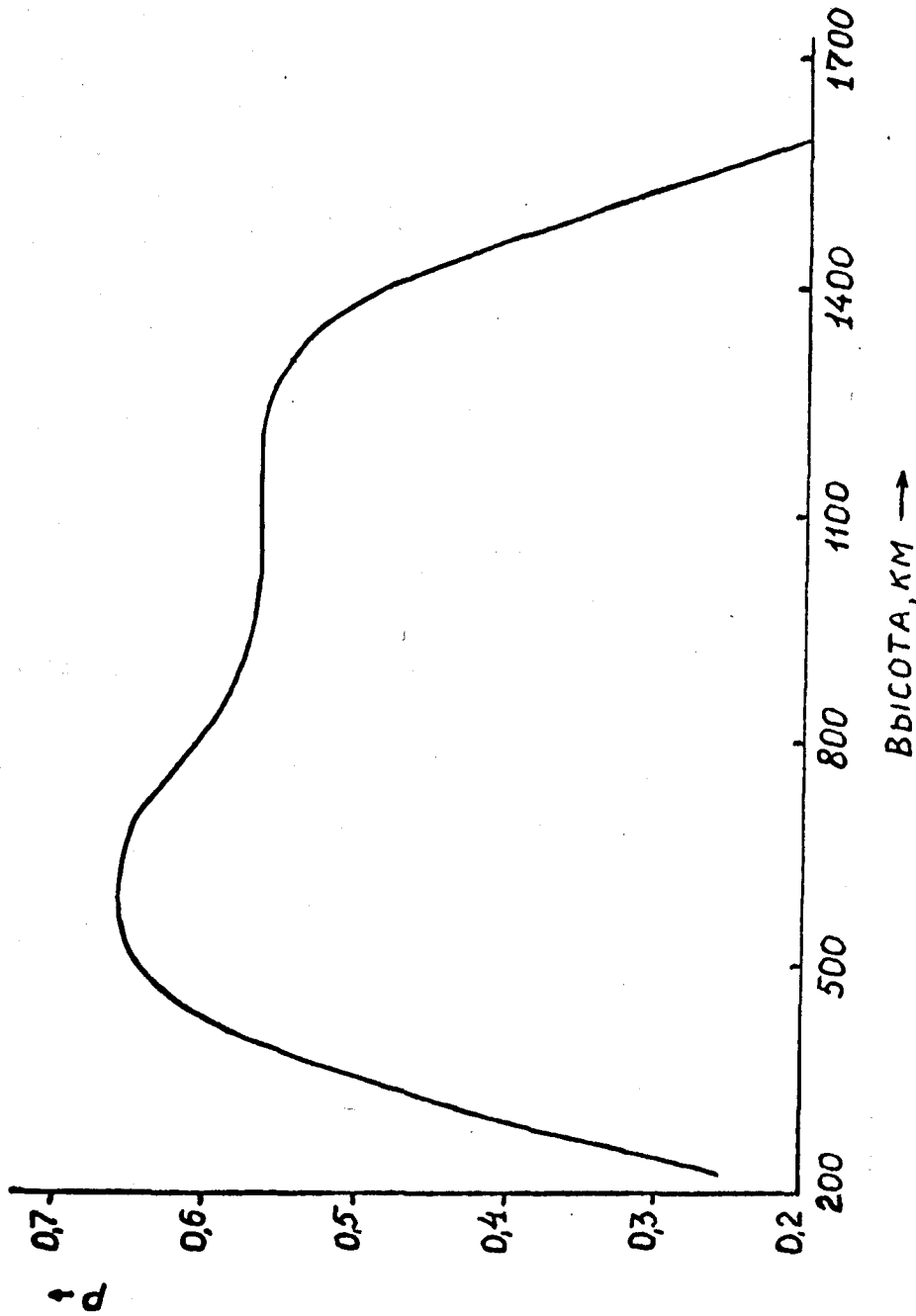
График этой функции $\zeta(C/D)$ изображен на фиг.6. Применение такого способа оценки ζ к колебаниям коллекторного тока ионной ловушки приводит к величинам ζ , достигающим до $\sim 0,2-0,3$, что соответствует $\sim 20-30\%$ -ным колебаниям концентрации.

