

Geomagnetické bouře, Forbush poklesy kosmického záření a celkový ozón ve vyšších středních šířkách severní polokoule

J. Laštovička, P. Križan, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Praha, Česká Republika; jla@ufa.cas.cz, krizan@ufa.cas.cz

Abstrakt

Kosmické počasí ovlivňuje atmosféru mnoha způsoby, mezi nimiž patří k nejdůležitějším geomagnetické bouře a Forbush poklesy kosmického záření. Zde shrnujeme naše předchozí výsledky o efektech silných geomagnetických bouří a Forbush poklesů na celkový ozón ve vyšších středních šířkách severní polokoule a doplňujeme je výzkumem efektů geomagnetických bouří nedoprovázených Forbush poklesy. Výrazné efekty silných geomagnetických bouří a Forbush poklesů se vyskytují jen v zimní části roku, při vysoké sluneční aktivitě a východní fázi kvazi-dvouleté oscilace v atmosféře (E-max). Efekty bouří jsou přerozdělení, ne produkce nebo ztráta ozónu, spojené s bouřemi vyvolanými změnami atmosférické cirkulace. Nenašel se žádný případ, který by byl v rozporu s ideou, že Forbush poklesy kosmického záření odpovídají za efekty geomagnetických bouří na troposféru a dolní stratosféru včetně celkového ozónu. Ale za dobu více než 20 let se za E-max situace v zimní části roku vyskytlo jen několik silných Forbush poklesů bez geomagnetických bouří a jen jedna geomagnetická bouře bez Forbush poklesu. Většina bouří bez Forbush poklesu ve středních šířkách byla doprovázena Forbush poklesem ve vysokých šířkách, který byl ve středních šířkách kompenzován poklesem rigidity.

1. ÚVOD

Geomagnetické bouře a Forbušovy poklesy intenzity galaktického kosmického záření patří do skupiny jevů kosmického počasí, které ovlivňují atmosféru Země. Geomagnetické bouře jsou z nich patrně nejdůležitější. Vyvolávají velké poruchy v ionosféře, ale ovlivňují též neutrální atmosféru včetně střední a dolní atmosféry (např. Laštovička, 1996).

Geomagnetické bouře vnášejí energii do horní a střední atmosféry převážně Jouleho ohřevem v horní části a vysypáváním elektronů v dolní části. Ale tyto energetické elektrony nejsou schopny proniknout až dolů do dolní stratosféry, kde je maximum ozónové vrstvy. Proto se musíme poohlédnout po jiném kandidátovi, který by mohl efektivně ovlivnit ozónovou vrstvu. Silné geomagnetické bouře jsou zpravidla doprovázeny Forbušovými poklesy intenzity galaktického kosmického záření. Proto byla zformulována hypotéza o změnách intenzity kosmického záření jako příčině efektů geomagnetických bouří v troposféře, dolní stratosféře a celkovém ozónu.

Forbušovy poklesy způsobují změny v oblačnosti, zvláště vyšší oblačnosti (Todd a Kniveton, 2001). Zdá

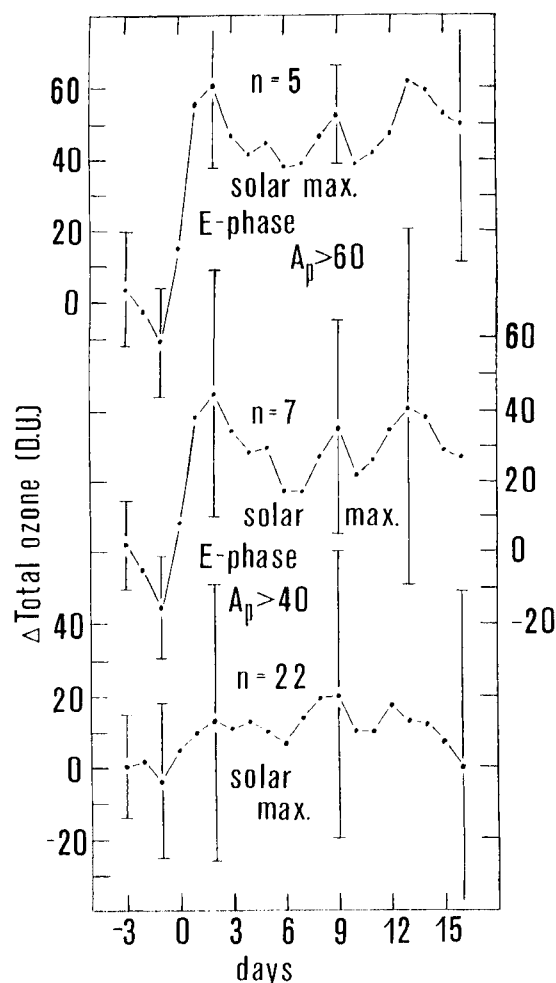
se, že kosmické záření ovlivňuje oblačnost a klima i na časové škále slunečního cyklu, i když toto je předmětem sporů (např. Carslaw et al., 2002; Friis-Christensen, 2000; Kristjánsson et al., 2002). Změny intenzity galaktického kosmického záření jsou základem hypotézy „elektromrznutí“ pro vysvětlení efektů geomagnetických bouří v troposféře (Tinsley a Heelis, 1993; Tinsley, 2000).

