

Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца

Л. Ф. Черногор

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,
Украина, 61077, г. Харьков, пл. Свободы, 4
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 5 января 2001 г.

Предложен механизм, объясняющий наблюдаемое увеличение концентрации электронов в $2 \div 3$ раза в течение $3 \div 4.5$ ч на высотах ионосферы $81 \div 87$ км, стимулированное солнечным затмением. Он обусловлен высыпанием магнитосферных электронов, плотность потока которых составляет $10^7 \div 10^8$ м⁻²·с⁻¹.

Запропоновано механізм, що пояснює спостережуване збільшення концентрації електронів у $2 \div 3$ рази впродовж $3 \div 4.5$ г на висотах іоносфери $81 \div 87$ км, стимульоване сонячним затемненням. Він зумовлений висипанням магнітосферних електронів, густина потоку яких становить $10^7 \div 10^8$ м⁻²·с⁻¹.

Введение

Эффектам в нижней и средней ионосфере, сопровождавшим затмение Солнца (ЗС) 11 августа 1999 г., посвящены наши работы [1, 2]. Было обнаружено, что в нижней ионосфере (высоты $z \approx 80 \div 90$ км) ЗС вызвало сначала уменьшение почти в два раза концентрации электронов N , а затем продолжительное (в течение $3 \div 4.5$ ч) ее увеличение. Первое обусловлено уменьшением скорости образования электронов при покрытии солнечного диска, второе, по-видимому, является следствием ионосферно-магнитосферных связей, а именно, объясняется высыпанием электронов из магнитосферы.

Целью данной работы является рассмотрение возможности стимулированного солнечным затмением высыпания электронов из магнитосферы.

Роль среднеширотного высыпания частиц неоднократно обсуждалась в литературе (см. ссылки в [3]). В работе [3] показано, что

наблюдавшееся кратковременное увеличение N на высотах нижней ионосферы, скорее всего, объясняется высыпанием заряженных частиц из внутреннего радиационного пояса (геомагнитная оболочка $L \approx 2$). Высыпание может возникнуть в результате перераспределения захваченных частиц по питч-углам, связанного либо с изменением конфигурации силовых линий магнитного поля, либо с уменьшением “поперечной” энергии ϵ_{\perp} движения заряженных частиц. Последнее обсуждалось нами в работах [4-5], где показано, что такой механизм может быть эффективным при воздействии на ионосферу мощного радиоизлучения наземных установок и инфразвуковых волн от землетрясений. Схема действия механизма следующая. Источник энерговыделения приводит к изменению температуры и концентрации частиц, а значит, к возмущению тензора проводимости $\hat{\sigma}$ ионосферной плазмы. При этом возникает электрическое поле поляризации E_p с горизонтальным масштабом неоднородности L_{\perp} .

Оно, незначительно ослабляясь, проникает в магнитосферу и изменяет “поперечную” энергию частиц на величину

$$\epsilon_{\perp p} = eE_p L_{\perp}, \quad (1)$$

где e – заряд электрона. Кроме того, в процессе становления и релаксации возмущений $\hat{\delta}$ поле поляризации обладает вихревой компонентой [5, 6]

$$E_r \approx \mu_0 e v \Delta N L_{\perp} L_B / t_0, \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, v – скорость ветра в динамо-области (100 ÷ 120 км), ΔN – возмущение N , t_0 – длительность возмущений N , L_B – характерный масштаб неоднородности геомагнитного поля. Этой компоненте поля соответствует изменение энергии частиц

$$\epsilon_{\perp r} = eE_r L_t, \quad (3)$$

где L_t – длина траектории частиц, пропорциональная L_{\perp} . Важно, что для достаточно больших значений L_{\perp} возможна ситуация, когда $\epsilon_{\perp r} \gg \epsilon_{\perp p}$, так как $\epsilon_{\perp p} \propto L_{\perp}$, а $\epsilon_{\perp r} \propto L_{\perp}^2$.