Наблюдаемые на спутнике частоты колебаний могут испытывать доплерово смещение, равное $\delta f = \pm |\vec{v}_r|/2\pi$, которое может составить несколько десятков Гц и более. Экспериментально наблюдавшиеся колебания имели частоты от долей герца до нескольких десятков Гц.

Рассмотрим некоторые литературные сведения о неоднородностях и низкочастотных колебаниях в околоземной плазме. В работе [7] описано обнаружение на спутнике "ЭСРО-1А" ленгмюровским зондом переменного тока длинноволновой (~ 1000 км) волнообразной структуры во внешней ионосфере между $\pm 60^\circ$ широты в утреннем и вечернем секторах местного времени. Обсуждается связь этой структуры с атмосферными гравитационными волнами, возможно, обусловленная а) сверхзвуковым движением терминатора, б) экваториальным электроджетом или в) энергией, запасенной в авроральных областях во время магнитных возмущений. Как признают авторы [7], из этих трех механизмов только движение терминатора соответствует наблюдаемой восходно-заходной локализации возмущений. Согласно

но предположению Бира [8], движение солнечного терминатора порождает атмосферные гравитационные волны. Пестулируя последующее появление в нижней ионосфере магнитогидродинамических волн и перенос их на большие высоты, авторы [7], однако, нашли недостатки этого объяснения, например, в том, что полоса возникновения осцилляций центрирована на терминаторе, тогда как, согласно модели Бира, утверждается, что она должна перемещаться позади терминатора. Между тем, концепция градиентно-дрейфовых волн как раз и предполагает центрирование осцилляций в месте с наибольшими градиентами электронной температуры, т.е. на терминаторе (согласно [9], температурный градиент дает на порядок больший инкремент неустойчивости, по сравнению с другими градиентами). Кроме того, как признают авторы [7], с точки зрения атмосферных гравитационных волн нельзя объяснить связь наблюдаемых явлений с магнитной активностью. В то же время связь градиентно-дрейфовых волн с магнитной активностью вполне понятна, так как магнитоактивная плазма является одним из необходимых условий существования градиентно-дрейфовых волн [1,2]. Наконец, градиентно-дрейфовые волны не нуждаются в переносе их из других областей ионосферы, так как возможность их возбуждения не ограничивается малыми ионосферными высотами (ср. [10], где описано обнаружение на расстояниях от Земли $\sim 6,6R_E$ дрейфовых волн, вызванных градиентами концентрации и температуры плазмы).

В работе [11] предложено объяснить обнаружение неоднородностей при помощи ионных ловушек спутника "Интеркосмос-2" на высоте ~ 1000 км переносом неоднородных электрических полей с высот $\sim 500-600$ км. Однако, согласно данным сферической ионной ловушки с плавающим потенциалом внешней сетки, установленной на спутнике "Космос-378", высотная зависимость частоты появления неоднородностей имеет главный максимум на высотах ≥ 500 км и дополнительный максимум на высоте ~ 1000 км (см. фиг. 7). Это указывает на то, что на высотах ~ 1000 км, по-видимому, имеется самостоятельный источник неоднородностей, скорее всего - градиентно-дрейфо-



Фиг. 7. Р- сглаженная относительная частота появления ионосферных неоднородностей по данным ионной ловушки ИСЗ "Космос-378".