Ozón mohou významně ovlivnit i výrony slunečních energetických protonů (SPE) a relativistických elektronů (REP). SPE jsou schopny podstatně zeslabit koncentraci ozónu v mezoféře v polárních čepičkách (např. Jackman et al., 1980) a měřitelně snížit i celkový ozón v této oblasti, ale do středních šířek nezasahují. REP jsou soustředěny v zóně polárních září a pronikají do mezoféry a horní stratosféry, tj. opět celkový ozón ve středních šířkách nemohou výrazněji ovlivnit.

Cílem tohoto krátkého sdělení je stručně shrnout naše předchozí výsledky studia efektů geomagnetických bouří na celkový ozón ve vyšších středních šířkách (2. kapitola), a shrnout a dokompletovat naše výsledky studia vlivu Forbušových poklesů galaktického kosmického záření na celkový ozón (3. kapitola). Práce je zakončena krátkým shrnujícím závěrem.

2. EFEKTY GEOMAGNETICKÝCH BOUŘÍ

Laštovička et al. (1992) zahájili naše výzkumy vlivu geomagnetických bouří na celkový ozón a ukázali, že předchozí výsledky různých autorů byly navzájem zdánlivě podstatně odlišné. Novější výsledky řady autorů (např. Storini, 2001; Belinskaya et al., 2001) tuto zdánlivou nekonzistentnost výsledků potvrzují. Ale naše další výzkumy (Mlch, 1994; Mlch a Laštovička, 1995; Laštovička a Mlch, 1999) poskytly konzistentní obraz efektu geomagnetických bouří na celkový ozón na vyšších středních šířkách severní polokoule.



Obr. č. 2. Odchylky celkového ozónu (Evropa, 50°N) od průměrné úrovně dní -6 až 0 pro magnetické bouře při vysoké sluneční aktivitě (Laštovička et al., 1992). Všechny bouře (dolní křivka), bouře při E-fázi QBO (prostřední křivka), silné bouře při E-fázi QBO (horní křivka). Vertikální čáry – střední kvadratická odchylka; n – počet bouří.

Efekt geomagnetických bouří se nevyskytuje u 40°N a 60°N; vyskytuje se jako systematický, velký a statisticky významný efekt jen u 50°N, a to jen za

specifických podmínek (za ostatních podmínek je zanedbatelný nebo slabý, nesystematický a statisticky nevýznamný):

Zima (15.11.-15.3.), silná geomagnetická bouře ($A_p > 60$), vysoká sluneční aktivita ($R_{12} > 100$) a východní (E) fáze kvazidvouleté oscilace (QBO) v tropické stratosféře – E-max podmínky.

Efekt geomagnetických bouří není ani růst ozónu, ani jeho úbytek, nýbrž redistribuce, která se projevuje jako výrazné potlačení délkové variace ozónu a tím v Evropě jako silný růst celkového ozónu. V zonálním průměru ani v létě, kdy je délková variace slabá, žádný efekt geomagnetických bouří v celkovém ozónu nevidíme. Jeho příčinou je asi reakce celkového ozónu na změny atmosférické cirkulace, vyvolané geomagnetickou bouří (Laštovička a Mlch, 1999).