ЗС естественным образом обеспечивает изменение энерговыделения и дает возможность проверить эффективность описанного механизма. Дело в том, что при ЗС имеет место уменьшение N на десятки процентов в E-области ионосферы (в максимуме токовой струи) [2]. При этом тензор проводимости плазмы возмущается в слое с характерным горизонтальным масштабом $L_{\perp} \approx 4000$ км и вертикальным размером $L_{\parallel} = 20 \div 30$ км в течение времени $t_0 \approx 2.5$ ч [1]. Генерация электрического поля с компонентами E_p и E_r приводит к вариации $\epsilon_{\perp p}$ и $\epsilon_{\perp r}$.

Оценки параметров высыпающихся частиц

Наблюдаемый в ходе ЗС и после него рост N в нижней ионосфере (табл. 1) может быть вызван следующими причинами [3]:

1. Ионизацией молекул NO рассеянным излучением в линии Лайман- α . При этом $\Delta N \leq 10^7 \div 10^8$ м⁻³ [3], что намного меньше наблюдаемого увеличения N .

2. Ионизацией молекул O₂ (¹ Δ_g) рассеянным солнечным излучением на длине волны 102.7 ÷ 111.8 нм. При этом значение $\Delta N \leq 10^7$ м⁻³, т. е. также слишком мало.

3. Ионизацией молекул атмосферного газа потоками энергичных электронов.

Таблица 1. Параметры, описывающие вариации концентрации электронов на различных высотах в нижней ионосфере в результате ЗС

Параметр	81 км	84 км	87 км
Δt , мин	100	80	40
ΔT , мин	180	230	280
N_0 , м ⁻³	$2 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$
N , м ⁻³	$6 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^8$	$12 \cdot 10^8$

Примечание. Δt – запаздывание возмущений N , ΔT – их длительность, N_0 – концентрация электронов до начала ЗС

Наиболее вероятным представляется появление потоков электронов из радиационного пояса. Опишем этот процесс подробнее.

В рассматриваемой ситуации уравнение баланса можно представить в виде

$$q = \alpha N^2,$$

где q – скорость ионизации, α – коэффициент рекомбинации. Члены, содержащие временную и пространственные производные, здесь опущены по следующим причинам. Время становления N за счет процесса рекомбинации составляет $t_N = (2\alpha N)^{-1} \approx 50$ с (при

$N \approx 10^9 \text{ м}^{-3}$, $\alpha \approx 10^{-11} \text{ м}^3/\text{с}$). Характерное время амбиполярной и турбулентной диффузии, $t_D = L_{\perp}^2 / (D + D_t)$, составляет порядка 10^{10} с (при коэффициентах амбиполярной диффузии $D \approx 1 \text{ м}^2/\text{с}$ и турбулентной диффузии $D_t \approx 10^3 \text{ м}^2/\text{с}$). Для вертикального размера $L_{\parallel} \approx 10 \text{ км}$ величина $t_D \approx 10^5 \text{ с}$. Время выноса ионизации ветром $t_w = L_{\perp} / v \approx 4 \cdot 10^4 \text{ с}$ при $v = 100 \text{ м/с}$. Продолжительность высыпания частиц $\Delta T \sim 10^4 \text{ с}$ (см. табл. 1). Следовательно, $t_N \ll \Delta T < t_w \ll t_D$. В силу этих неравенств уравнение баланса приобрело такой простой вид.

Изменение скорости ионизации запишем в виде:

$$\Delta q = q - q_0 = \alpha N^2 - \alpha_0 N_0^2$$

(индексом “0”, как обычно, обозначены невозмущенные параметры). Далее будем пренебрегать небольшими изменениями α , которые обусловлены вариациями температуры частиц. В дневное время на высотах $z \leq 85 \text{ км}$ преобладает процесс рекомбинации электронов с ионами-связками, для которого $\alpha \approx \alpha_0 \approx 10^{-11} \text{ м}^3/\text{с}$ [7].

С величиной Δq связана плотность потока мощности, теряемой моноэнергичными частицами [8],

$$P = 2\varepsilon_i \Delta z \Delta q,$$

где $\varepsilon_i \approx 35 \text{ эВ}$ – энергия, затрачиваемая высыпавшимся электроном на ионизацию одной молекулы воздуха; Δz – толщина слоя, где поглощается поток энергичных частиц (она порядка приведенной высоты нейтральной атмосферы – около 5 км на высотах 80 ÷ 90 км).

