

PERÍODOS PERTURBADOS: DISIPACIÓN DE ENERGÍA Y CORRIENTES GEOMAGNÉTICAS INDUCIDAS.

Patricia A. Larocca y Virginia M. Silbergleit

Instituto de Geodesia y Geofísica Aplicadas, Facultad de Ingeniería,
Universidad de Buenos Aires.
plarocc@fi.uba.ar - Vms10ar@yahoo.com.ar

RESUMEN

Se estudia, en un evento típico (12-13 de junio de 2005) las energías entrante y disipada en la magnetosfera (ϵ y U_t respectivamente) y el aumento de corrientes inducidas en un gasoducto ubicado en altas latitudes. Se analizan para el período citado los índices geomagnéticos AE y Dst, y la componente B_z del campo geomagnético interplanetario como indicadores del desarrollo del período perturbado. Se calculan los tiempos de decaimiento del anillo de corriente utilizando distintas aproximaciones de acuerdo con las fases de la tormenta. Durante este período se observaron variaciones geomagnéticas importantes que originaron corrientes geomagnéticas inducidas significativas sobre el gasoducto de la empresa Transcanada ubicado en la zona del valle del río Ottawa; pudiendo ser afectada la vida útil del mismo.

Palabras claves: energía, tormentas geomagnéticas, gasoductos, tiempos de decaimiento.

ABSTRACT

In a typical event (12-13 June 2005), solar wind energy rate and total energy dissipation rate in the magnetosphere (ϵ and U_t respectively) and increased induced currents in a gas pipe located in the auroral zone are studied. For the period geomagnetic indices AE and Dst, and the B_z component of the interplanetary geomagnetic field are analyzed as indicators of the development of the troubled period. Ring current decay times are calculated using different approaches in accordance with the phases of the storm. During this period there were significant geomagnetic variations due to geomagnetic substorms and induced currents on the pipeline located in the Ottawa River Valley, this fact could produce corrosion increases in its structure.

Keywords: energy, pipeline, geomagnetic storms, decay time.

INTRODUCCIÓN

El viento solar no puede atravesar la magnetopausa directamente sino que es desviado alrededor de la misma por el campo magnético terrestre. Como es sabido, la magnetosfera es una dínamo magnetohidrodinámica, que convierte la energía del viento solar en energía de corrientes eléctrica o magnética, (Feldstein *et al.*, 2003).

El flujo de energía cinética del viento solar llega por el lado de día y se distribuye: una parte es transferida directamente a la ionosfera de altas latitudes como corrientes alineadas con el campo donde se disipa por efecto Joule. El resto es transferido a la cola magnética como energía cinética térmica de plasma y de campo magnético. Parte de la energía de la cola magnética es luego transferida al anillo de corriente, por inyección de partículas que luego se disipan en la atmósfera terrestre.

Akasofu (1981,1996) ha estudiado la energía involucrada en el acoplamiento entre el viento solar y la magnetosfera. Propone que si el parámetro $\epsilon > 10^{18}$ erg/s eso define una subtormenta. Pudovkin *et al.*(1988) estudiaron las variaciones del índice Dst y su dependencia con los parámetros del viento solar. También estudiaron los tiempos de decaimiento en ambas fases de una subtormenta.

Por otro lado, el campo geomagnético terrestre varía debido a los cambios en las corrientes ionosféricas y magnetosféricas, produciendo corrientes en la Tierra que es conductora y en los conductores hechos por el hombre. Este fenómeno se denomina inducción geomagnética y las corrientes en los conductores hechos por el hombre son corrientes geomagnéticas inducidas.

Las perturbaciones geomagnéticas dan origen a corrientes eléctricas que circulan por largas tuberías y pueden contribuir a aumentar la corrosión de las mismas. Para protegerlas se utiliza un sistema de protección catódica que las mantiene a un potencial negativo constante con respecto al suelo circundante para inhibir las reacciones de corrosión. Pero las corrientes geomagnéticas inducidas en la tubería crean variaciones en estas diferencias de potencial caño-suelo, y como la magnitud del campo geoelectrico durante una tormenta magnética puede variar típicamente entre 0,1 y 1 V/km, por eso, si el conductor tiene varios kilómetros y resistencias de pocos ohms, la corriente puede exceder los 100 Amperes. El conocimiento de dónde y cuántas veces ocurren estas variaciones de potencial permite disminuir el riesgo de corrosión para la misma.

