

اثر توفان مغناطیسی بر لایه‌های یونسپهری (یونسفری)

فرزاد شیرزادی تبار^{۱*} و ناصر حسین زاده گویا^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانشیار گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۵، ۲، ۲۷، پذیرش نهایی: ۸۶، ۱، ۱۷)

چکیده

ورود ذرات باردار به یونسپهر، می‌تواند تغییراتی در غلظت الکترونی لایه‌های یونسپهری به وجود آورد. در روزهای آرام مغناطیسی، ذرات باردار موسوم به باد خورشیدی که از خورشید به سمت زمین می‌وزند می‌توانند به صورت محدودی در مناطق قطبی زمین به جو زمین وارد شوند. اما تعداد ذرات ورودی به جو زمین در هنگام اختلال‌های شدید در خورشید و به علت سرعت زیادی که این ذرات در این زمان‌ها دارند خیلی بیشتر می‌شود. بنابراین تغییرات شدیدی در یونسپهر در هنگام وقوع چنین اختلال‌های رخ می‌دهد. در این مقاله اثرات وقوع توفان مغناطیسی بر لایه‌های D و E بحث شده و این اثرات بر لایه F₂ ناشی از توفان‌های مغناطیسی در روزهای ۱۸ اوت ۲۰۰۲ برای رصدخانه جولیوسرا در آلمان و ۱۵ مه ۲۰۰۵ در رصدخانه اسلاو انگلستان مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. کاهش چگالی یا غلظت الکترونی لایه F₂ در زمان‌های بعد از وقوع توفان مغناطیسی، به خصوص در هنگام شب، به طور واضح قابل مشاهده است.

واژه‌های کلیدی: توفان مغناطیسی، غلظت الکترونی، بسامد بحرانی، باز ترکیب، ترکیب گرم‌سپهری

The effect of magnetic storms on ionospheric layers

Shirzaditabar, F¹. and Hosseinzadeh Guya, N².

¹M.Sc student of Geophysics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²Associate Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 17 May 2006, Accepted: 8 Sep 2007)

Abstract

Dynamic processes in the sun, such as solar flares, transmit plasma of charged particles, especially electron and proton, and associated fields into the earth's surroundings that cause geomagnetic disturbances on the earth's surface, called magnetic storms.

On magnetic quiet days, moving charged particles, called solar wind, can restrictedly enter into the earth's atmosphere in the polar regions. On disturbed magnetic days, more particles at high speed can influence the earth's atmosphere and affect the ionospheric layers.

During a magnetic storm, energy enters into the ionosphere at high latitudes that can change some thermospheric parameters such as atomic and molecular composition, temperature and circulation. Composition changes directly affect the electron concentration in the F₂ layer, and circulation propagates the warm gas into the lower latitudes. Increasing thermospheric temperature expands the F₂ layer and then the layer establishes at higher altitude and the electron concentration decreases (Campbell, 1997).

The most intensive disturbances of the ionospheric layers occur during magnetic disturbances. They have a catastrophic effect in the auroral zone and the application of the normal laws is impossible. During such a disturbance, corpuscular emission, originating on the sun penetrates the atmosphere of the earth, usually in a belt between 55° to 80° of geomagnetic latitude. It generally hits the night side of the earth. Chapman and Ferraro (1930) have shown that the corpuscular emission must consist of an equal number of charges of both signs and therefore appear in general as conducting but uncharged.

A magnetic disturbance in the auroral zone begins usually in the evening, with oscillations of the magnetic field. Simultaneously, aurorae borealis occur which are usually band-shaped. Strong reflections from the E-level appear in a wide frequency range often attaining 10 MHz. F-reflections do not occur since the auroral E-layer blankets the higher layers.

In the course of the disturbances, the penetrating corpuscular emission often becomes harder, ionization shifts downward and the damping increases. For periods of a few minutes no reflections at all can be observed (polar blackout). Such conditions may predominate for many hours, especially during very serious disturbances. The reflections from the E-level also cease in the case of less serious disturbances shortly after midnight due to the decrease in corpuscular emission. The auroral lights diminish simultaneously and then cease entirely. During this second phase of the disturbance which lasts at least until dawn, no echoes at all can be observed. The E-reflections stop with the cessation of corpuscular emission; F-echoes also do not exist anymore as this layer was dissolved in the course of the disturbance (Rawer, 1956).

