АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТКЛИКА АНТАРКТИЧЕСКОЙ СТРАТОСФЕРЫ НА СОЛНЕЧНОЕ ПРОТОННОЕ СОБЫТИЕ 20-ГО ЯНВАРЯ 2005 ГОДА

Тонев П.Т.

Институт космических исследований и технологий БАН, София, Болгария

ANALYSIS OF FACTORS FOR ELECTRIC RESPONSE OF ANTARCTIC STRATOSPHERE TO SEP EVENT ON 20 JANUARY 2005

Tonev P.T.

Space Research and Technology Institute of BAS, Sofia, Bulgaria

The factors that led to the peculiarities of electrical characteristics in the Antarctic stratosphere during the solar proton event on January 20, 2005 are investigated according to the results of balloon measurements. Along with an increase in conductivity (up to ~ 20 times), large and atypical (in magnitude, duration and sign) variations of the vertical electric current J_z appear. There are also sharp jumps in J_z , which coincide in time with rapid changes in the solar wind parameters. Variations of conductivity at high latitudes and the electrical interaction of the global electrical circuit with the auroral ionosphere are investigated as factors for these features. These features are perhaps a response to the amplification of this interaction.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-289-292

Во время солнечного протонного события (СПС) 20-го января 2005 года, которое отличалось очень твердым спектром и сопровождалось событием GLE, баллонные измерения в Антарктической стратосфере [1] показали ряд особенностей. Координаты баллона за сутки изменились с (70.9°S, 10.9°W) до (71.4°S, 21.5°W), а его высота – с 30.9 km в начале СПС в 6.51 UT до 33.2 km в конце суток. С приходом СПС проводимость σ возросла в ~20 раз и продолжала иметь многократное увеличение до конца суток. Вариации вертикальной компоненты электрического поля E_z и соответствующего тока J_z (вычисленного по закону Ома $J_z = \sigma E_z$) имеют несколько главных особенностей. 1) С начала СПС в 06:51 UT до 14:00 UT ток J_z увеличился до 6.5 pAm^{-2} , превышая в несколько раз его типичные значения (без СПС) $\sim 1\text{--}2 \text{ pAm}^{-2}$. 2) На этапе 14:00–15:56 UT J_z и E_z резко уменьшились до нуля, хотя проводимость в это время не имела резких скачков. До 15:56 UT ток J_z протекал вниз, что характерно для условий “хорошей погоды” в глобальной атмосферной электрической цепи (ГЭЦ). 3) В 15:56 UT ток J_z изменил направление вверх на несколько часов с резким скачком до значений в несколько раз превышающих типичные. Оба скачка тока J_z совпали по времени с изменениями параметров солнечного ветра.

Подтверждение некоторых из этих особенностей дали подобные измерения и во время мажорного СПС (16.02.1984 года) одновременно на двух геомагнитных широтах (56.3° и 48.8°) в стратосфере на высоте 26 km [2]. На большей геомагнитной широте (и только) были обнаружены значительные вариации тока J_z с особенностями подобными 1–2.

Цель этой статьи – выявить факторы, приводящие к особенностям 1–3 в случае СПС 20.01.2005 года. Увеличение проводимости в стратосфере – результат ионизации потоком энергичных протонов. Рис. 1 показывает модельные профили продольной σ_0 (кривые *a*) и Педерсеновской σ_P (кривые *b*) проводимостей в позиции баллона: *i*) в условиях до начала СПС (кривые 1); *ii*) во время СПС (09:00 UT) (кривые 2) с учетом геомагнитного порога обрезания 200 MeV; *iii*) при тех же условиях, но без обрезания [3].

Рис. 1.

Если рассматривать ГЭЦ как независимую систему, возрастание проводимости на высоких широтах не может объяснить наблюдаемые большие вариации тока J_z . Поэтому в качестве фактора рассматриваем взаимодействие ГЭЦ с системой продольных токов (ПТ) в авроральной ионосфере и с учетом транс-полярной разницы ионосферного потенциала ΔV_I между утренним и вечерним секторами, $\Delta V_I = 30\text{--}150$ kV. Здесь показывается, что электрическое взаимодействие ионосферой с ГЭЦ усиливается во время СПС при увеличении проводимости на высоких широтах и в принципе возможно возникновения особенностей 1–3.

Замыкание продольных токов (ПТ) в авроральной ионосфере принципиально происходит в интервале 100–150 км. Наряду с этим установлено [4], что поперечное электрическое поле $E_{\perp}$ в ионосфере, которое возникает из-за транс-полярной потенциальной разницы ΔV_I , проецируется вниз без затухания на высотах $z > Z_{\text{пр}}$ (вплоть до стратосферы и ниже). Результат проекции на высоте z – горизонтальное поле $E_{\text{пр}}(z) \sim E_{\perp}$ (рис. 2). Нижняя граница $Z_{\text{пр}}$ проецирования без потерь зависит от масштаба L поля $E_{\perp}$: вни-

зу показано соотношение между L и $Z_{\text{пр}}$ [5], где $Z_{\text{пр}}$ – высота, над которой $E_{\text{пр}}(z > Z_{\text{пр}}) > 0.9E_{\text{П}}$. При $L \geq 1000$ km $Z_{\text{пр}} < 20$ km [4].

