



## Phản ứng của lớp D tầng điện ly vùng vĩ độ thấp đối với bùng nổ sắc cầu Mặt trời trong năm 2014

Lê Minh Tân

Trường Đại học Tây Nguyên

Chấp nhận đăng: 12 - 8 - 2015

### ABSTRACT

#### The responses of low-latitude D region ionosphere to solar flares during 2014

93 solar flare events were recorded by using the Very Low Frequency (VLF) wave, 19.8 kHz from North West Cape (NWC), Australia to Tay Nguyen University (12.65°N, 108.02°E), Vietnam during 2014 to study the responses of the low-latitude D region ionosphere to solar flares. The observed VLF amplitude and phase perturbations are used as the input parameters for the simulated LWPC (Long-Wavelength Propagation Capability) program, using Wait's model of lower ionosphere, to estimate the Wait's parameters, the reference height ( $h'$ ), and the electron density gradient ( $\beta$ ). The results reveal that when the X-ray irradiance ( $\lambda < 1$  nm) increases, the  $\beta$  increases from 0.31 to 0.53  $\text{km}^{-1}$ , while  $h'$  decreases from 72.8 to 60.9 km. The values of  $h'$  observed at low latitudes are higher, but the values of  $\beta$  are lower than those observed at middle latitudes during perturbed conditions. The representation of the electron density changes with altitude and time supports to deeply understand the behavior of the D-region ionosphere during solar flares.

©2015 Vietnam Academy of Science and Technology

### 1. Mở đầu

Lớp D (ở độ cao 60 - 90km) là phần thấp nhất của tầng điện ly của Trái Đất và là môi trường có cơ chế hóa học phức tạp và hấp thụ sóng vô tuyến. Lớp D đóng vai trò biên dẫn phía trên của ống dẫn sóng (Earth ionosphere waveguide - EIWG) phản xạ sóng tần số rất thấp VLF (Very Low Frequency, 3-30 kHz) (Hargreaves, 1992). Vào ban ngày, lớp D được duy trì bởi bức xạ Lyman- $\alpha$  làm cho sóng VLF phản xạ ở độ cao khoảng 70 km. Trong điều kiện bình thường, dòng tia X từ Mặt Trời tác dụng ion hóa rất nhỏ đến lớp D. Tuy nhiên, khi có bùng nổ sắc cầu Mặt trời (BNSCMT), dòng tia X trở thành nguồn ion hóa chính của lớp này. Bước sóng tia X nhỏ hơn 1 nm có tác dụng tăng tốc độ ion hóa các phân tử  $\text{O}_2$  và  $\text{N}_2$  do đó làm tăng mật độ điện tử. Kết quả này làm cho độ cao phản xạ hạ

xuống, dẫn đến giảm sự hấp thụ sóng, làm tăng biên độ VLF (Mitra, 1974). Cường độ tia X được ghi bởi vệ tinh GOES và được chia thành bốn cấp độ: B, C, M, X. Trong số đó, lớp B là lớp thấp nhất, trong khi đó lớp X là lớp cao nhất. Mỗi lớp được chia thành các cấp độ khác nhau từ 1 đến 9 (Gustafsson, 2011). BNSCMT xuất hiện gây nhiễu loạn điện ly và ảnh hưởng đến truyền thông sử dụng sóng vô tuyến. BNSCMT có thể làm tăng hấp thụ sóng vô tuyến và làm mất dẫn sóng ngắn (short-wave fade, SWF) hoặc tạo nhiễu vô tuyến băng rộng và nhiễu này cộng hưởng trực tiếp với sóng tần số rất cao (30 MHz-300 MHz) (<http://legacy-ww.swpc.noaa.gov/info/Radio.pdf>). Khi BNSCMT xuất hiện, các hạt như điện tử, proton...bứt ra từ Mặt Trời. Những đám mây plasma bao gồm những hạt này được gọi là sự phóng vật chất từ vành nhật hoa (Coronal Mass Ejection-CME). CME sẽ mất khoảng 72 giờ để

đến được Trái Đất (Scherrer, et al., 2009). Những vật chất này gây bão điện ly và làm gián đoạn thông tin liên lạc, ảnh hưởng tới hoạt động của vệ tinh. Chúng làm xuất hiện các cơn bão từ và ảnh hưởng tới mạng lưới điện cũng như các cơn bão bức xạ gây nguy hiểm cho cuộc sống của con người trên Trái Đất (WMO, 2009). Sự nghiên cứu nhiễu loạn lớp D do BNSCMT liên quan đến sự hấp thụ sóng vô tuyến có ý nghĩa quan trọng và làm tiền đề cho các nghiên cứu dự báo điều kiện điện ly, phục vụ công nghệ vũ trụ và thông tin liên lạc.