ные волны, вызванные градиентом средней скорости ионов, обусловленным градиентом средней массы ионов в переходной области от кислородной ионосферы к водородной (ср. [12,13]). Измерения ионной концентрации при помощи плоской ионной ловушки и одновременные измерения интегрального потока мягких электронов на ИСЗ "Космос-348" [14] показали, что в ночной высокоширотной ионосфере при величинах потоков вторгающихся электронов с энергиями $E = 0,03-5$ кэВ, превышающих критическое значение для токовой неустойчивости, в отличие от случаев малых потоков, практически всегда в области высыпаний наблюдаются значительные неоднородности. Вместе с тем, отмечается, что связь между появлением ионосферных неоднородностей в верхней части F-слоя и высыпавшимися потоками электронов не всегда очевидна и наряду с нагревом и ионизацией атмосферы высыпавшимися частицами, ответственными за образование неоднородностей, должны существовать и иные источники генерации неоднородностей (например, электростатические колебания плазмы, различные неустойчивости и т.п.).

В работе [15] описано исследование неоднородностей при помощи зонда полного тока на спутнике "ЭСРО-4". Обнаружены неоднородности глубиной 5% и более от плотности окружающей среды. В дневные часы наиболее существенна высокоширотная зона неоднородностей, а в ночные часы выделяется субавроральная зона, а также появляются значительные среднеширотные неоднородности на малых высотах. Из причин возникновения неоднородностей основной считается высыпание мягких электронов, а вне областей высыпания в ночные часы, как и в работе [7], — атмосферные гравитационные волны. В статье [16], по данным ленгмюровского зонда на спутнике "Алуэтт-2", глубина колебаний концентрации оценивается в пределах от 5 до 70%, тогда как данные цилиндрических электростатических зондов спутника "Эксплорер-32" [17] указывают на 10-30%-ные колебания концентрации. По измерениям на спутнике "Космос-381", колебания концентрации в мелких неоднородностях (размером до 50 км) достигали ~35%, а в крупных (≥ 300 км) — ~45% [18]. Измерения при помощи сферических ионных лову

шек на Третьем советском спутнике показали, что колебания концентрации в неоднородностях на высоте $H \sim 230$ км достигают примерно 25% [19]. По данным плоской ионной ловушки на спутнике "ОГО-6" [20], обнаружена среднеширотная граница колебаний коллекторного тока, расположенная на инвариантной широте $\Lambda \sim 58^\circ$, обусловленная, по-видимому, особенностями распределения магнитосопреженных потоков фотоэлектронов. В то же время появление высокоширотных неоднородностей приписывается авроральным электронам. Примечательна ситуация в среднеширотном провале. Согласно работе [20], в этой области наблюдается минимум амплитуды неоднородностей $\Delta n/n$. Однако, согласно фиг. 2 [20], изображающей экспериментальные результаты, на основании которых в [20] сделано это заключение, минимум $\Delta n/n$ относится только к центру провала, где горизонтальный градиент концентрации минимален, в отличие от краев, где большими горизонтальными градиентами концентрации сопутствуют значительные - глубиной до 20% - неоднородности концентрации. В области экватора обнаружены неоднородности с большой амплитудой колебаний n (согласно фиг. 3 [20] - несколько десятков процентов), что также можно объяснить горизонтальными градиентами концентрации, присущими экваториальной аномалии [21]. Вместе с тем, авторы [20], как и авторы многих других работ по неоднородностям, при вычислении глубины колебаний концентрации не учитывают возможных колебаний скорости ионов, хотя увеличение амплитуды колебаний коллекторного тока с ростом тормозящего напряжения на ряде образцов вольтамперных характеристик ловушки на "ОГО - 6" (см. фиг. 7 [20]) указывает на их присутствие. На тех же образцах вольтамперных характеристик (фиг. 6 [20]) более или менее четко видны колебания квазициклоидальной формы. Результаты измерений электронной концентрации методом высокочастотного импедансного тока на спутнике "Космос - 381" (см. работу [22] - рис. I, б) дают образец очень четких почти периодических квазициклоидальных колебаний электронной концентрации. Колебания электрического поля, измеренные двойным зондом на ракетах, зачастую также имеют отчетливо выражен-

ную квазициклоидальную форму ([23] - фиг. 6, 7, 12). Радарные измерения указывают на повышенные турбулентные скорости плазмы в области экваториального F- рассеяния [24].