El propósito de este trabajo es evaluar las energías entrante y disipada en un período un particular de tormentas intensas y comparar con sus implicancias sobre el aumento de corrientes inducidas en un gasoducto en la zona subauroral; el tiempo de decaimiento del anillo de corriente y los posibles efectos causados sobre un sector del gasoducto de la empresa Transcanada.

TRANSFERENCIA DE ENERGÍA: PARÁMETRO ϵ

La energía que pone en funcionamiento una subtormenta geomagnética es provista por el viento solar. Perreault y Akasofu (1978) han sugerido una fórmula empírica que describe la energía de entrada a la magnetosfera (ϵ) como función de los parámetros del medio interplanetario en términos del vector de Poynting (en unidades de erg/s):

$$\epsilon(t) = vB^2 \operatorname{sen}^4\left(\frac{\theta}{2}\right) I_0^2 \quad (1)$$

Donde v es la velocidad del viento solar, B el módulo del campo magnético interplanetario (IMF), θ el ángulo polar del vector campo magnético interplanetario proyectado en el plano YZ para el sistema de coordenadas GSM., $I_0 = 7 R_t$ (siete radios terrestres) es una longitud característica de la magnetosfera. Esta longitud puede ser proporcional a la distancia de Chapman-Ferraro, que es la distancia entre el lado diurno de la magnetopausa y la Tierra (Akasofu, 1981)

VELOCIDAD DE DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA TRANSFERIDA A LA MAGNETOSFERA: U_t

La velocidad de disipación de la energía transferida a la magnetosfera U_t , puede evaluarse en términos de determinados procesos de disipación de energía observables en la tierra (Akasofu, 1981). La energía disipada en la magnetosfera interna es depositada, por un lado en el anillo de corriente y por otro en la ionosfera auroral, en parte como calentamiento Joule y otra parte como impacto de partículas aurorales. Así la energía U_t puede estar dada por la suma de la rapidez de inyección de energía al anillo de corriente, la rapidez de producción de calentamiento Joule en la ionosfera y el flujo de energía de las partículas aurorales (Perreault y Akasofu, 1978).

Finalmente la rapidez de disipación total de la energía puede determinarse usando la expresión:

$$U_t = \alpha \left[\partial(DST) / \partial t + (DST) / \tau \right] + \beta AE \quad (2)$$

Siendo donde DST el valor absoluto del índice Dst corregido por variaciones de presión del viento solar, τ el tiempo de decaimiento en el anillo de corriente, AE el índice geomagnético para la zona auroral, α y β constantes iguales a 4×10^{20} y $3 \times 10^{15} \text{ erg(nT/s)}^{-1}$, respectivamente.

ANÁLISIS DE DATOS

Se analizan los parámetros ϵ y U_t para la tormenta ocurrida entre el 12 y 13 de junio de 2005. De acuerdo con Akasofu (1981) se puede considerar una magnetosfera en estado tranquilo si $U_t < 10^{18} \text{ erg/s}$ y en estado perturbado cuando $U_t > 10^{18} \text{ erg/s}$. Por tal motivo se grafica la evolución temporal de U_t en el período comprendido entre el 12 y 13 de junio de 2005. (Fig. 1).

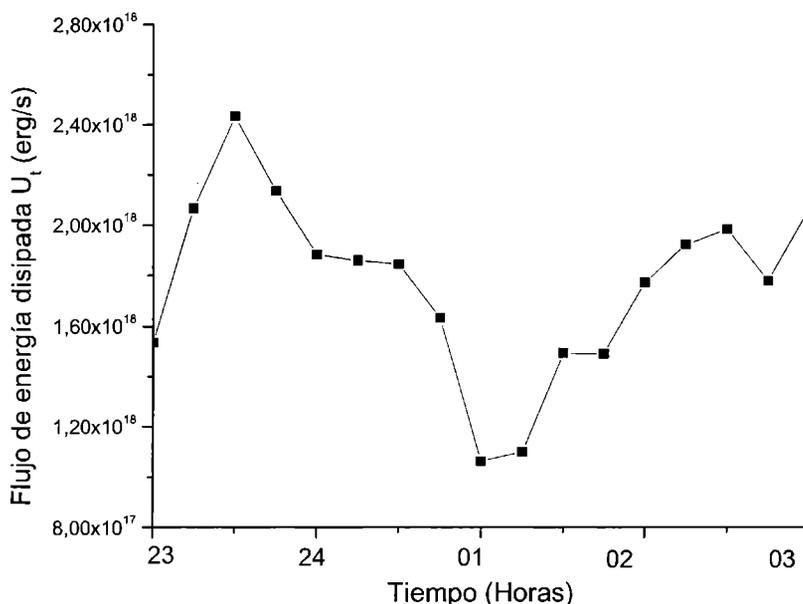


Figura 1. Flujo de energía total disipada para el período de 12-13 de junio de 2005 entre las 23 (12 de junio) y las 3hs del día 13 de junio.