Existují dvě oblasti „citlivé“ ke geomagnetickým bouřím, a to jak v celkovém ozónu, tak v troposféře i v přizemní tlaku: (1) Sektor severovýchodního Atlantiku a Evropy, (2) Sektor východní Sibíře a Aleutských ostrovů.

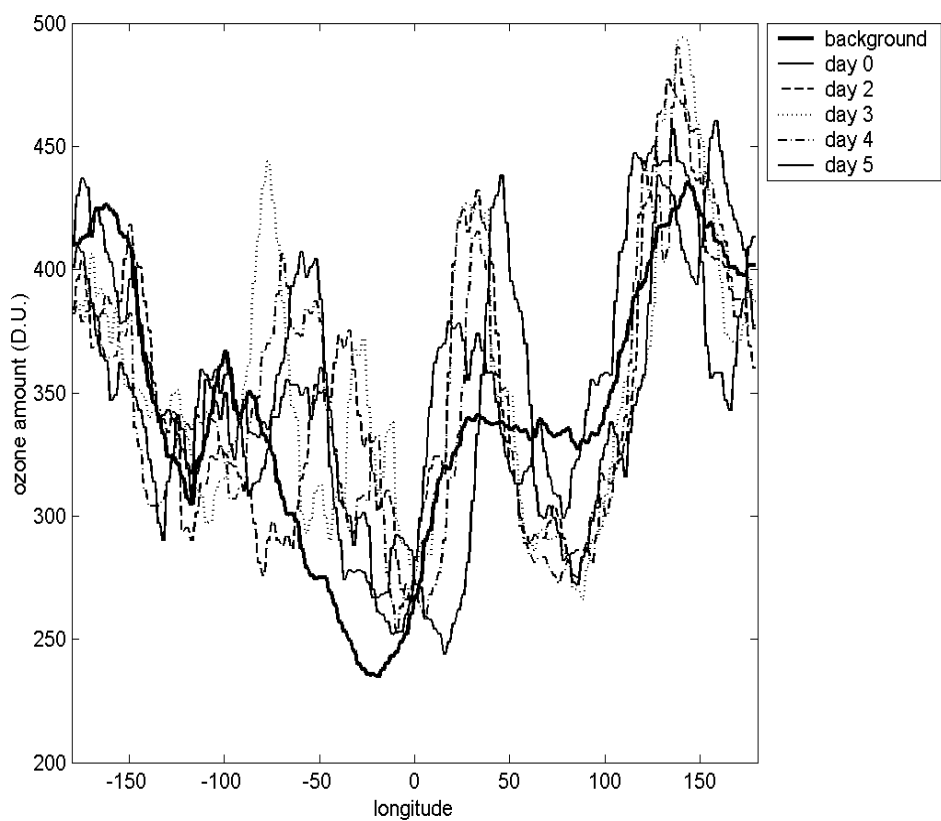
3. EFEKTY FORBUŠOVÝCH POKLESŮ INTENZITY KOSMICKÉHO ZÁŘENÍ

I výsledky studia efektů Forbušových poklesů galaktického kosmického záření na celkový ozón poskytují zdánlivě nedostatečně konzistentní obraz, jak ukazují např. výsledky uvedené v přehledové práci Krivolutsky (2003).