Quan sát trong 6 tháng năm 2007, Kumar nghiên cứu sự biến đổi của biên độ và pha của tín hiệu VLF do BNSCMT tại Suva (18,08°N; 178,3°Đ), Fiji, tác giả này thấy rằng biên độ sóng VLF biến đổi liên hệ với cường độ X gần với dạng hàm logarit. Đỉnh biên độ VLF xuất hiện sau đỉnh cường độ tia X với thời gian trễ khoảng 2 - 4 phút. Tác giả này cũng tìm thấy đỉnh biên độ xuất hiện trước đỉnh cường độ tia X đối với các trường hợp BNSCMT mạnh hoặc nhiều sự kiện BNSCMT xảy ra liên tiếp (Kumar, 2007). Khoảng thời gian trễ này là cần thiết cho quá trình tái hợp và ion hóa để hồi phục lại sự cân bằng dưới tác dụng của bức xạ tia X khi có BNSCMT (Zigman et al., 2007). Sử dụng sóng VLF từ trạm phát GQD, Grubor và các cộng sự ghi nhận BNSCMT từ lớp C đến M5 trong suốt các tháng mùa hè từ năm 2004 - 2007, tại Belgrade (44,85°B; 20,38°Đ) Serbia và tìm thấy  $\beta$  tăng từ 0,3 đến 0,49 km<sup>-1</sup> trong khi đó  $h'$  giảm từ 74 km đến 63 km (Grubor et al., 2008). Basak & Chakrabarti phân tích 22 sự kiện BNSCMT từ C1.5 đến M9.31 ghi nhận bởi sóng NWC/19,8 kHz trong suốt tháng 1 - 9 năm 2011 tại Sitapur (22,45° B; 87,75° Đ), India với góc thiên đỉnh trong khoảng 14°-33° (Basak & Chakrabarti, 2013). Zigman và nnk (2007) đã phân tích 97 trường hợp về sự tăng biên độ của sóng VLF do BNSCMT từ tháng 5 đến tháng 8 năm 2004 và năm 2005 tại Belgrade, Serbia. Bằng cách tính thời gian trễ giữa đỉnh biên độ sóng và đỉnh cường độ tia X và giải phương trình liên tục của điện tử để mô phỏng sự biến đổi của mật độ điện tử theo thời gian ở độ cao 74,1 km. Tuy nhiên, các công trình trên chưa có sự so sánh cụ thể các thông số  $h'$ ,  $\beta$  giữa các vùng vĩ độ khác nhau. Chưa có các khảo sát sự thay đổi mật độ điện tử theo độ cao và theo thời gian, trong trường hợp đỉnh biên độ VLF xuất hiện trước đỉnh cường độ tia X.

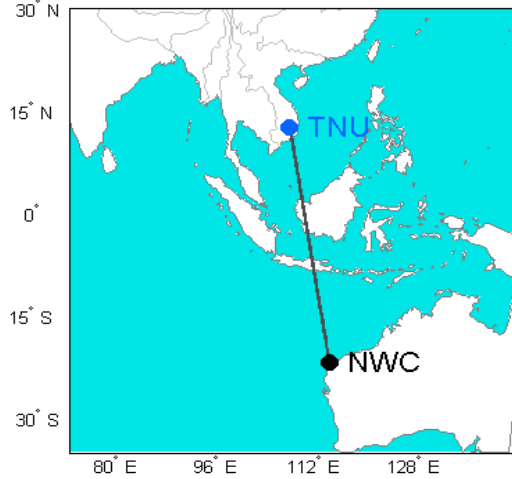
Trong bài báo này, chúng tôi trình bày việc thu thập biên độ và pha nhiễu loạn của sóng NWC/19.8 kHz từ North West Cap (21,8°N; 114,2°Đ), Australia đến đại học Tây Nguyên (TNU) (12,65°B; 108,02°Đ) trong điều kiện có BNSCMT năm 2014 (năm Mặt Trời hoạt động mạnh nhất của chu kỳ thứ 24) để tính toán các thông số Wait. Phân tích sự thay đổi các thông số này ở vùng điện ly vĩ độ thấp và so sánh với chúng ở vĩ độ trung bình. Khảo sát sự thay đổi mật độ điện tử đồng thời theo độ cao và theo thời gian để hiểu hành vi của lớp D tầng điện ly khi có BNSCMT một cách tổng thể.

## 2. Phương pháp ghi và phân tích số liệu

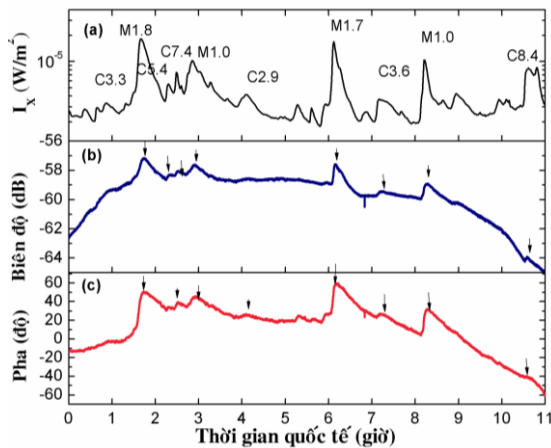
Chúng tôi sử dụng máy thu UltraMSK (của New Zealand) cài đặt tại TNU (12,65°B) để thu biên độ và pha của tín hiệu NWC/19,8 kHz từ Australia. Máy thu này gồm có các bộ phận chính: ăng-ten VLF thu thành phần từ trường của sóng điện từ, bộ tiền khuếch đại khuếch đại tín hiệu từ ăng-ten phục vụ cho việc số hóa, card âm thanh M-Audio Delta 44 (96 kHz) đóng vai trò chuyển đổi tín hiệu tương tự sang số, máy thu GPS cung cấp một xung trên giây (1 PPS) để chuẩn hóa tần số lấy mẫu của card âm thanh, máy vi tính và phần mềm UltraMSK để ghi dữ liệu. Hệ thống máy thu được công bố trên website <http://www.ultramsk> hoặc công trình của Dahlgren và nnk (2011) và sự lắp đặt máy thu tại đại học Tây Nguyên được trình bày chi tiết trong công trình trước đây (Tan et al., 2014). Phần mềm UltraMSK ghi biên độ (dB) và pha (°) của sóng NWC/19.8 kHz bắt đầu 0:00:00 UT đến 23:59:59 UT.

Hình 1 biểu diễn đường truyền sóng VLF từ North West Cap (NWC), Australia đến TNU (viết tắt là đường truyền NWC-TNU). Đường truyền NWC-TNU nằm trong khu vực vĩ độ thấp và phần lớn băng qua vùng dị thường xích đạo từ. Hình 2b, c biểu diễn ví dụ sự thay đổi biên độ và pha của tín hiệu NWC/19.8 kHz từ 0:00 - 11:00 UT (Universal Time: giờ quốc tế) khi có nhiễu BNSCMT ngày 13 tháng 2 năm 2014. Cường độ tia X (dữ liệu ghi từ vệ tinh GOES) được biểu diễn cùng khoảng thời gian trên (hình 2a). Tín hiệu NWC/19.8 kHz phản ứng mạnh (biên độ và pha tăng) với các sự kiện BNSCMT. Các BNSCMT lớp C (C2.9 - C8.4) và M (M1.0 - M1.8) xuất hiện liên tiếp nhau. Riêng BNSCMT lớp C3.3 (sau bình minh) không ảnh

hường đến biên độ và pha của tín hiệu NWC/19.8 kHz.