In the polar regions the main effects of ionospheric storms are the increases in the electron concentrations in the E and D regions: they can be understood in outline in terms of the energetic electrons that also produce the aurora. At lower latitudes, however, the changes in the D region take a different form and there are conspicuous changes in the F layer.

A storm usually results in significant changes in the F layer all over the world; at most latitudes the concentration of electrons is decreased, although, within a few degrees of the geomagnetic equator, it is often increased. These changes have not been properly explained. The decrease is the most surprising. One type of explanation ascribes it to an increase in the rate of loss of electrons. In the F region that loss involves reactions of the type $O^+ + N_2 \rightarrow N_2^+ + O$, with a rate $k[N_2][O^+]$: this rate could be increased during a storm either because k increases or because $[N_2]$ increases. Laboratory measurements suggest that k increases with temperature and since the temperature is known to increase during a storm the decrease of electron concentration would be explained.

Those who ascribe the storm phenomenon to an increase in the concentration of molecular nitrogen suggest that during a storm the entry of particles into the low polar ionosphere excites gravity waves that then travel into the F region at lower latitudes where they mix the atmospheric constituents.

Still another suggestion is that the modification of the ionospheric current system that shows itself as the polar electrojet is accompanied by an electric field that extends into the F region at lower latitudes and there causes the ionospheric plasma to move downwards to levels where the rate of loss is greater.

To explain an increase in the F region electron content, of the kind that is often observed near the equator during storms, it has been suggested that at those times the ionosphere is moved upwards to places where the rate of loss of electrons is smaller. The movement might be caused by the electric field of the dynamo below, so that the F region acts like an atmospheric motor. It might also be caused by a wind in the neutral air, blowing from the poles towards the equator, so as to move the ionization upwards along

the sloping lines of force (Ratcliff, 1972).

Key words: Magnetic storms, Electron concentration, Critical frequency, Recombination, Thermosphere composition

۱ مقدمه

می‌شود و آن را در ارتفاع بالاتری قرار می‌دهد و از غلظت الکترون آن می‌کاهد.

اما یونسپهر در نقش بازتابنده امواج رادیویی نقش مهمی در ارتباطات رادیویی و مخابرات بازی می‌کند. نفوذ ذرات باردار به یونسپهر در هنگام وقوع یک توفان مغناطیسی که ناشی از اختلال‌های خورشیدی است، موجب ایجاد تغییرات شدیدی در لایه‌های یونسپهر می‌شود که در نتیجه آن اختلالاتی در سامانه ارتباطات رادیویی روی زمین ایجاد می‌شود و حتی بعضی مواقع ممکن است قطع این ارتباطات را در پی داشته باشد. شدت این تغییرات در یونسپهر در عرض‌های مختلف، متفاوت صورت می‌گیرد. کاهش بسامد بحرانی برای لایه F در بیشتر عرض‌ها و نیز افزایش غلظت الکترونی در نواحی قطبی برای لایه‌های D و E حتی ممکن است تا چند روز بعد از اختلال شدید مغناطیسی هم ملاحظه شود.

۲ توفان مغناطیسی

فرایندهای پویا در خورشید، مثل زبانه‌های خورشیدی، پلاسمایی از ذرات باردار، به‌خصوص الکترون و پروتون، و میدان‌های مرتبط با آنها را به محیط اطراف زمین می‌فرستند که باعث اختلال‌های ژئومغناطیسی در سطح زمین می‌شوند و به توفان‌های ژئومغناطیسی معروف‌اند. در عرض‌های متوسط و پایین، خیلی از توفان‌ها ظاهر یکسانی روی مؤلفه H میدان مغناطیسی کره زمین نشان می‌دهند. این تغییرات میدان مغناطیسی روی نوارهای ثبت رصدخانه‌های مغناطیسی درج می‌شوند (کمپبل، ۱۹۹۷). این توفان با شروعی ناگهانی که بعضی اوقات آن را