Por otro lado el inicio de una subtormenta está relacionado con valores de ϵ mayores a 10^{18} erg/seg (Akasofu, 1981), esto se observa en el gráfico de la Figura 2 donde desde las 23 horas del día 12 de junio y hasta la 01 del día 13, ϵ toma valores mayores a 10^{18} erg/seg . Esta forma de definir una subtormenta se basa en el hecho de que la magnetosfera se acerca más a ser un sistema dirigido por el viento solar que a un sistema de almacenado y posterior descarga de energía. La Figura 3 muestra el índice AE. Este índice se obtiene a partir de magnetogramas de estaciones geomagnéticas distribuidas en el óvalo auroral boreal, y se lo calcula para intervalos del minuto.

El índice Dst para el período citado se grafica en la Figura 4. Este índice horario es el más ampliamente usado y disponible de la actividad en bajas latitudes. Se calcula a partir de la magnitud de la componente horizontal del campo magnético H sobre la superficie terrestre en estaciones magnéticas cercanas al ecuador. Se usa para estimar el contenido total de energía de las partículas que forman el anillo de corriente, permitiendo estudiar el desarrollo de una tormenta geomagnética, cuya fase principal tiene como característica más importante la intensificación de la corriente de anillo.

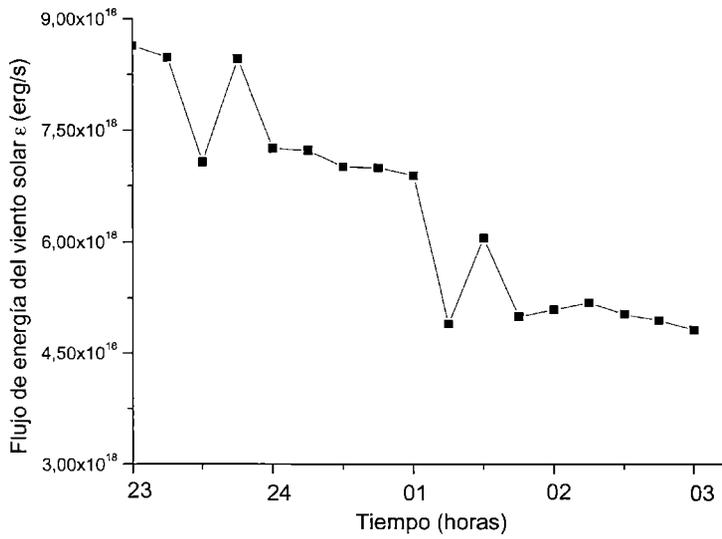


Figura 2. Flujo entrante de energía de viento solar total para el período de 12-13 de junio de 2005 entre las 23 (12 de junio) y las 3hs del día 13 de junio.

