ОТВЕТ ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ НА СОЛНЕЧНЫЕ ПРОТОННЫЕ СОБЫТИЯ ПО НАЗЕМНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ – МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РОЛИ ЗАРЯДА ЧАСТИЦ

Тонев П.Т.

Институт космических исследований и технологий БАН, София, Болгария

GLOBAL ELECTRIC CIRCUIT RESPONSE TO SOLAR PROTON EVENTS DERIVED FROM GROUND-BASED MEASUREMENTS – MODEL ESTIMATION OF PARTICLE CHARGE ROLE

Tonev P.T.

Space research and technology institute of BAS, Sofia, Bulgaria

Data available from measurements of atmospheric electric field E_z at surface during major solar proton events (SPE) show typical large and peculiar E_z variations. At high latitudes, in Apatity, Russia (67.3°N, 33.2°E) there are measurements from three major SPEs in 2001: these demonstrate several time increase of the electric field E_z (related to its average value) during first hours of a SPE, and decrease of E_z well below its average value, even accompanied by periods of its reversal (when E_z changes its sign), during the later period of each SPE. In contrary, at low latitudes, in CASLEO, Argentina (31.8°S, 69.3°W) the electric field E_z has a significant (>10%) decrease below the average in the first period of SPEs, and an increase in the succeeding period. To explain these SPE effects we estimate the role of electric charge of the proton flux. First estimation of this factor is obtained here by 1D modeling in terms of 'equivalent electrical circuit' and 'capacitive atmosphere'. The model results predict the observed peculiarities of the electric field E_z variations. The modeled peak variations are up to 60% and thus smaller than the observed ones, possibly, due to model in which additional factors have to be involved. Nevertheless, this model predicts the mutual behavior of E_z variations at high and low latitudes in the first period of SPE.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-399-402

Сначала здесь обсуждаются особенности измеренных вариаций вертикального атмосферного электрического поля (АЭП) E_z у земной поверхности ($z = 0$) как на высоких [1], так и на низких [2] широтах, имеющие место во время различных мажорных солнечных протонных событий (СПС). Результаты измерений получены в условиях “хорошей погоды” и при отсутствии прочих помех. Для случая высоких широт имеются данные измерения в Апатитах, Россия (67.3°N, 33.2°E) (геомагнитная широта 63.8°) во время трех мажорных СПС в 2001 году: *i*) 15 апреля, *ii*) 18 апреля и *iii*) 4 ноября [1]. Для этих событий максимальный поток протонов >1 MeV (согласно данных GOES-10) приблизительно 1.4×10^3 для *i*), 1.5×10^3 для *ii*) и 2.3×10^3 для *iii*) [частиц/см²/ster/s] и достигается 8–10 часов после начала СПС. Результаты измерений показывают нетипично большие вариации E_z с характерными особенностями, более четко заметные в два последних событий, *ii*) и *iii*), в которых отличимы две фазы. В первой фазе

АЭП среднее значение E_z намного больше среднего E_z до СПС. Кроме того, АЭП E_z имеет большой разброс значений: изменяется с 120 до 540 V/m для события *ii*) (за 8 часов с начала СПС), и между 115 и 840 V/m для *iii*) (за 2.5 часов с начала СПС). Во второй фазе событий разброс E_z тоже большой (с –20 до 170 V/m и с –20 до 160 V/m, соответственно, для событий *ii* и *iii*), но при меньшем среднем значении, чем при условиях до начала СПС.

В случае СПС *i*) (15.04.2001 года) [1] E_z достигает аналогичным образом максимум $\sim +600$ V/m в первой фазе после начала СПС и минимум ~ -900 V/m во второй. В данном случае имеется и дополнительная особенность: перед началом СПС E_z сначала быстро возрастает до 500 V/m; потом имеет резкий скачок к отрицательным значениям ~ -1 kV/m.

Имеются ряд аналогичных измерений АЭП E_z на поверхности $z = 0$ при мажорных СПС (GLE) на низких широтах, в частности, в CASLEO, Аргентина, (31.8°S, 69.3°W) (на высоте 2552 м) [2]. Наблюдаются типичные для ряда событий вариации E_z (но здесь они имеют другой характер) сравнивая их со средним значением E_{zcp} при общих условиях. Типичный пример – СПС 17 мая 2012 года. На первом этапе (3–4 часа с начала СПС) E_z значительно меньше E_{zcp} (до 17%), а на последующем этапе длительности 5–6 часов проявляется значительное увеличение E_z до 38% над средним E_{zcp} . Статистический анализ восьми СПС показал, что эти особенности характерны для данных CASLEO [2].