По-видимому, с градиентно-дрейфовыми неустойчивостями связаны неоднородности и волны в полярных каспах [25-27]. Например, в работе [27] показано, что во время умеренных магнитосферных возмущений наиболее интенсивные волны и токи были обнаружены близ резких границ плотности электронов полярного каспа. Выдвигается гипотеза и о другом возможном источнике флуктуаций в каспе - неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, порожденной на границах каспа широм (сдвигом) скоростей в ионном потоке [28, 29]. Однако, сравнивая свойства наблюдаемых флуктуаций в каспе с признаками неустойчивостей, вызванных градиентом плотности и широм ионных скоростей, и найдя, что результат этого сравнения свидетельствует против градиентной неустойчивости, авторы [28, 29] совершенно не касаются вопроса о роли зарегистрированных в работах [25, 30] исключительно больших градиентов температуры в области каспа и особенно на его границах.

Согласно [9], среди факторов возбуждения градиентно-дрейфовой неустойчивости градиент температуры является наиболее эффективным, так как нарушает равновесную, максвелловскую функцию распределения электронов по скоростям. Это непосредственно подтверждается работой [25], где найдено, что на границе каспа функции распределения электронов существенно немаксвелловские. Расчеты на основе теоретической работы Б.Б. Кадомцева [31] подтверждают способность температурно-градиентной дрейфовой неустойчивости породить неоднородности на экваториальном крае плазменного провала [32].

Характеристики частотного спектра неоднородностей, наблюдавшихся на "ОЮ-6" при помощи ловушки с тормозящим полем, дали основание предположить, что неоднородности размером от 70 м до 7 км являются результатом турбулентной диссипации неоднородностей большого размера. На экваторе большие неоднородности, возможно, образуются под влиянием кон-

вективных электрических полей, тогда как на высоких широтах дополнительным, а может быть и основным, фактором образования больших неоднородностей являются высыпавшиеся частицы [33] .

В полярных областях обнаружены большие горизонтальные градиенты концентрации [34] , которые могут быть вызваны высыпанием частиц [35] .

Большие (размером до 3000 км) волнообразные неоднородности распределения ионизации по широте на высоте ~1000 км наблюдались во время главной фазы магнитной бури с внезапным началом 14.12.1970; предполагается, что такие образования могут быть обусловлены локальной структурой ветра нейтральной атмосферы во время бури [36] . Кроме того, на высотах ~1000 км, как уже было сказано выше, может оказаться существенной градиентная неустойчивость, вызванная градиентом средней массы ионов.

Экваториальная граница высокоширотных неоднородностей ближе всего к полюсу в местную полночь в южном полушарии [37, 38] , а суточные вариации ее положения составляют от 10° [38] до 16° [37] инвариантной широты. Полярная граница не существует [37] . При увеличении геомагнитной активности граница смещается к югу [37, 38] . Это объясняется перемещением областей высыпания в экватору во время магнитных возмущений и согласуется с результатами оптических, вистлеровых и спутниковых исследований [37] . Между прямыми измерениями положения границы неоднородностей и высыпания электронов с энергией $E < 300$ эв, уширения слоя F и положений провала и плазмопаузы на ночной стороне обнаружено хорошее согласие, отсутствующее при измерениях на дневной стороне. Однако, если положение границы неоднородностей совпадает (по широте) с положениями провала и плазмопаузы только ночью [37, 38] , то с границей радиосцинтилляций, по различным данным, она совпадает либо преимущественно днем [38] , либо только ночью и рано утром [37] . Возможно, связь границы неоднородностей с плазмопаузой объясняется тем, что, согласно некоторым теоретическим выводам, именно в ночной плазмопаузе проявляются

свойства электростатических ударных волн с осцилляторной структурой за фронтом [39]. Кроме того, из-за большого градиента концентрации в плазмплаузе может развиваться универсальная (градиентно-дрейфовая) неустойчивость плазмы [40].