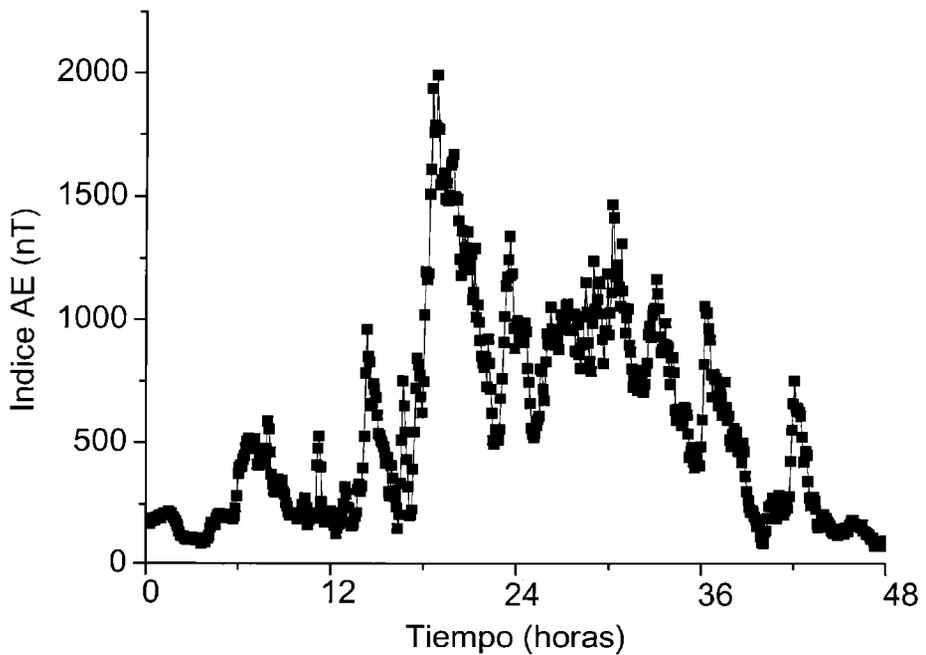


Figura 3. Índice AE para el período del 12-13 de junio de 2005.

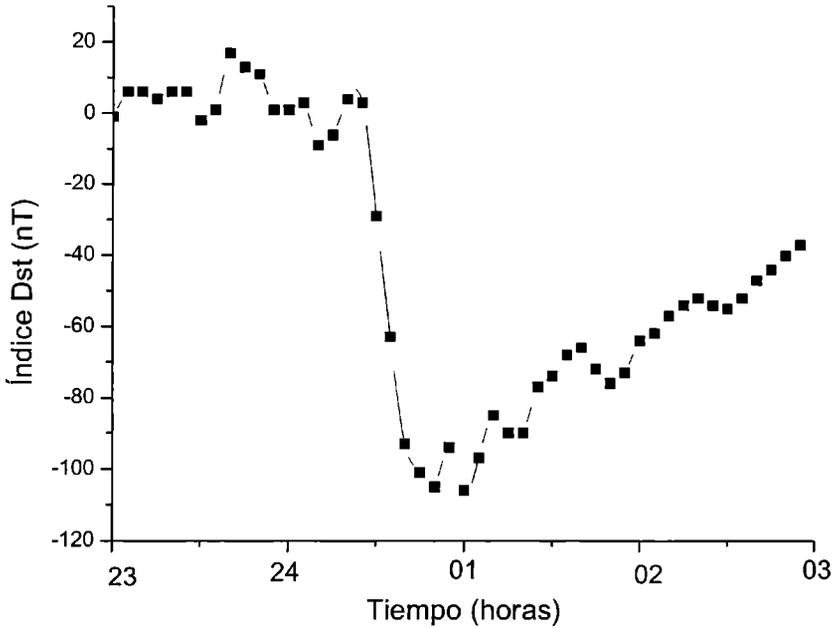


Figura 4. Índice Dst corregido por presión para el período del 12-13 de junio de 2005.

Para poder estimar el tiempo de decaimiento τ en el anillo de corriente se analizaron las diferentes fases de la perturbación usando distintos criterios para cada una de ellas (Silbergleit *et al.*, 1997). Para el cálculo del tiempo de decaimiento en la fase principal se usó el método de Pudovkin *et al.* (1988):

$$\tau_p = \frac{4.87 + 3.49 \cdot 10^{-3} v (0.5\sigma - B_z)}{DST_{\min}} \quad (3)$$

Donde v es la velocidad del viento solar expresada en km/s, B_z es la componente N-S del campo IMF y σ la variación del IMF, ambas expresadas en nT. Siendo DST_{\min} el valor absoluto del mínimo Dst corregido por las variaciones de presión del viento solar. Para el cálculo del tiempo de decaimiento en la fase de recuperación se usó:

$$\tau_R = \frac{(t_2 - t_1)}{\ln(DST_1 / DST_2)} \quad (4)$$

Tomando los subíndices 1 y 2 como los límites inicial y final del intervalo considerado. En la tabla 1 se presentan los resultados obtenidos para los tiempos de decaimiento en el evento analizado. La energía total de viento solar entrante y la energía total disipada durante el período total de la perturbación resultan: $\epsilon' = 2.9 \cdot 10^{23}$ erg y $U' = 1,2 \cdot 10^{23}$ erg.

Tabla 1. Resultados de los valores obtenidos para los tiempos de decaimiento característicos para las fases principal y de recuperación.

Periodo	t_p	t_r
12-13 Junio 2005 (23h 12/6 a 03h 13/6)	2,97 h	14,45 h

ESTUDIO DE LAS DIFERENCIAS DE POTENCIAL GASODUCTO-SUELO Y LAS CORRIENTES GEOMAGNÉTICAS INDUCIDAS.

