

А. В. ГУЛЬЕЛЬМИ, Н. А. ЗОЛУТУХИНА

**КВАЗИПЕРИОДИЧНЫЙ ДРЕЙФ ВОКРУГ ЗЕМЛИ ОБЛАКОВ
ЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ ПО ДАННЫМ ГЕОМАГНИТНЫХ
ПУЛЬСАЦИЙ ТИПА I_{pdp}**

(Представлено академиком М. А. Садовским 13 IX 1974)

Как известно ⁽¹⁾, инжекция энергичных протонов в магнитосферу приводит к возбуждению так называемых I_{pdp} -низкочастотных электромагнитных колебаний в диапазоне ~ 1 гц, имеющих нестационарный спектр. Инъекции происходят спорадически в предполуночные часы вблизи экваториальной плоскости на расстоянии $L \sim 5-9$ земных радиусов. Всплески колебаний наиболее часто наблюдаются в вечернем секторе магнитосферы, спустя несколько минут после инжекции. Предполагается, что инжектированные протоны достигают вечернего сектора в процессе азимутального дрейфа, обусловленного неоднородностью геомагнитного поля. Согласно ⁽²⁾, скорость дрейфа $\psi \sim 2^\circ \text{ мин}^{-1}$.

Допустим, что инжектированные протоны оказались внутри сепаратрисы, т. е. на замкнутой дрейфовой орбите ⁽³⁾. В этом случае следует ожидать, что при благоприятных условиях всплески I_{pdp} будут наблюдаться квазипериодично после каждого оборота облака протонов вокруг Земли *.

Случаи многократного возникновения всплесков I_{pdp} действительно наблюдаются. На рис. 1 показан динамический спектр двух всплесков I_{pdp} , зарегистрированных 10 III 1968 г. в сопряженных точках Кергелен (А) и Согра (Б). По вертикальной оси отложена частота f , по горизонтальной — всемирное время UT в часах. Второй всплеск наблюдается через ~ 40 мин. после первого. На рис. 2 можно различить шесть всплесков I_{pdp} , следующих один за другим $a_i, b_i, i=1, 2, 3$ с интервалом ~ 30 мин. (обсерватория Нурмиярви, 12 III 1971 г.).

Вообще говоря, многократные всплески I_{pdp} могут возникать в результате повторных инъекций. Мы хотим показать, что в некоторых случаях действует другая причина, а именно: дрейф вокруг Земли облака инжектированных протонов. Перечислим и обсудим свойства I_{pdp} , которые позволяют сделать этот вывод.

1. Расплывание всплесков. Для всех всплесков I_{pdp} характерен дрейф от низких частот к высоким. Согласно ^(1, 2), дрейф частоты обусловлен азимутальным дрейфом и расплыванием облака инжектированных протонов, причем

$$f \propto (t/\varphi)^{1/2}, \quad (1)$$

где t — время, отсчитываемое от момента инжекции, φ — долгота, отсчитываемая на запад от места инжекции.

Из (1) следует, что на фиксированной частоте темп нарастания частоты уменьшается с течением времени:

$$df/dt \sim t^{-1} \quad (2)$$

при $f = \text{const.}$

Рассмотрим рис. 1. При $f \approx 0,7$ гц в первом всплеске $df/dt \sim 0,07$ гц/мин, а во втором $df/dt \sim 0,02$ гц/мин. Расплывание всплесков, проявляющееся

* Расплывание облака протонов и нестационарность геомагнитного поля исключают возможность строгой периодичности дрейфа.