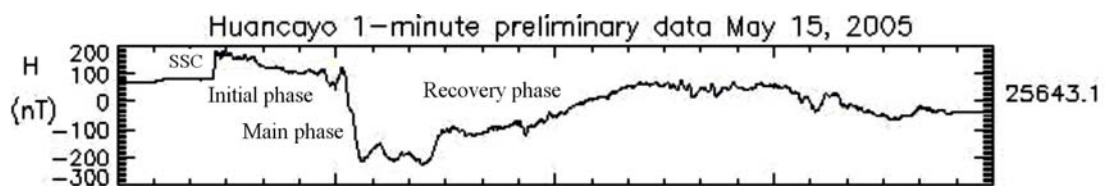
یونسپهر قسمتی از جو زمین است که در ارتفاعات بالاتر از حدود ۶۰ کیلومتر در اثر تابش خورشیدی به صورت پرتوی ایکس، فرابنفش و گسیل ذره‌ای ایجاد می‌شود. در اثر برهم‌کنش این تابش‌ها و جو زمین، الکترون‌ها از مولکول‌ها یا اتم‌های موجود در آن ارتفاعات جدا می‌شوند و می‌توانند به صورت آزاد در میدان مغناطیسی زمین حرکت کنند. بنابراین یونسپهر را می‌توان به‌مثابه لایه‌ای رسانا در نظر گرفت.

از طرفی خود یونسپهر بر حسب شدت و قدرت نفوذ تابش‌های خورشیدی، به بخش‌های متفاوتی تقسیم می‌شود: لایه D حدود ۶۰ تا ۹۰ کیلومتری، لایه E حدود ۹۰ تا ۱۴۰ کیلومتری، لایه F₁ حدود ۱۴۰ تا ۲۲۰ کیلومتری و لایه F₂ از حدود ۲۲۰ تا ۲۰۰۰ کیلومتری سطح زمین قرار دارند. لایه‌های D و E فقط در روز وجود دارند و لایه F₁ هم در شب با لایه F₂ یکی می‌شود. بنابراین آن لایه‌ای که همیشه در طول شبانه‌روز حضور دارد لایه F₂ است. این لایه مهم‌ترین نقش را در ارتباطات رادیویی دارد.

وجود تغییرات در یونسپهر در هنگام وقوع توفان مغناطیسی را بر پایه مفهومی اصلی می‌توان توضیح داد. در طول اختلال ژئومغناطیسی انرژی ورودی به داخل یونسپهر در عرض‌های بالا داریم که پارامترهای گرم‌سپهری، مثل ترکیب اتمی و مولکولی، دما و چرخش (circulation)، را تغییر می‌دهد. تغییرات ترکیب، مستقیماً غلظت الکترون در لایه F₂ را متأثر می‌کند و چرخش، گاز گرم شده را به عرض‌های پایین‌تر پراکنده می‌کند. افزایش دما در گرم‌سپهر هم منجر به انبساط گرمایی لایه F₂

بکشد. خیلی از توفان‌ها بدون این فاز اولیه رخ می‌دهند. نشانه بعدی توفان به فاز اصلی معروف است و در آن مؤلفه H میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد و برای زمان‌های طولانی‌تری و در دامنه‌های بزرگ‌تری نسبت به فاز اولیه تغییراتی را نشان می‌دهد. در نهایت در یک فاز بازیافت، میدان در یک زمان طولانی و به تدریج به سطح بدون اختلال بازمی‌گردد (کمپل، ۱۹۹۷). در شکل ۱ این سه فاز مشاهده می‌شوند.

SSC (Storm Sudden Commencement) می‌نامند، آغاز می‌شود و تقریباً در همه جای کره زمین به طور همزمان رخ می‌دهد. این SSC در اثر یک موج ضربه‌ای (shock wave)، که در اثر رسیدن پلاسمای خورشیدی با سرعت زیاد به مغناطیس‌سپهر (مگنتوسفر) شکل گرفته، ایجاد می‌شود. این SSC افزایش در میدان مغناطیسی شمال‌سو را در پی دارد که به فاز اولیه معروف است. این اثری فشارشی است و ممکن است تا چندین ساعت طول



شکل ۱. ثبت توفان مغناطیسی در رصدخانه هوانکایو، پرو، که فازهای متفاوت توفان در آن دیده می‌شود.

توفان، الکترون‌ها به طور پیوسته به پایین‌ترین منطقه D جابه‌جا شوند و در شب ضمن فرایندهای اتصال حذف اما دوباره با فرایند تفکیک در طول روز آزاد شوند، تغییرات یاد شده قابل درک خواهند بود. در بعضی اوقات نوع غیر طبیعی تغییر فاز به مدت ۱۰ تا ۱۵ روز بعد از توفان ادامه می‌یابد (راتکیف، ۱۹۷۲).