Los fenómenos del clima espacial generan una variedad de efectos sobre sistemas tecnológicos ya que partículas energéticas provenientes del Sol interactúan con el campo geoelectrico produciendo perturbaciones magnéticas y aumentando la ionización de la ionosfera en alturas que oscilan entre los 100 y los 1000 km por encima de la superficie terrestre. Las variaciones magnéticas inducen corrientes eléctricas en largos conductores causando la salida de operación de líneas de alta potencia y la corrosión de gasoductos, oleoductos, etc.

La reacción electroquímica puede ser inhibida manteniendo el cátodo (gasoducto de acero) negativo con respecto ánodo (suelo que lo rodea). Las corrientes mencionadas, generan voltajes variables dificultando el funcionamiento del sistema de protección. Particularmente, durante tormentas magnéticas, estas variaciones pueden ser suficientemente grandes en largos intervalos de tiempo dejando al sistema desprotegido y reduciendo de esta manera su vida útil. Para el caso del gasoducto en estudio, se calcularon los valores PSP (diferencia de potencial gasoducto-suelo) a través de la relación (Trichtchenko *et al.*, 2004)

$$\text{PSP (mV)} = -982 \pm 80 + (11 \pm 2) E_y \quad (5)$$

Para el período correspondiente a 12-13 de junio de 2005 los valores estimados se muestran en la Figura 5. La respuesta eléctrica del gasoducto a la inducción geomagnética se modeló a partir de la teoría de líneas de transmisión eléctrica (DSTL), según lo publicado por Trichtchenko *et al.*, (2001 y 2002). Usando este modelo, la corriente eléctrica inducida (GICs) sobre la tubería se obtiene:

$$\text{GICs (mA)} = -0.56 \cdot 10^{-3} \text{ PSP} \quad (6)$$

Para el tramo del gasoducto situado en el valle del río Ottawa, se consideraron los siguientes valores: diámetro exterior 762 mm, espesor 9,8 mm, resistividad del acero 0,1786. 10⁻⁶ ohm-m (Fernberg *et al.*, 2007) Las corrientes inducidas (GICs) sobre la cañería se muestran en la Figura 6.

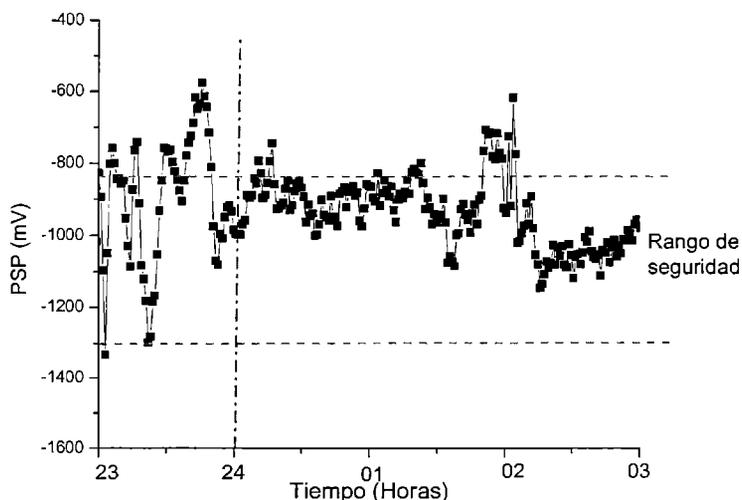


Figura 5. Diferencias PSP calculadas. Se muestran los intervalos de posibles aumentos corrosivos de su estructura para el período 12 -13 de junio de 2005.