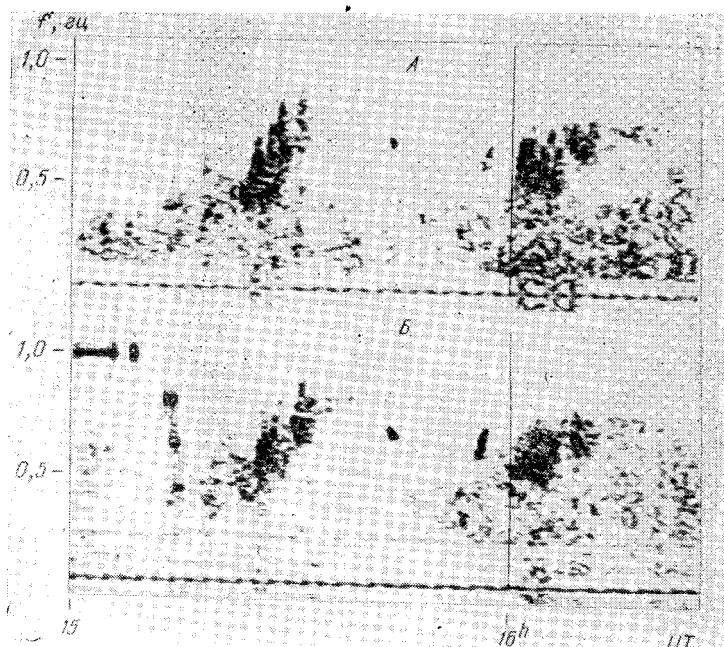


Рис. 1

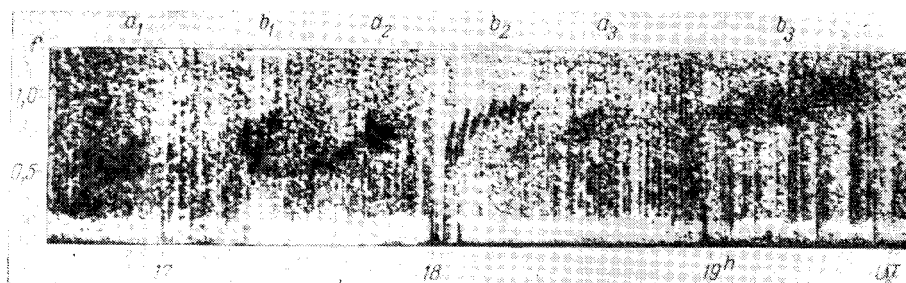


Рис. 2

в уменьшении темпа нарастания частоты, косвенно подтверждает предположение о том, что оба всплеска возбуждены одним и тем же облаком протонов, которое в процессе азимутального дрейфа совершило полный оборот вокруг Земли.

Расплывание всплесков I_{pdp} отчетливо заметно и на рис. 2. Однако в данном случае нельзя фиксировать частоту при оценке df/dt , так как наблюдается систематическое перемещение всплесков вверх по частоте от $\sim 0,5$ до ~ 1 гц. Вероятно, это перемещение обусловлено тем, что инжектированные протоны дрейфуют не только по азимуту, но и в глубь магнитосферы под действием нестационарного электрического поля, нарушающего третий адиабатический инвариант ⁽³⁾.

2. Квазипериодичность всплесков. Многократные всплески типа, показанного на рис. 2, относятся к редким событиям. Чаше наблюдаются двойные всплески, когда квазипериодичность установить невозможно. На рис. 1 первый всплеск на частоте $f \approx 0,7$ гц начинается в $15^h 25^m$, а второй в $16^h 02^m$ — через $\tau \approx 37^m$ после первого. В $16^h 40^m$, т. е. через интервал, примерно равный τ , наблюдаются слабые следы третьего всплеска. Мощная инжекция, спорадически возникшая в $16^h 30^m$, к сожалению, затрудняет надежную идентификацию третьего всплеска (на рис. 1 он не показан).

Обратимся к рис. 2. Весьма трудно предположить, что в интервале, меньшем трех часов, произошло шесть инъекций энергичных протонов в магнитосферу. В самом деле, шестикратная инъекция должна была бы привести к мощному усилению кольцевого тока. В данном же случае индекс D_{st} , характеризующий интенсивность кольцевого тока, был довольно умеренным (около $\sim 30 \gamma$).