در طول فاز اصلی توفان، مقدار یون‌ها و الکترون‌های به دام افتاده در اطراف زمین افزایش زیادی دارد. با تزریق پلازما به میدان اطراف زمین، جدایی بار در طرف‌های طلوع و غروب مغناطیس‌سپهر صورت می‌گیرد که باعث ایجاد جریان‌هایی می‌شود بعضی از این جریان‌ها انرژی را بین مغناطیس‌سپهر و یون‌سپهر انتقال می‌دهند و باعث ایجاد شفق‌های قطبی و اختلال‌های یون‌سپهری می‌شوند.

۴ نفوذ اختلال‌های مغناطیسی در منطقه شفق قطبی

شفق شمالی (aurora borealis) لایه E

شدیدترین اختلال‌های لایه‌های یون‌سپهری در طول اختلال‌های مغناطیسی رخ می‌دهند. این اختلال‌ها اثرات شدیدی در منطقه شفق قطبی دارند و اعمال قوانین معمول را در لایه‌ها غیر ممکن می‌سازند. در طول چنین اختلالی، یک گسیل ذره‌ای، که از خورشید منشأ می‌گیرد، معمولاً در کمربند بین ۵۵ تا ۸۰ درجه عرض مغناطیسی، به جو زمین نفوذ می‌کند. این گسیل ذره‌ای ترجیحاً به طرف شب زمین برخورد می‌کند (این اثر همچنین نتیجه انحراف میدان مغناطیسی زمین است).

۳ اثر توفان بر ناحیه D

پدیده توفان در ناحیه D عرض‌های میانی، وقتی که تغییرات در فاز امواج رادیویی کم بسامد به طور عمودی از این ناحیه بازمی‌تابد، بسیار چشمگیر است. در زمان آرامش، فاز موج به‌طور ملایم و منظم در طول روز و شب تغییر می‌کند. در طول فازهای اولیه و اصلی توفان، تغییرات نامنظم‌اند. در طول فاز بازیافت توفان، تغییر روزانه فاز رادیویی با وضعیت معمول؛ تغییرات ناگهانی در طلوع و غروب جایگزین تغییر آرام معمول شده است. این تغییرات می‌توانند درک شوند اگر، در طی این قسمت از

برحسب شمار الکترون‌های پراثری که شفق قطبی را ایجاد می‌کنند تعریف می‌شوند. به هر حال در عرض‌های پایین‌تر، تغییرات در ناحیه D شکل متفاوتی به خود می‌گیرد و نیز تغییرات واضحی در لایه F وجود دارد (راتکلیف، ۱۹۷۲).

۵ نفوذ اختلال‌های مغناطیسی در لایه F₂

لایه E شفقی فقط در منطقه شفق قطبی نمایان می‌شود و در عرض‌های میانی صرفاً در طول رخداد بسیار نادر شفق قطبی شمالی پدیدار می‌شود. اثر اختلال‌های مغناطیسی بر لایه F₂ به‌طور چشمگیر به آن‌سوی منطقه شفق قطبی گسترش می‌یابد و بر رفتار لایه F₂ حتی در عرض‌های میانی تأثیر می‌کند. لایه F₂ در منطقه شفق قطبی کاملاً شکسته می‌شود و تا بعد از طلوع بعدی دیده نمی‌شود. در زمستان قطبی که خورشید طلوع نمی‌کند، چندین روز طول می‌کشد تا لایه دوباره تشکیل شود.

چگالی الکترونی بلافاصله بعد از شروع اختلال مغناطیسی (شکل‌های ۲ و ۴) کاهش می‌یابد (شکل‌های ۳ و ۵). گفتنی است که چگالی الکترون‌ها (Nm) و بسامد بحرانی foF₂ با رابطه $(foF_2)^2 = 1.24 \times 10^8 Nm$ به هم مربوط‌اند که در آن foF₂ برحسب MHz و NmF₂ برحسب m⁻³ هستند.

بعضی وقت‌ها در روز بعد از اختلال شدید مغناطیسی، لایه F₂ در ابتدا اصلاً دیده نمی‌شود، چون بسامد بحرانش کمتر از لایه F₁ است. همچنان که در شکل‌های ۳ و ۵ مشاهده می‌شود در طول روز بعد از اختلال شدید، لایه F₂ فقط مقداری یونیده خواهد بود و در طول چند شب بعدی هم بسامد بحرانی در حد خیلی کم باقی می‌ماند، این در حالی است که اختلال مغناطیسی دیگری رخ نداده است. چنین رفتارهایی ممکن است چند روز طول بکشد. مارتین (۱۹۵۳)، تشکیل میدان الکتریکی عمودی در لایه F₂ را پیشنهاد داده است که مرتبط با تشکیل جریان ذره‌ای

چپمن و فرارو (۱۹۳۰) روشن ساختند که گسیل ذره‌ای باید شامل مقداری مساوی از بارها از هر دو نوع (مثبت و منفی) باشد و بنابراین عموماً به‌مثابهٔ رسانا اما بدون بار به نظر می‌رسد.