**Hình 1.** Đường truyền tín hiệu NWC/19,8 kHz từ North West Cape đến TNU



**Hình 2.** Sự thay đổi biên độ và pha của tín hiệu NWC/19.8 kHz khi có BNSCMT ngày 13/2/2014

Chuỗi BNSCMT lớp M1.7, C3.6 và M1.0 với cường độ tia X cực đại lần lượt tại: 06:08 UT, 07:10 UT và 08:13 UT (hình 3a). Chúng làm tăng biên độ sóng VLF lần lượt tại các thời điểm 6:09 UT, 07:14 UT và 8:15 UT. Sự thay đổi biên độ và pha tương ứng với các sự kiện BNSCMT lần lượt là 1,6 dB, 0 dB, 1 dB và 41,44°, 16,3°, 28,39°. Sau BNSCMT lớp M1.7, cường độ tia X đã quay về mức ban đầu, biên độ giảm xuống dưới mức bình thường. Trong thời gian bắt đầu pha hồi phục,

sự kiện BNSCMT lớp C3.6 xuất hiện và biên độ tăng lên xấp xỉ bằng với biên độ trong điều kiện bình thường. Biên độ đang trong giai đoạn hồi phục thì BNSCMT lớp M1.0 diễn ra làm tăng mạnh biên độ sóng VLF.

Phần mềm GetData Graph Digitizer được sử dụng để xác định biên độ và pha trong điều kiện yên tĩnh ( $P_q$ ,  $A_q$ ) và trong điều kiện nhiễu loạn ( $P_p$ ,  $A_p$ ). Từ đó, các giá trị biên độ nhiễu loạn ( $\Delta A$ ), pha nhiễu loạn ( $\Delta P$ ) được tính như sau (Grubor et al., 2008):

$$\Delta P = P_p - P_q \quad (1)$$

$$\Delta A = A_p - A_q \quad (2)$$

Các giá trị  $\Delta P$  và  $\Delta A$  được cộng với biên độ ( $A_{sq}$ ) và pha ( $P_{sq}$ ) mô phỏng trong điều kiện bình thường bằng chương trình LWPC:

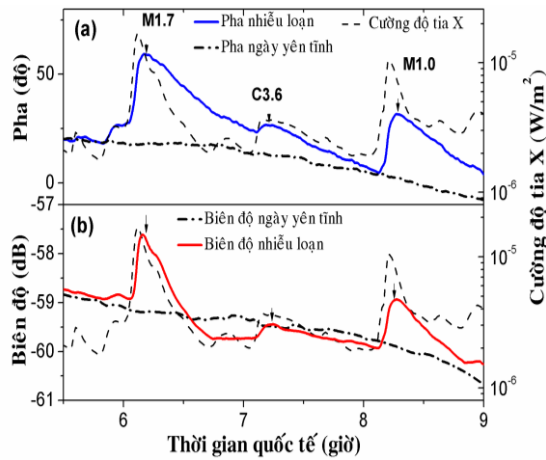
$$P_{sp} = P_{sq} + \Delta P \quad (3)$$

$$A_{sp} = A_{sq} + \Delta A \quad (4)$$

Thông số đầu vào  $A_{sp}$  và  $P_{sp}$  được đưa vào chương trình LWPC để tính các thông số  $h'$ ,  $\beta$  trong điều kiện điện ly nhiễu loạn. Để tính mật độ điện tử ở độ cao cho trước  $h$ , thay các giá trị  $h'$ ,  $\beta$  vào công thức tính mật độ điện tử (Wait and Spies, 1964):

$$N_e(h) = 1.43 \times 10^{13} \exp(-0.15h') \times \exp[(\beta - 0.15)(h - h')] \quad (5)$$

Mô hình của Wait và Spies, hay hàm mật độ điện tử theo độ cao được sửa dụng nhiều trong quan trắc lớp D bằng kỹ thuật VLF (Cummer et al., 1998; Thomson et al., 2007, 2009). Trong mô hình này,  $h'$  là độ cao tham chiếu quyết định đến độ cao phản xạ sóng VLF của lớp D và  $\beta$  quyết định đến độ dốc của profile mật độ điện tử. Chương trình LWPC (Ferguson, 1995) tính toán các thông số điện ly dựa trên mô hình của Wait và Spies. Sử dụng mô hình điện ly đồng nhất và sử dụng chương trình LWPC cho đường truyền NWC-TNU dài 3886 km, biên độ và pha của tín hiệu NWC/19.8 kHz trong điều kiện bình thường là 66,494dB và 288,899°, tương ứng với  $h' = 74,0$  km,  $\beta = 0,3 \text{ km}^{-1}$  và mật độ điện tử tại 74 km,  $N_e = 216 \text{ e/cm}^3$ .