Есть некоторые основания выделить две группы всплесков: в группе a_i всплески располагаются несколько ниже, чем в группе b_i . Возникает предположение о том, что в целом серия из шести всплесков I_{pdr} возникла в результате квазипериодичного дрейфа вокруг Земли двух протонных облаков. Период дрейфа порядка $\tau \sim 60^m$.

3. Уменьшение интенсивности всплесков. Потери энергичных частиц в результате пич-угловой диффузии, а также распыливание облака должны приводить к уменьшению интенсивности всплесков I_{pdr} после каждого оборота облака вокруг Земли. Уменьшение интенсивности всплесков хорошо заметно на рис. 2. (Напомним, что спектральная плотность колебаний пропорциональна степени потемнения динамического спектра.) В случае, показанном на рис. 1, интенсивность была оценена по соответствующей осциллограмме. На частоте $f \sim 0,7$ гц в первом всплеске амплитуда порядка ~ 50 мV, а во втором ~ 30 мV (обсерватория Согра).

4. Повторяемость деталей динамических спектров. При анализе динамических спектров мы обратили внимание на то, что иногда в смежных всплесках I_{pdr} наблюдается повторяемость характерных деталей. К сожалению, это соображение само по себе не может служить решающим доводом в пользу выдвинутой гипотезы, так как оценка вида динамического спектра I_{pdr} в достаточной мере субъективна.

Инъекция и распыливание облаков плазмы в магнитосфере исследовались ранее с помощью спутников. На спутнике «Эксплорер 12» были зарегистрированы внезапные возрастания потока протонов с энергиями $E \sim 100-300$ кэВ (⁴). Наблюдения проводились в утреннем секторе на оболочках $L \sim 7-12$. Найдена тесная связь этих событий с суббурями и обнаружено уменьшение средней энергии частиц с течением времени, что полностью согласуется с гипотезой об инъекции и азимутальном дрейфе протонных облаков. Аналогичные наблюдения были сделаны на спутнике «ATS 5» в диапазоне энергий $E \sim 5-50$ кэВ на оболочке $L \approx 6,6$ (⁵). Важно отметить, что в работе (⁵) приводятся примеры повторных регистраций дискретного облака протонов, совершающего несколько оборотов вокруг Земли. Эти результаты косвенно подтверждают нашу гипотезу о происхождении многократных всплесков I_{pdr} .

В заключение сделаем оценку некоторых параметров протонов, ответственных за возбуждение I_{pdr} . Протяженность облака в азимутальном направлении $\Delta\phi$ можно оценить по длительности Δt всплеска I_{pdr} и периоду полного оборота τ . Например, для всплесков a_1 и b_1 на рис. 2 $\Delta t_1 \sim 12^m$, так что при $\tau \sim 60^m$ имеем $\Delta\phi_1 \sim 70^\circ$. В конце серии (всплеск b_3) $\Delta t_3 \sim 40^m$ и $\Delta\phi_3 \sim 250^\circ$, т. е. облако почти полностью окружает Землю.

Скорость азимутального дрейфа в случае многократных всплесков $\phi \sim 5-10^\circ$ в 1 мин. Это соответствует энергии частиц $E \sim 100-200$ кэВ на оболочке $L \sim 6$.

Геофизическая обсерватория
Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта
Академии наук СССР
Борок Ярославской обл.

Поступило
30 VIII 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ А. В. Гульельми, В. А. Троицкая, Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы, «Наука», 1973. ² Н. Ф. Мальцева, А. В. Гульельми, В. Н. Виноградова, Геомагнетизм и аэрономия, № 5, 939 (1970). ³ Б. А. Теерской, Динамика радиационных поясов Земли, «Наука», 1968. ⁴ A. Konrady, J. Geophys. Res., v. 72, 15, 3829 (1967). ⁵ S. E. De Forest, C. E. McIlwain, J. Geophys. Res., v. 76, 16, 3587 (1971).