ذراتی که با سرعت زیاد به جو زمین وارد می‌شوند بسیاری از فرایندهای برانگیختگی و یونش را در جو بالا به دنبال دارند و در نتیجه نورهای رنگینی به‌نام شفق قطبی پدید می‌آورند.

اختلال مغناطیسی در منطقه شفق قطبی معمولاً در هنگام عصر همراه با نوسان‌های شدید میدان مغناطیسی در آن منطقه شروع می‌شود. به‌طور هم‌زمان، شفق‌های شمالی پدید می‌آیند که معمولاً محدودند؛ بازتاب‌های قوی از سطح E در گستره بسامد عریض که اغلب به ۱۰MHz می‌رسد ظاهر می‌شوند. در لایه F بازتابی پدید نمی‌آید، چون لایه E، لایه‌های بالاتر را می‌پوشاند.

در طی اختلال، نفوذ گسیل ذره‌ای اغلب سخت‌تر می‌شود، یونش به سمت ارتفاعات کم جابه‌جا می‌شود و میرایی افزایش می‌یابد. در طول چند دقیقه هیچ بازتاب رادیویی دیده نمی‌شود (خاموشی قطبی، polar blackout). چنین شرایطی ممکن است چندین ساعت، مخصوصاً در طول اختلال‌ها، بسیار جدی، غالب شود.

بازتاب‌ها از سطح E در حالت اختلال با شدت کمتر کمی بعد از نیم شب به علت کاهش در گسیل ذره‌ای پایان می‌یابد. نورهای شفقی به‌طور هم‌زمان کاهش می‌یابند و سپس به‌طور کامل از بین می‌روند. در طول این مرحلهٔ دوم اختلال که حداقل تا طلوع ادامه می‌یابد، هیچ بازتابی مشاهده نمی‌شود. بازتاب‌ها از لایه E با توقف گسیل ذره‌ای قطع می‌شوند؛ انعکاس‌ها از لایه F هم در این زمان وجود ندارند. چنین لایه‌ای را لایه E شفقی (auroral E-layer) می‌نامند (راور، ۱۹۵۶).

در مناطق قطبی، اثرات اصلی توفان‌های یون‌سپهری افزایش در غلظت الکترونی در مناطق D و E است که

توفان، ورود ذرات به داخل یونسپهر قطبی پایینی، امواج گرانی (gravity waves) و هیدرومغناطیسی را برمی‌انگیزد. این ذرات بعداً به ناحیه F در عرض‌های پایین‌تر می‌رسند و با اجزا و عناصر جوی مخلوط می‌شوند.

توجیه دیگر این است که تقویت سامانه جریان یونسپهری که خود را به صورت الکتروجت قطبی (polar electrojet) نشان می‌دهد با میدانی الکتریکی همراه است که به درون ناحیه F در عرض‌های پایین‌تر گسترش دارد و در آنجا موجب می‌شود که پلاسما به طرف پایین و به سطوحی که سرعت‌های اتلاف بزرگ‌تراند حرکت کند.

برای توجیه افزایش در غلظت الکترونی ناحیه F، از نوعی که اغلب در نزدیکی استوا در طول توفان‌ها مشاهده می‌شود، این نظر مطرح شده است که در این زمان‌ها یون سپهر به طرف بالا و به مکان‌هایی که اتلاف الکترون‌ها کمتر است حرکت می‌کند (راتکلیف، ۱۹۷۲).