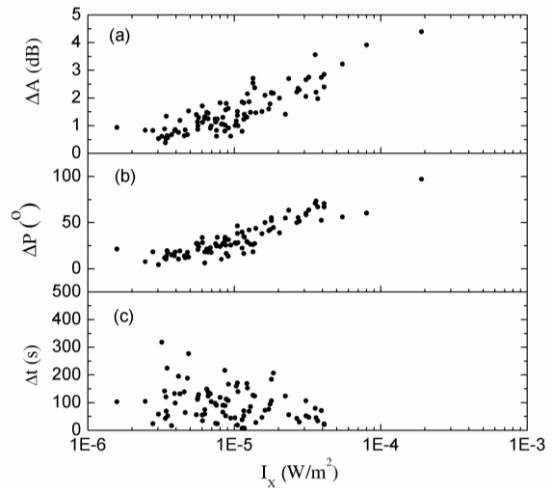
**Hình 3.** Hình ảnh phóng đại pha (a) và biên độ (b) sóng VLF trong điều kiện yên tĩnh và trong điều kiện có BNSCMT lớp M1.7, C3.6 và M1.0

**3. Kết quả nghiên cứu**

**3.1. Mối quan hệ giữa biên độ, pha nhiễu loạn và thời gian trễ với cường độ tia X**

Có 93 sự kiện BNSCMT ảnh hưởng lên sóng VLF mà máy thu ghi nhận được. Trong đó có 4 trường hợp pha của sóng VLF bất ổn định. Các lớp BNSCMT từ C1.5 đến X1.9 làm biên độ sóng VLF tăng từ 0,38 dB đến 4,40 dB và pha tăng từ 4,6° đến 97,2°. Biên độ nhiễu loạn ( $\Delta A$ ) và pha nhiễu loạn ( $\Delta P$ ) được biểu diễn có dạng hàm logarit của cường độ cực đại của tia X. Trục  $x$  trên hình 4 biểu diễn ở thang logarit cơ số 10. Phần lớn các đỉnh biên độ tín hiệu NWC/19.8 kHz xuất hiện sau đỉnh cường độ đỉnh tia X khoảng 8-319 giây. Mặc dù các điểm dữ liệu trên hình 4c phân tán mạnh nhưng thời gian trễ (khoảng thời gian giữa đỉnh

biên độ và đỉnh cường độ tia X) có xu hướng giảm khi cường độ tia X tăng.



**Hình 4.** Biểu diễn mối quan hệ biên độ, pha nhiễu loạn của tín hiệu NWC/19.8 kHz, thời gian trễ theo cường độ cực đại tia X của 93 sự kiện BNSCMT

**3.2. Sự thay đổi thông số Wait khi có bùng nổ sắc cầu Mặt Trời**

Bảng 1 trình bày ví dụ các sự kiện BNSCMT tiêu biểu. Trong bảng 1, cột 1 chỉ ngày xảy ra sự kiện BNSCMT, cột 2 chỉ lớp BNSCMT, cột 3 chỉ thời điểm xuất hiện cực đại cường độ tia X ( $t_x$ ), cột 4 chỉ thời điểm xuất hiện cực đại biên độ VLF ( $t_A$ ), cột 5 chỉ các giá trị  $\Delta A$ , cột 6 chỉ các giá trị  $\Delta P$ , cột 7 chỉ góc thiên đỉnh ( $\chi$ ) ứng với thời điểm có cường độ tia X đạt cực đại, cột 8 và 9 chỉ giá trị  $h'$  và  $\beta$ . Góc thiên đỉnh được tính toán cho vị trí máy thu tại các thời điểm cường độ tia X đạt giá trị cực đại.

**Bảng 1.** Ví dụ các sự kiện BNSCMT

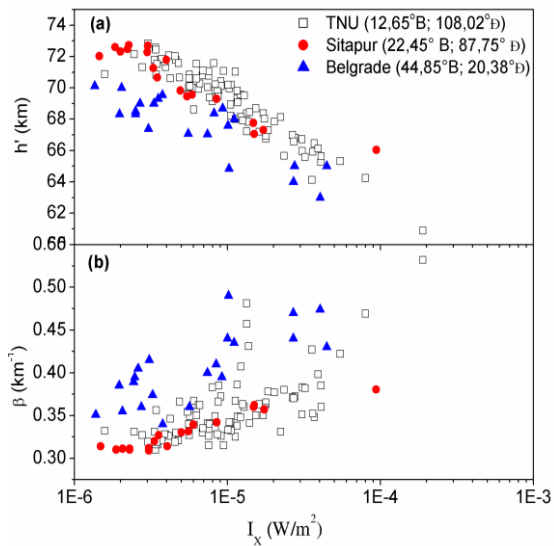
Ngày	BNMT	$t_x$ (UT)	$t_A$ (UT)	$\Delta A$ (dB)	$\Delta P$ (°)	$\chi$ (°)	$h'$ (km)	$\beta$ (km <sup>-1</sup> )
7/1	M1.1	3:53	3:54	1.23	35.17	38	69.3	0.34
13/2	M1.8	1:40	1:43	2.18	44.59	56	67.3	0.38
13/2	C7.5	2:30	2:31	0.83	24.77	46	70.8	0.33
13/2	M1.0	2:51	2:54	1.17	27.48	42	70.0	0.34
13/2	M1.7	6:08	6:09	1.60	41.44	31	68.4	0.35
13/2	M1.0	8:13	8:15	1.00	28.38	54	70.2	0.33
14/2	C6.8	4:30	4:32	0.91	22.96	27	70.8	0.33
6/11	M5.4	3:46	3:41	3.22	56.11	31	65.3	0.42
7/11	M2.7	2:49	2:47	2.35	55.56	38	66.6	0.37
7/11	M2.0	4:25	4:22	2.00	38.89	29	67.8	0.38

Từ hình 5, có thể thấy rằng, khi cường độ tia X tăng, độ cao tham chiếu  $h'$  giảm từ 72,8km đến

60,9km và hệ số  $\beta$  tăng từ 0,31 đến 0,53 km<sup>-1</sup>. Độ cao tham chiếu và sự thay đổi biên độ và pha sóng

VLF có hệ số tương quan lần lượt là -0,95 và -0,94. Trong khi đó gradient mật độ điện tử và sự thay đổi biên độ và pha sóng VLF có hệ số tương quan lần lượt là 0,90 và 0,50.