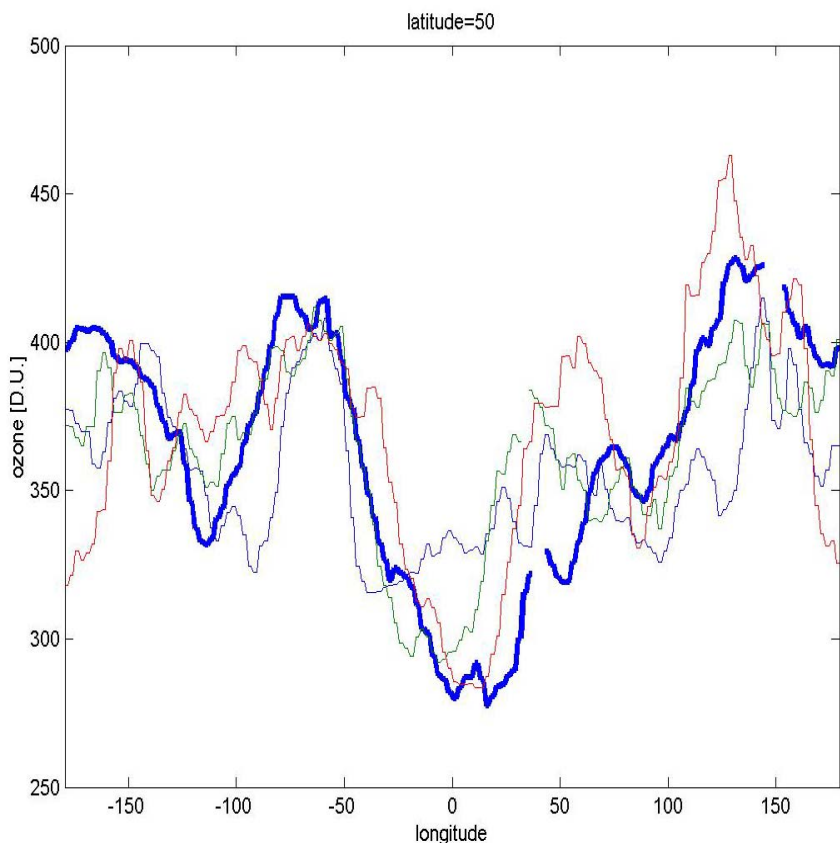
Studium efektů Forbušových poklesů jsme zahájili analýzou efektů silných Forbušových poklesů za období 1980-1992 (Fedulina a Laštovička, 2001). Výsledkem bylo, že se vyskytují na vyšších středních šířkách severní polokoule za stejných podmínek jako efekty geomagnetických bouří: 50°N, zimní období, silné Forbušovy poklesy, E-max podmínky. To není překvapující, protože silné geomagnetické bouře a silné Forbušovy poklesy se zpravidla vyskytují společně.

Abychom zjistili, který z těchto dvou faktorů je odpovědný za pozorované efekty v celkovém ozónu, bylo třeba se zaměřit na řídké případy silných Forbušových poklesů bez geomagnetických bouří a naopak silných geomagnetických bouří bez Forbušových poklesů.

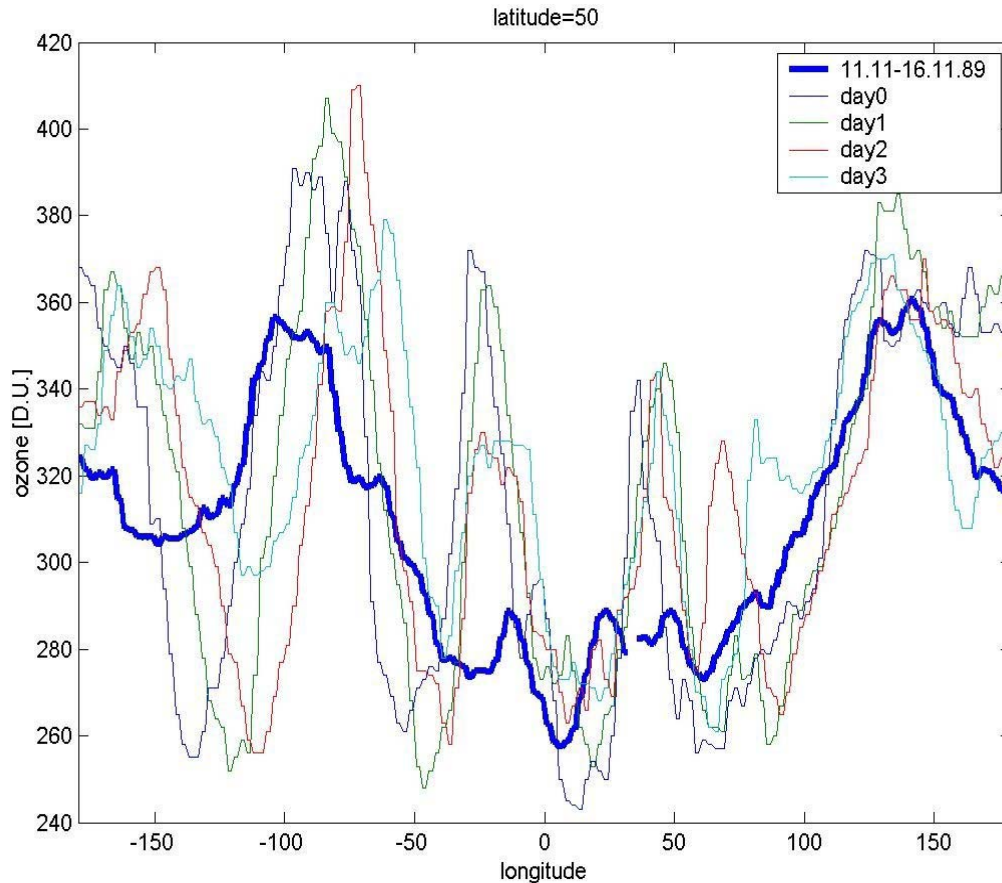
Začali jsme silnými Forbušovými poklesy nespojenými s geomagnetickými bouřemi. Laštovička et al. (2003) našli za období 1980-2002 v seznamu poklesů kosmického záření na observatoři Lomnický Štít celkem 15 případů poklesů ne menších než 3% nespojených s geomagnetickou aktivitou. Bohužel 11 z nich bylo v nezimním období a ze čtyř zimních jen dva případy byly za E-max podmínek. Nejsilnější letní pokles (15%) efekt nevykázal, ale zimní E-max 6% pokles ano (obr. 2).