В масштабе транс-полярной разницы ионосферного потенциала ΔV_I поперечное электрическое поле $E_{\text{П}}$ в транс-полярной вертикальной плоскости $S_{\text{ТП}}$ спроецированному горизонтальному электрическому полю $E_{\text{пр}}(z)$ на высоте $z > Z_{\text{пр}}$, $z < 100$ km соответствует ток $J_{\text{H}}(z)$ (Рис.2). Так как

$$J_{\text{H}}(z_{\text{А}} < 90 \text{ km}) = J_{\text{H}}(z_{\text{I}} = 120 \text{ km}) \sigma(z_{\text{А}}) / \sigma(z_{\text{I}}) \ll J_{\text{H}}(z_{\text{I}}), \quad (1)$$

ток $J_{\text{H}}(z)$ – пренебрежимо малая добавка к системе замыкающих токов в ионосфере. В то же время, в системе токов ГЭЦ этот ток может быть существен. Из-за условия непрерывности протекают вертикальные токи между ионосферой и высотой $Z_{\text{пр}}$: ток J_{V} текущий вниз в утреннем секторе (правая вертикальная ветвь на рис. 2) и вверх в вечернем секторе (левая ветвь) при условии баланса входящих и выходящих ПТ. Вертикальные токи J_{V} являются пренебрежимо малым продолжением ПТ под 100 km, которое однако может быть существенным в ГЭЦ, где токи порядка pA/m².

Рис. 2.

В электрической цепи на рис. 2 расположенной в плоскости $S_{\text{ТП}}$ потенциальная разница ΔV_I между вертикальными правой и левой ветвями сохраняется неизменной вплоть до высоты $Z_{\text{пр}}$ вследствие проецирования поля $E_{\text{П}}$ без потерь. Токи $J_{\text{H}}(z)$ и $J_{\text{V}}(z)$ на высоте z в цепи на рис. 2 в интервале $[Z_{\text{пр}}, Z_{\text{I}} = 150 \text{ km}]$ определяется по формулам:

$$J_{\text{H}}(z) = \Delta V_I \sigma_p(z) / L; \quad J_{\text{V}}(z) = \Delta V_I \int_{Z_{\text{пр}}}^z \sigma_p(z) dz / L \quad (1)$$

В первых часах СПС баллон проецировался в утреннем секторе, где ток J_{V} направлен вниз. После 15:56 UT баллон проецировался в вечернем секторе, где J_{V} направлен вниз. Нельзя легко определить соответствующую плотность вертикального электрического тока $j_{\text{V}}(z)$ для заданных координат, так как она зависит от конкретного распределения суммарного тока $J_{\text{V}}(z)$; можно оценить ее относительного изменения в условиях СПС.

В результате суперпозиции в ГЭЦ тока “хорошей погодой” j_{Tz} тропосферного происхождения с токами ионосферного происхождения, вертикальный ток J_z на высоте z имеет вид:

$$J_z(z) = j_{Tz} + j_V(z) \quad (2)$$

Здесь допускается, что при возросшей проводимости σ на высоких широтах в условиях СПС роль второго члена в (2) возрастает и эффективно определяет вариации общего тока J_z . Этим следует объяснить смена направления J_z в 15:56 UT. Для анализа на рис. 3 представлены профили горизонтального $J_H(z)$ (левая графика) и вертикального $J_V(z)$ (правая графика) токов вычисленных по (1). Кривые 1–3 соответствуют профилям проводимости 1–3 на рис. 1. В условиях геомагнитной суббури ($AL = -1100$ nT) принято $\Delta V_I = 120$ kV, $L = 3200$ km, $Z_{pp} < 20$ km.

Рис. 3.

Результаты показывают многократное увеличение токов $J_H(z)$ и $J_V(z)$ на высоте баллона во время СПС. Эти результаты подкрепляют предположение, что в рассмотренной ситуации в (2) становится определяющим член j_V , как и его знак, чем можно объяснить особенности экспериментальных результатов 1–3.

Литература

1. Kokorovski, M., J.G. Sample, et al. Rapid fluctuations of stratospheric electric field following a solar energetic particle event // Geophys. Res. Lett., 2006, 33, L20105 doi:10.1029/2006GL027718
2. Holzworth, R.H., K.W. Norville, P.R. Williamson. Solar flare perturbations in stratospheric current systems // Geophys. Res. Lett., 1987, 14, 852-855.
3. Kokorowski, M., A. Seppälä, etc. Atmosphere-ionosphere conductivity enhancements during a hard solar energetic particle event // J. Geophys. Res., 2012, 117, A05319, doi:10.1029/2011JA017363
4. Park C.G., M. Dejnackaritra. The effects of magnetospheric convection on atmospheric electric fields in the polar cap, In: Electrical Processes in Atmospheres, Proc. 5th Int. Conf. on Atmospheric Electricity, Garmisch-Partenkirchen, 2–7 September 1974, ed. by H. Dolzelek and R. Reiter, 1977, pp. 536-543.