۶ نتیجه‌گیری

در هنگام ورود ذرات باردار به جو زمین، در اثر توفان‌های خورشیدی و مغناطیسی، غلظت‌های الکترونی در لایه‌های D و E، به‌خصوص در دو قطب، زیاد می‌شود. این امر موجب پوشیده شدن لایه می‌شود؛ یعنی در حقیقت امواج رادیویی که باید از لایه F₂ بازتابیده شوند در لایه‌های D و E ممکن است جذب شوند و انرژی خود را از دست بدهند و در واقع هیچ بازتابی نداریم. در عرض‌های میانی و پایینی هم نفوذ ذرات باردار به جو زمین باعث کاهش در غلظت الکترونی لایه F₂ می‌شود که این کاهش در طول شب، به علت اینکه سرعت اتلاف الکترون شدیدتر شده است، چشمگیرتر است. همچنین این کاهش در غلظت الکترونی شب هنگام می‌تواند تا چند روز پس از وقوع توفان مغناطیسی ادامه داشته باشد.

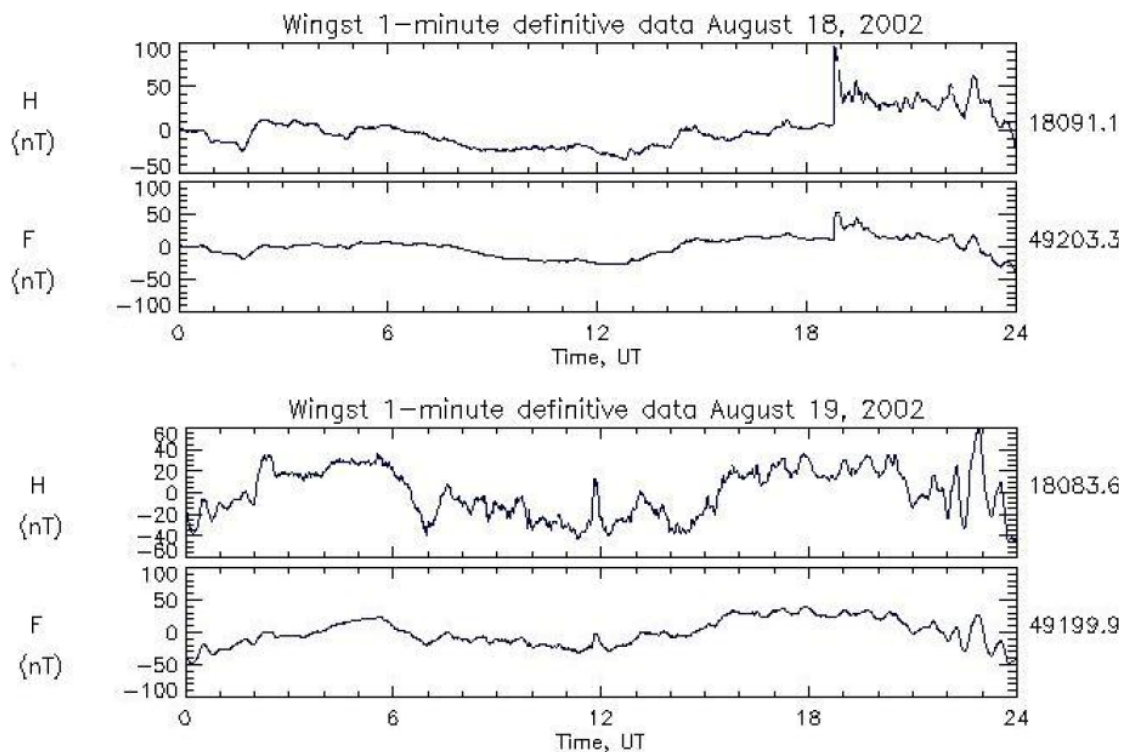
گردشی به دور زمین است و به نظر می‌رسد در طی اختلال‌های مغناطیسی ایجاد می‌شود.

در عرض‌های میانی، این تغییرات خیلی قوی نیستند و بنابراین دنبال کردن آنها به آسانی امکان‌پذیر است. به علاوه لایه E شفقی که مشاهده لایه F₂ را غیر ممکن می‌سازد در طول این زمان بحرانی پدیدار نمی‌شود.