Краткие выводы:

1. Ряд особенностей формы и характера изменений флуктуаций коллекторного тока ионных ловушек на Третьем советском спутнике "Космос-378" и "Интеркосмос-8" указывает в качестве наиболее вероятной причины этих флуктуаций колебания плазмы в волнах скатия, приводящих к образованию неоднородной структуры ионосферной плазмы. Пространственно-временное распределение частоты появления этих неоднородностей обнаруживает максимумы, совпадающие с местами расположения повышенных градиентов ряда геофизических параметров — концентрации и температуры плазмы, средней массы ионов, напряженности геомагнитного поля, а также с областями усиленного высвечения мягких электронов.

2. Связь с градиентами указывает на наиболее вероятную природу обнаруженных колебаний плазмы — градиентно-дрейфовые волны.

3. Квазициклоидальная форма колебаний коллекторного тока, обусловленная фазовой автомодуляцией колебаний концентрации и скорости потока частиц в волнах скатия, на основе допущения о гармоническом законе колебаний частиц, позволяет вычислить амплитуду колебаний концентрации, независимо от амплитуды колебаний скорости потока.

4. Выдвигаемая в ряде литературных источников гипотеза об атмосферных гравитационных волнах как причине ионосферных неоднородностей на больших высотах представляется неудачной, так как целый ряд данных свидетельствует против нее, в пользу градиентно-дрейфовых волн.

5. Различные наблюдения неоднородностей в ионосферном провале ионизации, экваториальной аномалии, полярном каспе и других областях плазменной оболочки Земли во многих случаях прямо или косвенно указывают на связь неоднородной структуры околоземной плазмы с градиентно-дрейфовыми неустой-

чивостями или высыпаниями заряженных частиц, а также обнаруживают признаки фазовой автомодуляции колебаний концентрации заряженных частиц.

Автор глубоко признателен создателям электронной аппаратуры ионных ловушек спутника "Интеркосмос-8" С. Чапкынову, М. Петруновой, Т. Ивановой и их сотрудникам (Болгарская Академия наук) и разработчикам датчиков Г.И. Волкову, Л.И. Денщиковой, В.Ф. Копылову и А.П. Беляшину и весьма благодарен К.И. Грингаузу и Г.Л. Гдалевичу за полезную дискуссию и внимание к этой работе.

Литература

1. А.Б. Михайловский. Теория плазменных неустойчивостей. Т.2. Неустойчивости неоднородной плазмы. Атомиздат, М, 1970.
2. В.Л. Гинзбург, А.А. Рухадзе. Волны в магнитоактивной плазме. "Наука", М, 1970.
3. N.A. Krall. Drift waves. In: "Advances in plasma physics", vol.1, p.153. Ed. Simon and Thompson. Interscience Publishers. John Wiley and Sons. New York, London, Sydney, 1968.
4. V.D. Ozerov. Preprint No. D-201. Academy of Sciences, USSR, Space Research Institute, Moscow, 1975.
5. V.D. Ozerov. Properties of high-latitude ionospheric irregularities based on Cosmos 378 ion trap data. Space Research XVI, p.479. Akademie Verlag, Berlin, 1976.
6. В.Д. Озеров. Указания на наличие колебаний плазмы в ионосфере по данным ионных ловушек. Выпуск ИТ 7465-129. Радиотехнический институт АН СССР, М, 1965.
7. D.H. Clark and W.J. Raitt. J. Atmos. Terr. Phys., 38, 1245 (1976).
8. T. Beer. Nature, Lond. 242, 34 (1973).
9. E.R. Priest and J.J. Sanderson. Plasma Physics, 14, 951 (1972).
10. R.E. La Quey. Phys. Fluids, 16, 550 (1973).
11. I. Kutiev, Ts. Dachev, L. Bankov. Irregularities recorded by ion traps at about 1000 km height. Report to the XIX COSPAR Plenary Meeting. Preprint No. IV. B. 3. 8. Bulgarian Academy of Sciences, Central Laboratory for Space

Research, 1976.