Obr. č. 2. Celkový ozón (D.U., TOMS) podél rovnoběžky 50°N při Forbušově poklesu kosmického záření o 6% z ledna 2002 při E-max podmínkách (Laštovička et al., 2003). Tučná křivka - průměr ze dnů -1 až -6.



Obr. č. 3. Celkový ozón (D.U., TOMS) podél rovnoběžky 50°N při geomagnetické bouři 2.-3.2.1992 za E-max podmínek. Tučná křivka (modrá) - průměr ze dnů -1 až -6.



Obr. č. 4. . Celkový ozón (D.U., TOMS) podél rovnoběžky 50°N při geomagnetické bouři 17.11. 1989 za E-max podmínkách – jediná bouře skutečně bez Forbušova poklesu. Tučná křivka (modrá) - průměr ze dnů –1 až –6.

Obrázek 2 ukazuje, že navzdory 2,5x slabšímu Forbush poklesu intenzity kosmického záření v zimě při E-max podmínkách oproti letnímu Forbušovu poklesu vidíme evidentní růst celkového ozónu v severoatlanticko-evropském sektoru, a to téměř o 100 D.U., což je morfologicky stejné jako typický efekt silné geomagnetické bouře. Při druhém Forbušově poklesu v zimě za E-max podmínek vidíme podobný efekt.

Čili silné Forbušovy poklesy intenzity galaktického kosmického záření jsou doprovázeny výrazným růstem celkového ozónu ve východoatlanticko-evropském sektoru a tudíž ztlumením délkové variace bez ohledu na přítomnost či nepřítomnost silných geomagnetických bouří.

Nyní přejdeme k analýze efektů silných geomagnetických bouří, nedoprovázených Forbušovými poklesy kosmického záření. V centrální zimě (prosinec-únor) jsme v období 1979-2002, zima, E-max podmínky, našli pro silné geomagnetické bouře ($A_p > 60$) bez Forbušových poklesů - jen jednu bouři z 2.-3.2. 1992, ukázanou na obr. 3. Obrázek 3 vykazuje očekávaný efekt geomagnetické bouře, což je v rozporu s hypotézou o rozhodující roli Forbušových poklesů kosmického záření. Ale stanice Sodankylä v severním Finsku (a další vysokošifkové stanice) vykazovala

Forbušův pokles, a to hodně silný, který byl na Lomnickém Štítu vykompenzován poklesem rigidity kosmických paprsků (Kudela a Brenkus, 2004) a tudíž tam nebyl vidět. Čili ani tato bouře není v rozporu s hypotézou o rozhodující roli Forbušových poklesů.

Za léta 1979-2002 byla jediná skutečná případ silné geomagnetické bouře bez Forbušova poklesu kosmického záření, bouře ze 17.11. 1989. Oproti střední křivce z klidových dnů vidíme podstatně větší a „divočejší“ délkovou variaci (meteorologického původu), a ve východoatlanticko-evropském sektoru nikoliv systematickou změnu., ale změny se střídajícím se kladným a záporným znaménkem, tj. něco úplně jiného než je standardní efekt silné geomagnetické bouře. Čili silná geomagnetické bouře, nedoprovázená Forbušovým poklesem intenzity kosmického záření, očekávaný efekt geomagnetické bouře v celkovém ozónu nevykazuje.