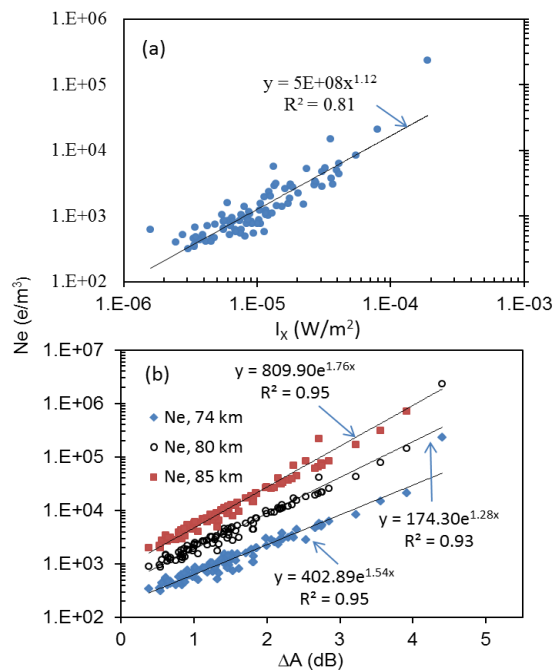
Từ hình 5b thấy rằng các giá trị của thông số  $\beta$  trong công trình và của Basak và Chakrabarti (2013) (tại cùng chuỗi BNSCMT) thấp hơn kết quả tính toán của Grubor và nnk (2008), nhưng ngược lại thông số  $h'$  trong kết quả của công trình và của Basak và Chakrabarti (2013) lại cao hơn so với kết quả tính toán của Grubor và nnk (2008).



**Hình 5.** So sánh các thông số Wait, độ cao tham chiếu (a) và gradient mật độ điện tử (b) tương ứng với 89 sự kiện BNSCMT quan sát tại TNU với các kết quả quan sát tại Belgrade (Serbia) và Sitapur (India)

### 3.3. Sự thay đổi mật độ điện tử khi có bùng nổ sắc cầu Mặt trời

Từ hình 6a, mật độ điện tử tăng theo  $I_X$  với dạng hàm mũ cơ số là cường độ tia X. Hình 6b cho thấy sự thay đổi mật độ điện tử tại các độ cao (74km, 80km và 85km) có mối quan hệ dạng hàm mũ cơ số e với sự thay đổi biên độ sóng VLF với hệ số xác định cao  $R^2 = 0,93 - 0,95$ . Với mối quan hệ này, ta có thể nội suy được sự thay đổi mật độ điện tử khi biết được sự thay đổi biên độ sóng VLF khi có BNSCMT.

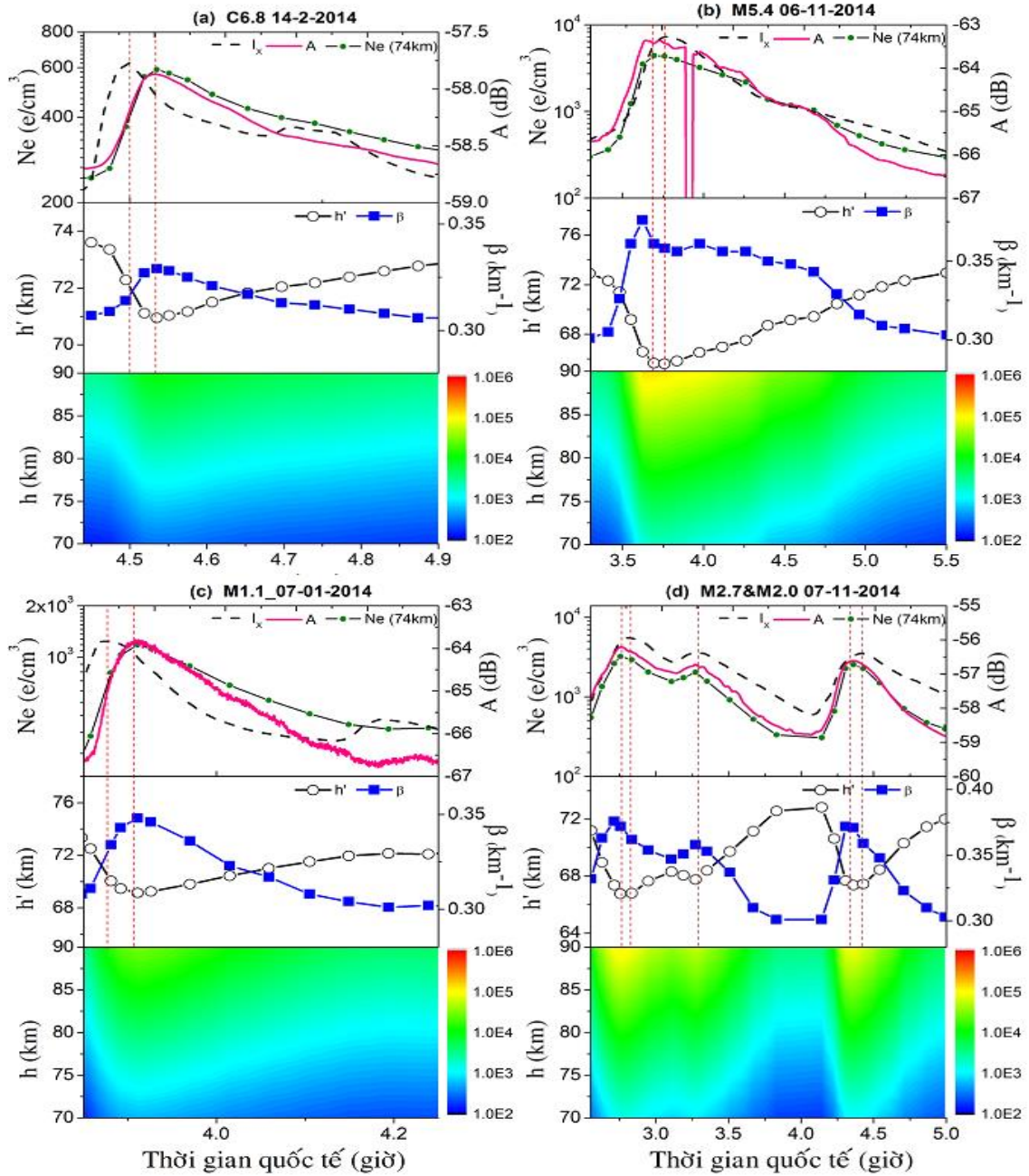


**Hình 6.** Sự thay đổi mật độ điện tử theo cường độ tia X của 89 sự kiện BNSCMT (a). Mối quan hệ giữa mật độ điện tử tại các độ cao khác nhau và biên độ nhiễu loạn (b)