С другой стороны,

$$P = \varepsilon p,$$

где ε – энергия высыпавшихся частиц, p – их плотность потока. Если известны значения P , площади области высыпания частиц S и времени высыпаний ΔT , можно оценить мощ-

ность P и энергию E источника частиц:

$$P = PS, \quad E = P\Delta T.$$

Результаты оценок основных параметров потока частиц приведены в табл. 2. При этом в качестве исходных использовались данные из табл. 1. Полагалось, что $S = \pi L_{\perp}^2 / 4$. С учетом того, что лунная тень движется по Земле, продольный размер возмущенной области в конечном итоге примерно на порядок превышает L_{\perp} . Во столько же раз увеличиваются S , P и E .

Таблица 2. Параметры потоков высыпавшихся электронов

Параметр	81 км	84 км	87 км
$q_0, \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$	$4 \cdot 10^5$	$9 \cdot 10^5$	$36 \cdot 10^5$
$q, \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$	$36 \cdot 10^5$	$64 \cdot 10^5$	$144 \cdot 10^5$
$\Delta q, \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$	$32 \cdot 10^5$	$55 \cdot 10^5$	$108 \cdot 10^5$
$\Pi, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-7}$	$3.1 \cdot 10^{-7}$	$6.0 \cdot 10^{-7}$
$\varepsilon, \text{ кэВ}$	80	60	40
$p, \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$1.4 \cdot 10^7$	$3.2 \cdot 10^7$	$9.4 \cdot 10^7$
$P, \text{ МВт}$	2.3	4.0	7.8
$E, \text{ ГДж}$	25	55	131

Оценим далее изменение “поперечной” энергии электронов в магнитосфере под действием поля поляризации и вихревого поля. Поле поляризации приблизительно равно

$$E_p = \left| \frac{\Delta N}{N_0} \right| E_0,$$

где E_0 – электрическое поле в динамо-области, $\Delta N / N_0$ – относительное изменение концентрации электронов в E-области. В дневное время в средних широтах $E_0 \approx 3 \text{ мВ/м}$.

Для $|\Delta N/N_0| \approx 0.2$, или $\Delta N \approx -2 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ при $N_0 \approx 10^{11} \text{ м}^{-3}$ [2], имеем $E_p \approx 0.6 \text{ мВ/м}$.

Для оценки E_r по формуле (2) положим, что $v = 100 \text{ м/с}$, абсолютная величина изменения концентрации электронов $\Delta N = 2 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, $L_{\perp} \approx 4 \cdot 10^6 \text{ м}$, $L_B \approx R_e \approx 6.4 \cdot 10^6 \text{ м}$ (R_e – радиус Земли), $t_0 \approx 2 \text{ ч} = 7.2 \cdot 10^3 \text{ с}$. При этих условиях $E_r \approx 1.4 \text{ мВ/м}$. Считая, что частицы в магнитосфере испытывают действие полей E_p и E_r на расстоянии L_{\perp} , по формулам (1) и (3) получим, что $\varepsilon_{\perp p} \approx 4 \text{ кэВ}$ и $\varepsilon_{\perp r} \approx 6 \text{ кэВ}$. В принципе, возможна ситуация, когда $L_t \gg L_{\perp}$. При этом $\varepsilon_{\perp r}$ может составить десятки кэВ.

Обсуждение

Для обеспечения наблюдаемого на высотах $81 \div 87 \text{ км}$ роста N в течение ЗС и после него требуются плотности потока электронов $\sim 10^7 \div 10^8 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (см. табл. 2). Такие значения p не представляются большими. Как показано в работе [3], при воздействии на околоземную среду магнитных бурь и источников энергодвыделения антропогенного происхождения на высотах $80 \div 90 \text{ км}$ ожидаются потоки электронов с $\varepsilon \approx 80 \div 40 \text{ кэВ}$ и $p \approx 2 \cdot 10^8 \div 5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В нашем случае p примерно на порядок меньше.