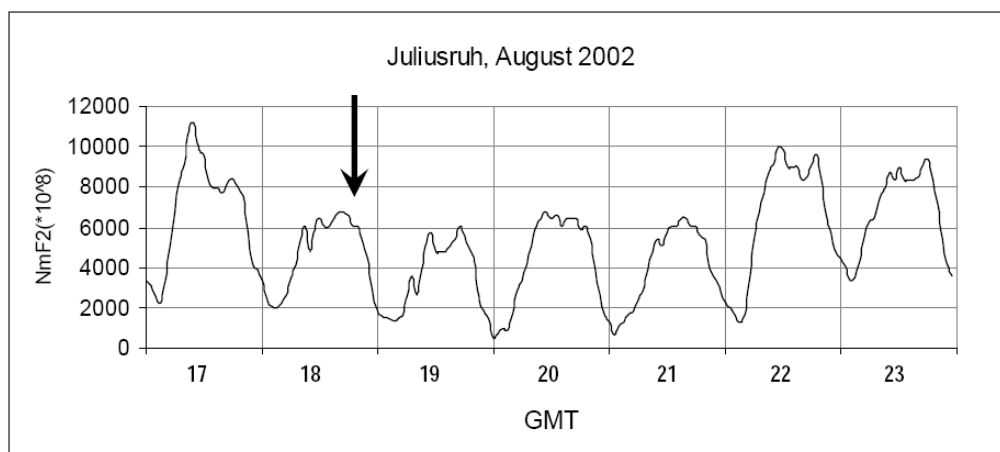
به سختی می‌توان کاهش سریع یونش را در طول یک اختلال با فرایندی غیر از فرایند حذفی (removal process) توضیح داد. با در نظر گرفتن یونزدایی آرام لایه F₂ در طول زمان‌های عادی، مشکل است که کاهش سریع یون‌ها در طول اختلال‌ها را با فرایندهای بازترکیب عادی (normal recombination) توضیح داد. احتمالاً تسریع در این فرایندها، مثلاً در نتیجه عمل سرعت‌بخش جریان ذره‌ای، ممکن است به عنوان توضیح این پدیده در نظر گرفته شود (راور، ۱۹۵۶).

توفان مغناطیسی معمولاً منجر به تغییرات چشمگیر در لایه F در سراسر جهان می‌شود؛ در بیشتر عرض‌ها غلظت الکترون‌ها کاهش می‌یابد، اگرچه در اطراف استوای مغناطیسی اغلب افزایش غلظت الکترون‌ها دیده می‌شود. از بین این دو تغییر، یعنی افزایش و کاهش غلظت الکترون، کاهش عجیب‌تر است. یکی از تفسیرها آن را به افزایش در سرعت اتلاف الکترون‌ها نسبت می‌دهد. در ناحیه F، فرایندهای اتلاف، مستلزم واکنش‌هایی از نوع $O^+ + N_2 \rightarrow N_2^+ + O$ با سرعت $k[N_2][O^+]$ است، حاصل ضرب فاکتور k در غلظت‌های نیتروژن مولکولی و اکسیژن اتمی، که این سرعت ممکن است در طی یک توفان به خاطر افزایش k یا افزایش $[N_2]$ افزایش یابد. k ضریبی است که با دما افزایش می‌یابد و چون دما در طول توفان روبه افزونی است، کاهش غلظت الکترونی را می‌توان توجیه کرد.

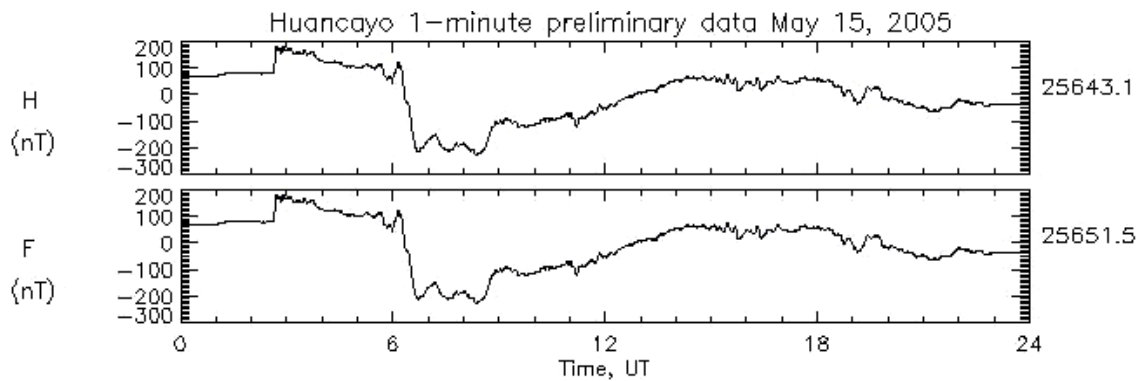
توجیه دیگر، پدیده توفان را به افزایشی در غلظت نیتروژن مولکولی نسبت می‌دهد، به نحوی که در طی یک