Trong 93 trường hợp BNSC có 8 trường hợp BNSCMT mà đỉnh biên độ VLF xuất hiện trước đỉnh cường độ tia X. Cơ chế của nó chưa được giải thích thấu đáo (Kumar, 2007). Chúng tôi phân tích 4 sự kiện BNSCMT tiêu biểu xảy ra trong hai trường hợp  $\Delta t > 0$  và  $\Delta t < 0$  để so sánh (với  $\Delta t$  là thời gian trễ giữa đỉnh biên độ VLF và đỉnh cường độ tia X:  $\Delta t = t_X - t_A$ ).

Cường độ tia X khi có BNSCMT, biên độ sóng VLF (A), các thông số  $h'$ ,  $\beta$ , mật độ điện tử,  $N_e$  ( $e/cm^3$ ) của các sự kiện BNSCMT được biểu diễn theo thời gian ở hình 7. Các trường hợp đỉnh biên độ nhiễu loạn xuất hiện sau đỉnh cường độ tia X (các BNSCMT lớp C6.8 ngày 14/2/2014, M1.1 ngày 7/01/2014) được trình bày ở hình 7a, c. Các đỉnh biên độ VLF xuất hiện trước đỉnh cường độ tia X (các BNSCMT lớp M5.4 ngày 6/11/2014 và chuỗi BNSCMT lớp M2.7 và M2.0 ngày 7/11/2014) được biểu diễn ở các hình 7b, d.





Hình 7. Sự thay đổi theo thời gian của mật độ điện tử và các thông số  $h'$ ,  $\beta$  khi có BNSCMT

### 3.3.1. Trường hợp $\Delta t > 0$

BNSCMT lớp C6.8 ngày 14/2/2014 (hình 7a) có đỉnh tia X xuất hiện lúc 4:30 UT và sau 2 phút, biên độ VLF đạt cực đại. Ở 70 km, mật độ điện tử cực đại khoảng  $10^3 e/cm^3$  và tăng khoảng  $10^1$  so

với mật độ điện tử ở điều kiện yên tĩnh ( $\sim 10^2 e/cm^3$ ). Ở độ cao 90 km, mật độ điện tử cực đại khoảng  $10^4 e/cm^3$  tăng  $10^1$  lần so với mật độ điện tử ở điều kiện yên tĩnh ( $\sim 10^3 e/cm^3$ ). So với điều kiện yên tĩnh, giá trị  $h'$  giảm một lượng  $\Delta h' = 2,6$  km và  $\beta$  tăng một lượng  $\Delta\beta = 0,02$   $km^{-1}$ .

BNSCMT lớp M1.1 ngày 7/01/2014 (hình 7c) làm thay đổi mật độ điện tử của lớp D tương tự như lớp C6.8 và có  $\Delta h' = 4,2$  km,  $\Delta\beta = 0,05$  km<sup>-1</sup>. Trong hai sự kiện BNSCMT trên, thời điểm  $h'$  cực tiểu và  $\beta$  cực đại trùng với thời điểm biên độ VLF đạt cực đại. Sau đỉnh cực đại mật độ điện tử, các giá trị  $h'$  tăng dần và  $\beta$  giảm dần và môi trường điện ly dần dần trở về trạng thái ban đầu.

### 3.3.2. Trường hợp $\Delta t < 0$

Trong các sự kiện BNSCMT ngày 6 và 7 tháng 11, thông số  $h'$  cực tiểu ở giữa thời điểm biên độ VLF đạt cực đại và thời điểm cường độ tia X cực đại.  $\beta$  đạt cực đại sớm hơn thời điểm cực đại của mật độ điện tử. Điều đó có nghĩa là tốc độ sinh mật độ điện tử tăng rất nhanh đối với các trường hợp BNSCMT có cường độ mạnh nhưng do quá trình tái hợp và kết hợp không cho phép mật độ điện tử tiếp tục tăng. Có thể cường độ tia X chưa đạt đến cực đại nhưng cũng đủ làm cho sự ion hóa lớp D bão hòa sớm. Riêng sự kiện BNSCMT lớp M5.4 (hình 7b), sau cực đại mật độ điện tử,  $h'$  tiếp tục giảm và cực tiểu xuất hiện ngay thời điểm cực đại của cường độ tia X ( $h'$  giảm một lượng  $\Delta h' = 7,3$  km). Đối với sự kiện BNSCMT mạnh này, ở 70 km, mật độ điện tử cực đại khoảng  $10^3$  e/cm<sup>3</sup> và tăng khoảng  $10^1$  so với mật độ điện tử ở điều kiện yên tĩnh ( $\sim 10^2$  e/cm<sup>3</sup>) và ở độ cao 90 km, mật độ điện tử cực đại khoảng  $10^5$  e/cm<sup>3</sup>, tăng  $10^2$  lần so với mật độ điện tử ở điều kiện yên tĩnh ( $\sim 10^3$  e/cm<sup>3</sup>). Sự thay đổi  $h'$  và  $\beta$  đối với chuỗi BNSCMT lớp M2.7 và M2.0 ngày 7/11/2014 (hình 7d) tương tự như trường hợp BNSCMT lớp M5.4 ngày 6/11/2014.