Энергетические характеристики потоков электронов также являются сравнительно небольшими: мощность $P \approx 2 \div 8 \text{ МВт}$, энергия $E \approx 25 \div 130 \text{ ГДж}$.

Высыпание частиц – эффект вторичный. Ему предшествует уменьшение N на высотах динамо-области, вызванное уменьшением q при ЗС. Возникающие при этом потенциальное и вихревое поля с напряженностями порядка 1 мВ/м способны уменьшить ε_{\perp} на величину порядка $4 \div 6 \text{ кэВ}$. Таких значений достаточно для перераспределения части магнитосферных электронов по питч-углам и их высыпания в атмосферу. Горизонтальный размер области высыпаний может превышать размер первоначально возмущенной области, который приблизительно равен L_{\perp} . Это приведет к увеличению эффективности обсуждаемого механизма. Процессы в нижней ионосфере будут

определяться повторяющимся воздействием ионосфера – магнитосфера – ионосфера.

Как видно из табл. 1, время запаздывания высыпаний электронов Δt и продолжительность высыпаний ΔT существенно зависят от высоты. Время Δt быстро уменьшается, а ΔT растет с увеличением высоты. Это можно объяснить тем фактом, что для перевода частиц с большими энергиями в конус потерь требуется большее время торможения потенциальным или вихревым полем.

Добавим, что день ЗС 11 августа 1999 г. отнесился к умеренно-спокойным (индексы $A_p \approx 8$, $\sum K_p \approx 18$) или слабо возмущенным, для которых $A_p \geq 10$. Естественная возмущенность способствовала “срабатыванию” обсуждаемого механизма высыпания частиц.

Таким образом, проведенный анализ свидетельствует в пользу того, что ЗС может стимулировать высыпание электронов из магнитосферы. Основные звенья механизма стимуляции следующие. ЗС вызывает уменьшение концентрации электронов на высотах динамо-области. Это приводит к генерации электрического потенциального поля поляризации и вихревого поля. Проникая в магнитосферу, эти поля способны уменьшить “поперечную” энергию электронов и тем самым перевести их в конус потерь. Возникающее высыпание электронов приводит к ионизации нейтральных частиц на высотах $80 \div 90 \text{ км}$.

Выводы

1. Предложен механизм стимуляции высыпаний магнитосферных электронов в атмосферу в течение солнечного затмения и после него.
2. Оценены плотности потоков высыпавшихся электронов с энергиями $40 \div 80 \text{ кэВ}$. Они оказались порядка $10^7 \div 10^8 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Литература

1. А. М. Гоков, Л. Ф. Черногор. Радиофизика и радиоастрономия. 2001, **5**, №4, с. 348-360.
2. Л. С. Костров, Л. Ф. Черногор. Радиофизика и радиоастрономия. 2001, **5**, №4, с. 361-370.

3. L. F. Chernogor, K. P. Garmash, V. T. Rozumenko. Radiophys. and Radioastron. 1998, **3**, No. 2, pp. 191-197.
4. К. П. Гармаш, Л. Ф. Черногор. В сб.: Тез. докл. Международного симпозиума "Спутниковые исследования ионосферных и магнитосферных процессов". Москва, Изд-во ИЗМИРАН, 1995, с. 30-31.
5. Л. Ф. Черногор. Радиопизика и радиоастрономия. 1997, **2**, №4, с. 463-472.
6. К. П. Гармаш, Л. Ф. Черногор. Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1998, №6, с. 17-40.
7. А. Д. Данилов. Популярная астрономия. Ленинград, Гидрометеиздат, 1989, 230 с.
8. В. Б. Ляцкий, Ю. П. Мальцев. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. Москва, Наука, 1983, 192 с.

Magnetosphere Electron Precipitation Induced by a Solar Eclipse

L. F. Chernogor

The mechanism is suggested to explain an increase 2 ÷ 3 times in the electron number density in 81 ÷ 87 km height range, triggered by the solar eclipse. The effect observed persisted for 3 ÷ 4.5 h, being caused by magnetospheric electron precipitation fluxes with the density of $10^7 \div 10^8 \text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.