Вариации АЭП E_z относительно его среднего значения E_{zcp} на высоких и на низких широтах имеют обратный знак как в начальной фазе СПС, так и в последующей фазе. В начальном периоде СПС $E_z > E_{zcp}$ на высоких широтах и $E_z < E_{zcp}$ на низких, тогда как в следующем за ним периоде имеют место обратные соотношения. Для объяснения описанных особенностей вариаций следует учесть, что на высоких широтах АЭП E_z иногда изменяет знак (т.е. его направление изменяется вверх) на длинный период (десятки минут), т.е. больше характеристического время ГЭЦ ~ 7 минут. Отметим, что в высокоширотной антарктической стратосфере на основе балонных измерений на высоте $z \sim 32$ km во время мощнейшего СПС 20 января 2005 года [3, 4] в поведении вертикального электрического тока J_z наблюдалось аналогия с вариациями АЭП E_z на поверхности: в первом периоде СПС (5 часов) J_z много больше среднего J_{zcp} и направленно вниз, а за последние 8 часов J_z было нетипично направлено вверх, причем $|J_z| > 2 J_{zcp}$.

Уже показано [5], что эффект изменения атмосферной электрической проводимости σ (из-за увеличенной ионизации в средней атмосфере во время СПС) на изменение характеристик ГЭЦ мал (до 5%) и не может объяснить наблюдаемые вариации АЭП $E_z(z = 0)$ на различных широтах. Для их объяснения здесь рассматривается влияние потока энергетичных протонов >1 MeV на ГЭЦ в высокоширотную атмосферу после их термализации. В подтверждение того, из результатов [6] заключаем, что суммарный электрический заряд, поступающий за 1 s в среднюю высоко-

широтную атмосферу в результате потока протонов >5 MeV во время некоторых из мощнейших событий GLE (04.08.1972, 29.09.1989, 19.10.1989, 23.03.1991, 28.10.2003), может быть сопоставимым с общим током ~ 1 kA в ГЭЦ от ионосферы к земле. Следовательно, данные события GLE, вероятно, привели к модификации характеристик ГЭЦ. Для приближенной оценки упомянутого влияния здесь предлагается простейшая 1D модель вариаций в ГЭЦ на время СПС.

Модельное представление реакции ГЭЦ на СПС. В модели ГЭЦ включено отдельное полушарие Земли при предположении о полушарной симметрии. ГЭЦ представлена в виде эквивалентной электрической цепи (ЭЭЦ). В ЭЭЦ между ионосферой на высоте $z = 80$ km и землей ($z = 0$) текут токи $J_{\text{ТГ}}(t, z)$, $J_{\text{ВШ}}(t, z)$ и $J_{\text{НШ}}(t, z)$, являющиеся функциями времени t и высоты z , в областях: а) $R_{\text{ТГ}}$ гроз в тропосфере, из которых ток $J_{\text{ТГ}}$ поступает в ионосферу; б) $R_{\text{ВШ}}$ высоких широт ($>65^\circ$), где проникают энергетические протоны >1 MeV и после термализации создают положительные ионы участвующие в токи ГЭЦ; в) $R_{\text{НШ}}$ всех остальных широт, где источники тока отсутствуют. Площади A_R областей, где индекс R указывает на соответствующую область: $A_{\text{ВШ}} = 2.4 \times 10^{13} \text{ m}^2$, $A_{\text{НШ}} = 2.3 \times 10^{14} \text{ m}^2$, $A_{\text{ТГ}} = 2.3 \times 10^{11} \text{ m}^2$. При квазистатических условиях уравнение в общем виде для плотности полного тока $\mathbf{J}(t, z)$ на высоте z в момент t после прихода СПС следующее:

$$\text{div} \mathbf{J} + \text{div} \mathbf{J}_{\text{SRC}} = 0, \quad (1)$$

где $\mathbf{J} = \mathbf{J}_C + \mathbf{J}_D$: включает в себя ток проводимости $\mathbf{J}_C = \sigma \mathbf{E}$ и ток смещения $\mathbf{J}_D = \varepsilon_0 d\mathbf{E}/dt$; σ – атмосферная проводимость, $\mathbf{E}$ – вектор электрического поля, ε_0 – диэлектрическая константа. $\mathbf{J}_{\text{SRC}} = \mathbf{J}_{\text{ТГ}} + \mathbf{J}_{\text{SEP}}$ – ток двух типов источников: тропосферный $\mathbf{J}_{\text{ТГ}}$ и $\mathbf{J}_{\text{SEP}}$ являющийся результатом поступления заряженных частиц в атмосферу ниже 80 км. В терминах ЭЭЦ уравнение (1) записывается для отдельной области R в 1D приближении:

$$d(\sigma_R E_R)/dz + \varepsilon_0 (d^2 E_R/dzdt) = dJ_{\text{Rsrc}}/dz \quad (2)$$

где $J_{\text{Rsrc}}(z, t)$ – ток источника в области R . Система трех уравнений (2) относительно областей $R_{\text{ВШ}}$, $R_{\text{НШ}}$ и $R_{\text{ТГ}}$ решаются при условиях:

$$J_{\text{ТГ}}(t, z = 0) + J_{\text{ВШ}}(t, z = 0) + J_{\text{НШ}}(t, z = 0) = 0; \quad (3)$$

$$V_{\text{ТГ}}(t) = V_{\text{ВШ}}(t) = V_{\text{НШ}}(t) = V(t). \quad (4)$$

Здесь $V(t)$ – ионосферный потенциал, который одинаков для каждой области R , для которой определяется как функция $J_R(t, z)$ в виде:

$$V_R(t) = \int_{z=0, 80} J_R(t, z)/(\sigma_R(z) A_R) dz. \quad (5)$$

Начальное условие при $t=0$ задано стационарными характеристиками ЭЭЦ при $J_{\text{SEP}} = 0$ и постоянным генератором тока $J_{\text{ТГ}}$ в области $R_{\text{ТГ}}$, который поддерживает в глобальном масштабе отрицательный заряд в грозовых облаках на высоте 3 км и положительный заряд на 6 км (в среднем). Величина $J_{\text{ТГ}}$ определяется из условия заданного ионосферного потенциала V ($V = 300$ kV) в начальный момент $t = 0$.