## 4. Thảo luận

Có thể thấy rằng đối với đường truyền NWC-TNU (3886 km), thuộc loại đường truyền ngắn, thì độ cao tham chiếu và các giá trị  $\Delta A$  và  $\Delta P$  có mối tương quan rất mạnh (hình 4). Kết quả này phù hợp với nghiên cứu của Thomson và nnk (2001). Sự thay đổi của các thông số Wait theo cường độ tia X trong công trình khá phù hợp kết quả khảo sát thông số Wait tại vĩ độ thấp của Basak và Chakrabarti (2011) (hình 5). Xét trong cùng chuỗi BNSCMT từ lớp C đến lớp M, có thể kết luận rằng, độ cao phản xạ  $h'$  ở vĩ độ thấp và vùng xích đạo cao hơn  $h'$  ở vĩ độ trung bình và có kết quả ngược lại đối với  $\beta$ . Điều này có thể do phần lớn

đường truyền NWC-TNU đi qua vùng trung của vùng dị thường xích đạo từ. Do đó, sự thay đổi mật độ điện tử lớp D vào ban ngày khi có BNSCMT ở vùng này ít mạnh mẽ hơn so với các vùng lân cận. Các giá trị  $\beta$  của công trình và của Grubor và nnk (2008) bị phân tán mạnh vì dữ liệu quan sát trong cả trường hợp góc thiên đỉnh lớn và do đó kết quả sẽ bị ảnh hưởng đáng kể của hiện tượng hoàng hôn và bình minh.

Sự tăng mật độ điện tử theo cường độ tia X (hình 6a) được giải thích như sau. Theo mô hình của Turunen, các ion hydrat có tốc độ kết hợp lớn hơn trường hợp của các ion đơn giản (Turunen et al., 1992). Bằng phép đo thực nghiệm, các công trình của Collis và nnk (1996), Rogers và Peden (1975) đã chứng minh rằng đối với các ion NO<sup>+</sup> và O<sub>2</sub><sup>+</sup> có hệ số tái hợp hiệu dụng  $\sim 10^{-13}$  m<sup>3</sup>/s còn đối với các ion hydrat có hệ số tái hợp hiệu dụng trong khoảng  $\sim 10^{-12} - 10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s. Ở lớp D, các thành phần NO<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup> là những ion đa số nhưng ở dưới 80 km hoặc 85 km, lớp D có các thành phần hydrat: H<sup>+</sup>.H<sub>2</sub>O, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>.H<sub>2</sub>O và hydrat của NO<sup>+</sup> (Hargreaves, 1992). Ion hydrat được hình thành theo sơ đồ NO<sup>+</sup> → NO<sup>+</sup>.CO<sub>2</sub> → H<sup>+</sup>(H<sub>2</sub>O)<sub>3</sub>. Nhưng khi có BNSCMT thì các ion hydrat quay trở lại O<sub>2</sub><sup>+</sup> và NO<sup>+</sup> (Mitra and Rowe, 1972). Như vậy, BNSCMT làm cho mật độ ion hydrat giảm dẫn đến hệ số tái hợp giảm. Do vậy, tốc độ sinh điện tử trong lớp D tăng trong điều kiện có BNSCMT.

Ở hình 7, sự biến đổi của mật độ điện tử và hệ số  $\beta$  theo đáng điệu biến đổi của biên độ VLF chứ không theo đáng điệu biến đổi của cường độ tia X. Sự thay đổi  $h'$  và  $\beta$  theo thời gian rất đối xứng nhau. Pha hồi phục của sự kiện BNSCMT lớp M5.4 kéo dài đến hơn 2 giờ trong khi pha hồi phục của các lớp C6.8 và M1.1 chỉ kéo dài 20 - 25 phút. Ở hình 7 trong các sự kiện BNSCMT, có thể thấy hình dạng biến đổi mật độ điện tử theo thời gian giữ nguyên hình dạng của nó theo độ cao. Mật độ điện tử tăng gấp  $10^1 - 10^2$  lần so với điều kiện yên tĩnh. Sự biến đổi của các đới màu theo đáng điệu biến đổi của độ cao tham chiếu  $h'$ . Càng lên cao thì sự hồi phục của môi trường điện ly về trạng thái cũ càng chậm. Phương pháp mô phỏng mật độ theo thời gian trong quá trình BNSCMT của Žigman và nnk (2007) khó áp dụng cho các vụ bùng nổ liên tiếp và góc thiên đỉnh thay đổi rất lớn. Ngoài ra, khi  $\Delta t < 0$  thì phương trình liên tục vô nghiệm.

Phương pháp mô phỏng dùng chương trình LWPC trở nên rất hiệu quả cho những trường hợp này.

## 5. Kết luận

Ghi nhận 93 sự kiện BNSCMT sử dụng sóng NWC/19,8 kHz từ Australia tại TNU (12,65° B) để nghiên cứu ảnh hưởng của BNSCMT lên lớp D tầng điện ly. Chúng tôi có thể kết luận như sau:

Các lớp BNSCMT từ C1.5 đến X1.9 làm biên độ sóng VLF tăng từ 0,38 dB đến 4,40 dB và pha tăng từ 4,6° đến 97,2°. Biên độ nhiễu loạn, pha nhiễu loạn và cường độ cực đại của tia X có quan hệ với dạng hàm logarit. Phần lớn các đỉnh biên độ tín hiệu VLF xuất hiện sau cường độ đỉnh tia X khoảng từ 8 đến 319 giây. Thời gian trễ có xu hướng giảm khi cường độ tia X tăng.

Khi cường độ tia X tăng, độ cao tham chiếu  $h'$  giảm từ 72,8 km đến 60,9 km và hệ số  $\beta$  tăng từ 0,31 km<sup>-1</sup> đến 0,53 km<sup>-1</sup>. Các giá trị  $h'$  ở vĩ độ thấp cao hơn  $h'$  ở vĩ độ trung bình, còn  $\beta$  có kết quả ngược lại. Sự thay đổi mật độ điện tử tăng theo cường độ tia X với dạng hàm mũ cơ số là cường độ tia X. Ngoài ra, sự thay đổi mật độ điện tử và biên độ nhiễu loạn của sóng VLF có mối quan hệ dạng hàm mũ với hệ số xác định cao  $R^2 = 0,93 - 0,95$ .