12. B. Coppi, H. P. Furth, M. N. Rosenbluth, and R. Z. Sagdeev, *Phys. Rev. Letters*, 17, 377 (1966).
13. B. Coppi, G. Rewoldt, T. Schep. *Phys. Fluids*, 19, 1144 (1976).
14. Н. В. Дхорджио. *Геомагн. и аэрономия*, 15, 825 (1975).
15. D. H. Clark and W. J. Raitt. *Planet. Space Sci.*, 24, 873 (1976).
16. P. L. Dyson. *J. Geophys. Res.*, 74, 6291 (1969).
17. P. L. Dyson, G. P. Newton, and L. H. Brace, *J. Geophys. Res.*, 75, 3200 (1970).
18. Г. П. Комраков, Я. И. Лихтер, Ю. М. Михайлов, Э. Е. Митякова, В. В. Писарева, В. Д. Трахтенгерц. *Сб. "Низкочастотные волны и сигналы во внешней ионосфере"*, изд. Кольского филиала АН СССР. Апатиты, 1974, стр. 103.
19. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, В. Д. Озеров. *Сб. "Искусственные спутники Земли"*, вып. 6, изд-во АН СССР, М, 1961, стр. 63.
20. J. P. McClure and W. B. Hanson. *J. Geophys. Res.*, 78, 7431 (1973).
21. B. B. Balsley, G. Haerendel, and R. A. Greenwald. *J. Geophys. Res.*, 77, 5625 (1972).
22. Г. Г. Гетманцев, Г. П. Комраков, В. П. Иванов, И. В. Понков, В. Н. Тихин. *Космич. исслед.*, II, 335 (1973).
23. M. C. Kelley, F. S. Mozer, and U. V. Fahlson. *J. Geophys. Res.*, 76, 6054 (1971).
24. J. P. McClure and R. F. Woodman. *J. Geophys. Res.*, 77, 5617 (1972).
25. F. L. Scarf, R. W. Fredricks, I. M. Green, and C. T. Russell. *J. Geophys. Res.*, 77, 2274 (1972).
26. R. W. Fredricks and C. T. Russell. *J. Geophys. Res.*, 78, 2917 (1973).
27. F. L. Scarf, R. W. Fredricks, C. T. Russell, M. Neugebauer, M. Kivelson, and C. R. Chappell. *J. Geophys. Res.*, 80, 2030 (1975).
28. N. D'Angelo. *J. Geophys. Res.*, 78, 1206 (1973).

29. N.D'Angelo, A.Bahnsen, and H.Rosenbauer. J.Geophys. Res., 79, 3129 (1974).
30. К.И.Грингауз, Г.Л.Гдалевич, Геомагн. и аэронемиа, 14, 937 (1974).
31. Б.Б.Кадомцев. Турбулентность плазмы. Сб."Вопросы теории плазмы", вып.4, Атомиздат, 1964.
32. M.K.Hudson, M.C.Kelley. J.Geophys.Res., 81, 3913 (1976).
33. P.L.Dyson, J.P.McClure, and W.B.Hanson. J.Geophys. Res., 79, 1497 (1974).
34. W.B.Hanson, S.Sanatani, D.Zuccaro, and T.W.Flowerday. J.Geophys.Res., 75, 5483 (1970).
35. F.Primdahl, J.K.Olesen, and F.Spangselev, J.Geophys. Res., 80, 3698 (1975).
36. Г.П.Комраков, Э.Е.Митякова, В.В.Писарева. Космические исследования, 14, 578 (1976).
37. R.C.Sagalyn, M.Smiddy, and M.Ahmed. J.Geophys.Res., 79, 4252 (1974).
38. G.Stanev, L.Bankov, D.Teodosiev. Asymmetry in irregularity distribution of both hemispheres obtained by spherical ion traps and Langmuir probes. Report to the XIX COSPAR Plenary Meeting. Preprint IV-VI.a.8. Bulgarian Academy of Sciences, Central Laboratory for Space Research, 1976.
39. H.Kikuchi. J.Atmos.Terr.Phys., 38, 1055 (1976).
40. H.Kikuchi. In: "Cosmic plasma physics", ed.by Karl Schindler, Italy, Plenum Press. New York, London, 1972, p.45.