4. ZÁVĚR

Všechny výše uvedené výsledky jsou v souladu s představou, že efekty geomagnetických bouří v troposféře a dolní stratosféře včetně celkového ozónu jsou vyvolávány hlavně Forbušovými poklesy galaktického kosmického záření, které téměř vždy doprovázejí silné geomagnetické bouře. Žádný z analyzovaných případů není v rozporu s touto hypotézou, ale na druhou stranu počet Forbušových poklesů bez geomagnetických bouří a zvláště

geomagnetických bouří bez Forbušových poklesů (jeden případ za téměř 25 let při E-max podmínkách), které umožňují rozlišit který ze dvou faktorů je rozhodující, byl velmi malý.

LITERATURA

- Belinskaya, A., Kazimirovsky, E., Matafonov, G., Sych, R., 2001. The regional peculiarities of the total ozone content variations caused by solar/geomagnetic phenomena. *Advances in Space Research*, 27, 2007-2011.
- Carslaw, K.S., Harrison, R.G., Kirkby, J., 2002. Atmospheric science: cosmic rays, clouds, and climate. *Science*, 298, 1732-1737.
- Fedulina, I., Laštovička, J., 2001. Effects of Forbush decreases of cosmic ray flux on ozone at higher middle latitudes. *Advances in Space Research* 27, 2003-2006.
- Friis-Christensen, E., 2000. Sun, clouds and climate. *Climatic Change* 47, 1-5.
- Jackman, C.H., Douglass, A.R., Rood, R.B., McPeters, R.D., Meade, P.E., 1990. Effects of solar proton events on the middle atmosphere during the past two solar cycles as computed using a two-dimensional model. *Journal of Geophysical Research* 95 (D6), 7417-7428.
- Kristjánsson, J.E., Staple, A., Kristiansen, J., Kaas, E., 2002. A new look at possible connections between solar activity, clouds and climate. *Geophysical Research Letters* 29(23), doi:10.1029/2002GL015646.
- Krivolutsky, A.A., 2003. History of cosmic ray influence on ozone layer – key steps. *Advances in Space Research* 31, 2127-2138.
- Kudela, K., Brenkus, R., 2004. Cosmic ray decreases and geomagnetic activity: list of events 1982-2002. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* (v tisku).
- Laštovička, J., 1996. Effects of geomagnetic storms in the lower ionosphere, middle atmosphere and troposphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 58, 831-843.
- Laštovička, J., Bremer, J., Gil, M., 1992. Ozone response to major geomagnetic storms. *Annales Geophysicae* 10, 683-689.
- Laštovička, J., Križan, P., Kudela, K., 2003. Cosmic rays and total ozone at higher middle latitudes. *Advances in Space Research* 31, 2139-2144.
- Laštovička, J., Mlch, P., 1999. Is ozone affected by geomagnetic storms? *Advances in Space Research* 24, 631-640.
- Mlch, P., Total ozone response to major geomagnetic storms during non-winter period. *Studia geophysica et geodaetica* 38, 423-429.
- Mlch, P., Laštovička, J., 1995. Total ozone response to major geomagnetic storms and changes in meteorological situations. *Studia geophysica et geodaetica* 39, 189-207.
- Storini, M., 2003. Geomagnetic storm effects on the Earth's ozone layer. *Advances in Space Research* 27, 1965-1974.
- Tinsley, B.A., 2000. Influence of solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the troposphere. *Space Science Reviews*. 94, 231-256.
- Tinsley, B.A., Heelis, R.A., 1993. Correlations of Atmospheric Dynamics with Solar Activity: Evidence for a Connection via Solar Wind, Atmospheric Electricity, and Cloud Microphysics. *Journal of Geophysical Research* 98, 10375-10384.
- Todd, M.C., Kniveton, D.R., 2001. Changes in cloud cover associated with Forbush decreases of galactic cosmic rays. *Journal of Geophysical Research* 106, 32031-32041.