Phân tích 4 sự kiện BNSCMT, thấy rằng:

- Đối với trường hợp  $\Delta t > 0$ : Thời điểm  $h'$  cực tiểu và  $\beta$  đạt cực đại trùng với thời điểm biên độ VLF đạt cực đại. Sau cực đại mật độ điện tử, các giá trị  $h'$  tăng dần và  $\beta$  giảm dần và môi trường điện ly dần dần trở về trạng thái ban đầu.

- Đối với trường hợp  $\Delta t < 0$ : thông số  $h'$  cực tiểu ở giữa thời điểm biên độ VLF đạt cực đại và thời điểm cường độ tia X cực đại.  $\beta$  đạt cực đại sớm hơn thời điểm cực đại của mật độ điện tử. Điều này cho thấy tốc độ ion hóa lớp D tăng rất nhanh đối với các trường hợp BNSCMT mạnh.

- Trong cả hai trường hợp trên, sự biến đổi của mật độ điện tử và hệ số  $\beta$  theo xu hướng biến đổi của biên độ tín hiệu VLF. Sự thay đổi  $h'$  và  $\beta$  theo thời gian rất đối xứng nhau. Sự biểu diễn mật độ điện tử thay đổi theo độ cao và thời gian cho cái

nhìn tổng thể về phản ứng của lớp D khi có BNSCMT.

## Lời cảm ơn

Tác giả xin chân thành cảm ơn đến TS. Jame Brundbell đã giúp đỡ tận tình cho tác giả cài đặt hệ máy thu UltraMSK. Trong bài báo này có sử dụng dữ liệu tia X của Trung tâm quốc gia dữ liệu Địa Vật lý, Mỹ (US National Geophysical Data Center).

## Tài liệu dẫn

- Basak, T. & Chakrabarti, S. K., 2013: Effective recombination coefficient and solar zenith angle effects on low-latitude D-region ionosphere evaluated from VLF signal amplitude and its time delay during X-ray solar flares, *Astrophys. Space Sci.*, 348, 315-326.
- Collis, P. N., Hargreaves, J. K., White, G. P., 1996: A localised co-rotating auroral absorption event observed near noon using imaging riometer and EISCAT, *Ann. Geophys.*, 14, 1305-1316.
- Cummer, S. A., Inan, U. S. and Bell, T. F., 1998: Ionospheric D region remote sensing using VLF radio atmospherics, *Radio Sci.*, 33(6), 1781-1792.
- Dahlgren, H., Sundberg T., Andrew B. C., Koen E., and Meyer S., 2011: Solar flares detected by the new narrowband VLF receiver at SANAE IV, *S Afr. J. Sci.*, 107, 1-8.
- Ferguson, J. A., 1995: Ionospheric model validation at VLF and LF, *Radio Sci.*, 30(3), 775-782.
- Grubor, D., Šulic D. and Žigman V., 2008: Classification of X-ray solar flares regarding their effects on the lower ionosphere electron density profile, *Ann. Geophys.*, 26, 1731-1740.
- Gustafsson, M., 2011: Detection of solar flare induced ionospheric perturbations on narrowband VLF transmissions, Thesis of Master, KTH School of Electrical Engineering, Stockholm, Sweden.
- Hargreaves, J. K., 1992: The Solar - Terrestrial environment. Cambridge University Press, pp. 420.
- Kumar, A., 2007: Amplitude and phase study of sub-ionospheric VLF radio signal receiver at Suva, Master thesis, The University of the South Pacific, Suva, Fiji.
- Mitra, A. P. & Rowe, J. N., 1972: Ionospheric effects of solar flares. VI. Changes in D-region ion chemistry during solar flares, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 34 (5), 795-806.



- Mitra, A. P., 1974: Ionospheric Effects of Solar Flares. D. Reidel, Dordrecht, Holland.
- Rogers, J. C., Peden I. C., 1975: The VLF complex permittivity of deep Antarctic ice measured in situ, *Radio Sci.*, 10, 763-771.
- Scherrer, D., Mitchell, R., Huynh, T., Lord, W., and Lord, M., 2009: SuperSID manual - Space weather monitor, Stanford University Solar Center.
- Tan M. L., Thu N. N., Ha T. Q., 2014: Observation of the effects of solar flares on the NWC signal using the new VLF receiver at Tay Nguyen University, *Sun & Geosphere*, 8(1), 27-31.
- Thomson, N. R., & McRae, W. M., 2009: Nighttime ionospheric D region: Equatorial and nonequatorial, *J. Geophys. Res.*, 114, A08305.
- Thomson, N. R., Clilverd, M. A., 2001: Solar flare induced ionospheric D-region enhancements from VLF amplitude observations, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 63, 1729-1737.
- Thomson, N.R., Clilverd, M.A., McRae, W.M., 2007: Nighttime ionospheric D region parameters from VLF amplitude and phase, *J. Geophys. Res.*, 112.
- Turunen, E., Matveinen, H. and Ranta, H., 1992: Sodankyla Ion Chemistry (SIC) Model, Sodankyla Geophysical Observatory, Rept. 49, Sodankyla, Finland.
- Wait, J. R. and Spies K. P., 1964: Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves. *NBS Tech. Not.*, pp. 300.
- World Meteorological Organization (WMO), 2009: The Potential Role of WMO in Space Weather. Accessed 2009.
- Žigman, V., Grubor D. and Šulic D., 2007: D-region electron density evaluated from VLF amplitude time delay during X-ray solar flares, *J. Atmos. Sol. Terr Phys.*, 69 (7), 775-792.
- <http://www.ultramsk.com/>
- <http://legacy-www.swpc.noaa.gov/info/Radio.pdf>