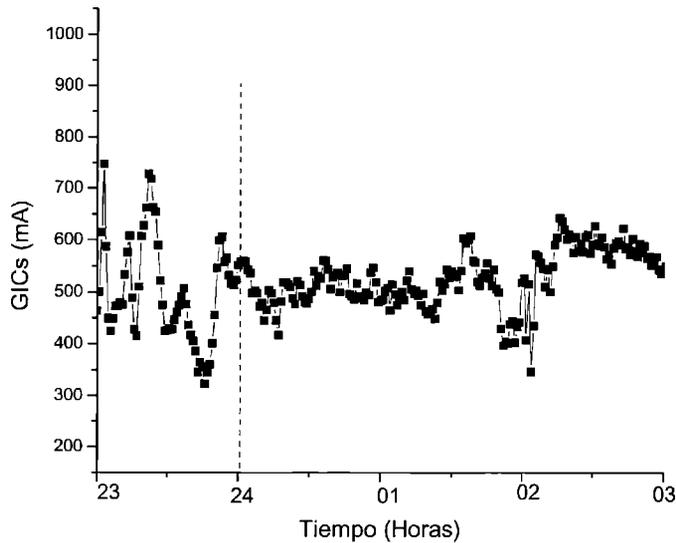


Figura 6. Corrientes GICs calculadas para el intervalo estudiado.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se analizaron los valores de índices de actividad geomagnética AE y Dst para el período comprendido entre el 12 y el 13 de junio de 2005. Se seleccionó el intervalo comprendido entre las 23 hs del 12/06/05 y las 03 hs del 13/06/05 vinculado con una subtormenta cuyo AE máximo es de 1340 nT y el Dst mínimo de -106 nT.

Las Figuras 1 y 2 muestran los valores de ϵ y U_i para el intervalo estudiado, notándose que ϵ es aproximadamente un orden de magnitud mayor que U_i durante todo el período. Los cálculos del tiempo de decaimiento del anillo de corriente (previamente publicados) resultan generalmente pequeños en el momento del máximo de la perturbación y no concuerdan con las vidas medias correspondientes al intercambio de cargas de las especies más abundantes en el anillo ecuatorial de corriente. Los valores obtenidos en el presente trabajo resultan más realistas ya que no es posible estimarlos de la misma forma a lo largo de toda la perturbación pues la rapidez de deposición de energía en el anillo de corriente varía entre las dos fases de una tormenta. Para el caso de la fase de recuperación se ha considerado despreciable la energía entrante al mismo. La tabla 2 muestra el resultado del presente trabajo y su relación con Pudovkin et al. (1988) evidenciando una buena superposición entre los valores.

Los resultados obtenidos para los valores PSP muestran valores fuera de la zona de protección comprendida entre los -850 V y -1250 V evidenciando la posibilidad de riesgo para el gasoducto.

Tabla 2. Tiempos de decaimiento en la fase de recuperación.

	Pudovkin et al. (1988)	Presente trabajo
Tiempos de decaimiento	13.9h	14.45 h

Agradecimientos: Los autores agradecen a D. Boteler y L. Trichtchenko por facilitar los datos geomagnéticos correspondientes al Observatorio de Ottawa. Este trabajo se realizó con fondos correspondientes a los proyectos IN018 de la SECYT (UBA) y PIP 6540/05 de CONICET

REFERENCIAS

- Akasofu S. I., 1981. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere. *Space Sci. Rev.* 28: 121-190.
- Akasofu S. I., 1996. Search for the unknown quantity in the solar wind: A personal account. *J. Geophys. Res.* 101: 10531–10540.
- Feldstein Y. I., L. A. Dremukhina , A. E. Levitin , U. Mall , I. I. Alexeev and V. Kalegaev, 2003. Energetics of the magnetosphere during the magnetic storm. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 65 (4): 429-446.
- Fernberg P., C. Samson , D. Boteler , L. Trichtchenko and P. Larocca, 2007. Earth Conductivity Structures and their Effects on Geomagnetic Induction in Pipelines. *Annales Geophysicae.* 25: 1–12.
- Perreault P. and S. I. Akasofu, 1978. A study geomagnetic storms. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 54: 547-573.
- Pudovkin M. I., A. Grafe, S. A. Zaitseva and A. V. Usmanov, 1988. Calculating the Dst variation field on the basis of solar wind parameters. *Gerlands Beitr. Geophysik-Leipzig.* 97: 525-531.
- Silbergleit. V. M., M. M. Zossi de Artigas and J. R. Manzano, 1997. Energy dissipation in substorms: plasmoids ejection. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics,* 59 (11): 1355-1358.
- Trichtchenko, L. and D. H. Boteler, 2001. Specification of geomagnetically induced electric fields and currents in pipelines, *J. Geophys. Res.* 106 ,(A10): 21039-21048.
- Trichtchenko, L. and D. H. Boteler, 2002. Modeling of geomagnetic induction in pipelines, *Ann.Geophys.* 20: 1063-1072.
- Trichtchenko, L., D. H. Boteler and P. Larocca, 2004 Modeling the effect of the electromagnetic environment on pipelines, Geological Survey of Canada Open file No. 4826.