Отдельные области R характеризуются постоянным во времени профилем проводимости $\sigma_R(z)$. Для области $R_{\text{ВШ}}$ принят модельный профиль $\sigma_{\text{ВШ}}(z)$ для высоких широт в условии СПС 20 января 2005 года [4]. Области $R_{\text{НШ}}$ и $R_{\text{ТГ}}$ характеризуются одинаковым профилем проводимости $\sigma_{\text{ТГ}}(z) = \sigma_{\text{НШ}}(z)$ для высот $z > 6.5$ км. Весь профиль $\sigma_{\text{НШ}}(z)$ совпадает с модельным профилем для низких широт в [7]. В интервале усредненных высот облаковых структур 2.5–6.5 km $\sigma_{\text{ТГ}}(z) = \sigma_{\text{НШ}}(z)/3$ (проводимость в облаке в три раза ниже окружающей). Ниже облаков, $z < 2.5$ km, $\sigma_{\text{ТГ}}(z) = 2\sigma_{\text{НШ}}(z)$ считая, что ток молний обеспечивает половину тока облако-земля.

Для получения оценки первого приближения реакции ГЭЦ на СПС *ii*) в начальном периоде возрастания потока $f(t)$ протонов до некоторого максимума f_{max} , приняты весьма упрощенные представления потока протонов с энергиями >1 MeV проникших на верхней модельной границе $z = 80$ km атмосферы с усреднением по области $R_{\text{ВШ}}$, а также профиля плотности термализованных протонов ниже 80 км. Предполагается, что вертикальный поток $f(t)$ протонов >1 MeV на границе $z = 80$ km возрастает линейно по времени до $f_{\text{max}} = 10^3 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ за время $t_1 = 20$ минут. Профиль тока источника в области $R_{\text{ВШ}}$ $J_{\text{SEP}}(t, z) = q_e f_p(t, z) A_{\text{ВШ}}$, где $q_e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ – элементарный заряд, $f_p(t, z)$ – усредненная по геомагнитной широте плотность потока термализованных протонов на высоте z в момент t . Профиль $f_p(t, z)$ определяется на интервале между $z_L = 25$ km и $z_U = 78$ km из условия, что плотности $f_p(t, z)$ на границах z_L и z_U соотносятся как потоки протонов энергий >100 MeV и >1 MeV, соответственно. Это соотношение варьирует; в случае СПС *ii*) оно может быть $\sim 1/200$, поэтому здесь $f_p(t, z_L) = f_p(t, z_U)/200$. Считая, что профиль $f_p(z)$ экспоненциален, получается, что $f_p(t, z) = C_p \exp(z/H_p)$, где $H_p = 8590$ m, а константа C_p определяется из общего потока протонов >1 MeV на верхней границе $z = 80$ km.

Первая модельная оценка при данных допущениях показывает, что за время возрастания потока протонов АЭП E_z на высоких широтах возрастает до $\sim 60\%$, а на остальных широтах E_z уменьшается до 6% . Эта оценка согласуется с наблюдениями по характеру вариаций АЭП E_z на первой фазе СПС, но предсказанный эффект меньше наблюдаемого.

Объяснение реакции ГЭЦ на СПС важно при выяснении связи погоды с СПС [8], считая что ток J_z играет роль в процессах ее формирования.

Литература

1. Shumilov O.I., Kasatkina E.A., Frank-Kamenesky A.V. // Geomagn. Aeron., 2015, v. 55, No. 5, 650.
2. Tacza J. C., Raulin J.-P., De Juli M. C. // 32nd URSI GASS, Montreal, 19–26 August 2017
3. Kokorowski M., Sample J. G., et al. // Geophys. Res. Lett., 2006, v.33, L20105.
4. Kokorowski M., Seppälä A., et al. // J. Geophys. Res., 2012, v.117, A05319.
5. Farrell W. M., Desch M. D. // Geophys. Res. Lett., 2002, v. 29, 1323, 37-1.
6. Makhmutov V.S., G.A. Bazilevskaya, Y.I. Stozhkov, N.S. Svirzhevsky, A.K. Svirzhevskaya // Proc. 31st ICRC, Lodz, 2009, 1.
7. Tinsley B.A., Zhou L. // J. Geophys. Res., 2006, v.111, D16205.
8. Veretenenko S.V. // DSc. Thesis, Sanct Petersburg University, 2017, 327 p.