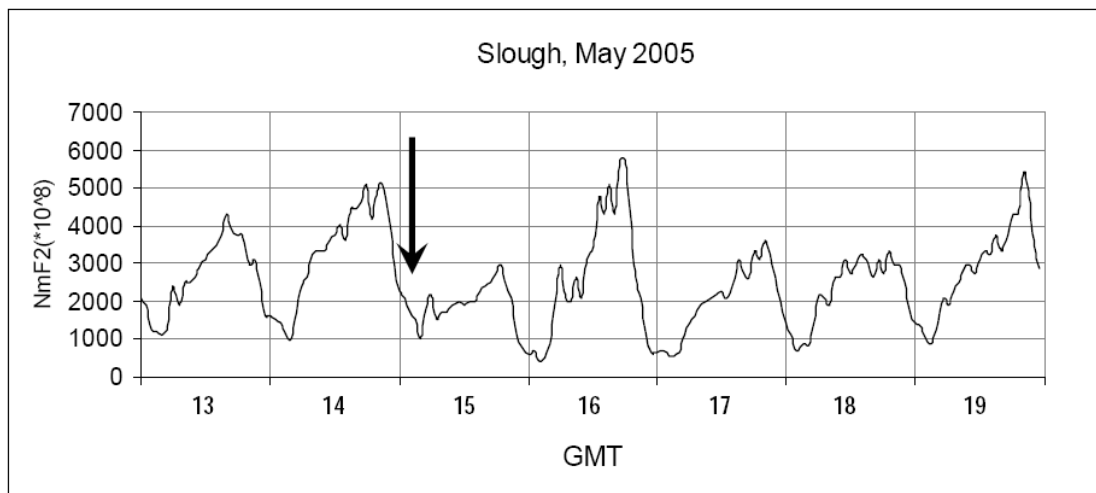
شکل ۲. منحنی تغییرات میدان کلی (F) و مؤلفه افقی آن (H) در روزهای ۱۸ و ۱۹ اوت ۲۰۰۲. توفان مغناطیسی در ساعت ۱۸:۴۶ به وقت گرینویچ در روز هجدهم رخ داده و تأثیرات آن در روز نوزدهم نیز ادامه داشته است.



شکل ۳. منحنی تغییرات چگالی الکترونی لایه F2 در ایستگاه جولیوسراه آلمان، از روز ۱۷ تا روز ۲۳ اوت ۲۰۰۲. زمان شروع توفان با پیکان نشان داده شده است. در ساعت‌های بعد از توفان مغناطیسی چگالی الکترونی، مخصوصاً در طول شب، کاهش یافته است.



شکل ۴. منحنی تغییرات میدان کلی (F) و مؤلفه افقی آن (H) در روز ۱۵ مه ۲۰۰۵. شروع توفان مغناطیسی در ساعت ۰۲:۳۸ به وقت گرینویچ است.



شکل ۵. منحنی تغییرات چگالی الکترونی لایه F₂ در ایستگاه اسلاو، انگلستان، از روز ۱۳ تا روز ۱۹ مه ۲۰۰۵. زمان شروع توفان با پیکان نشان داده شده است. در ساعت‌های بعد از توفان مغناطیسی، مخصوصاً در طول شب، چگالی الکترونی کاهش می‌یابد.

phase continueds, *Terr. Mag. Atmos. Elect.*, **37**, 147-156, 421-429.

Chapman, S., and Ferraro, V. C. A., 1933, A new theory of magnetic storms, Part I, The initial phase continueds, *Terr. Mag. Atmos. Elect.*, **38**, 175-183.

Martyn, D. F., 1953, Geo-morphology of F₂ region ionospheric storms, *Nature*, **171**, 14-16.

Ratcliff, J. A., 1972, *An introduction to ionosphere and magnetosphere*: Cambridge University Press, UK.

Rawer, K., 1956, *The ionosphere*: Fredrick ungar publishing co. New York. USA.

Campbell, W. H., 1997, *Introduction to geomagnetic fields*: Cambridge University Press, USA.

Chapman, S., and Ferraro, V. C. A., 1930, A new theory of magnetic storms, *Nature*, **126**, 129-130.

Chapman, S., and Ferraro, V. C. A., 1931, A new theory of magnetic storms, *Terr. Mag. Atmos. Elect.*, **36**, 77-97, 174-176.

Chapman, S., and Ferraro, V. C. A., 1932, A new theory of magnetic storms, Part I, The initial

منابع