

ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 3ΗΣ ΙΟΥΝΙΟΥ 1999

ΠΡΟΕΔΡΙΑ ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΜΗΤΣΟΠΟΥΛΟΥ

---

ΦΥΣΙΚΗ.— **ENSO related ozone anomalies in the vertical and horizontal ozone distribution: The case during the winter spring 1997/98 event**, by *Tourpali K. and C. S. Zerefos*, διὰ τοῦ Ἀκαδημαϊκοῦ κ. *Περικλῆ Θεοχάρη*.

#### Abstract

This study examines the ENSO - induced ozone anomaly patterns during the 1997/98 large warm event. The observed anomaly pattern is in qualitative agreement with earlier studies, with large N-S gradients around 160° W from tropical Pacific to the Aleutians, following ENSO events. At selected ozonesonde stations, ENSO-related statistically significant ozone anomalies are found a few kms above the tropopause, with positive departures (+5%) per SOI unit over Coose Bay and Hohenpeissenberg and negative (-6%) per SOI unit departures over Hilo, Hawaii.

#### 1. Introduction

The ENSO phenomenon is aperiodic and its effect in total ozone does not show zonal symmetry but rather follows a wave - train propagation, known over the northern hemisphere as the Pacific-North American (PNA) teleconnection anomaly pattern (Wallace and Gutzler, 1981; Zerefos et al., 1994; Randel and Cobb, 1994; Kayano, 1997). ENSO relations to total ozone variability have been reported for the equatorial region, (e.g. Shiotani, 1992; Hasebe, 1993), and major ENSO warm events have been suggested as partly responsible for the observed negative ozone departures in 1982-83 (Bojkov, 1987). The «centers of action» of ENSO in total ozone are manifested by deficiencies as large as -5% while cold ENSO events are associated with total ozone departures

---

\* ΤΟΥΡΠΑΛΗ Κ., Χ.Σ. ΖΕΡΕΦΟΥ.— Μελέτη τῶν διαταραχῶν τῆς κατακόρυφης καὶ ὀριζοντίας κατανομῆς τοῦ ὄζοντος σχετιζομένων μὲ τὸ φαινόμενο El Nino κατὰ τὸ χειμῶνα 1997 - 1998.

tures which mirror the global pattern of the warm events. These ENSO - induced patterns of changes in total ozone are closely associated with upper-air circulation anomalies which can be traced to a wave train propagating from the tropical pacific into the winter hemisphere. In this study we report new results on the ENSO - induced anomaly patterns in total ozone and its vertical distribution.

## 2. Data

### a. Total ozone global data

Total ozone data used are monthly mean values on a  $5^\circ \times 10^\circ$  grid from TOMS instrument on board Nimbus 7 (version 7, November 1978 through May 1993). Global satellite total ozone data have been updated as follows: from Meteor 3 TOMS (1993/3 - 1994/11), SBUV/2 (1994/12 - 1996/7, kindly provided by R. Nagatani) and EP TOMS (1996/8 - 1998/3). The satellite records in the years after 1993 were adjusted for continuity with TOMS on Nimbus 7 (version 7) and with the ground based stations by using a global scaling factor of -1, -2 and -1% for TOMS on Meteor 3, SBUV/2 and EP TOMS respectively. These represent the average systematic bias between the satellite instruments and their differences with a well calibrated ground based network used in the ozone assessments (WMO, 1994). Revised ground-based data at selected stations are from the WMO-WOUDC Center.

### b. Ozonesonde data

Ozonesonde data from a limited number of stations, deposited at the WMO - WOUDC data base, which correspond to criteria of long records and homogeneity. Stations have been selected according to the following criteria: (1) The station should provide ozonesonde observations at least since 1975. This is because we are forced to exclude years with ENSO events coincident with the volcanic eruptions of El Chichon (1982) and Pinatubo (1991), to avoid volcanic interference to the ozone anomalies (Angell, 1997). (2) Ozone sounding should have burst levels over 20hPa and correction factors between 0.9 and 1.2. (3) The number of soundings should be at least 3 per month, satisfying criteria (1) and (2), and have not any one month or season systematically missing.

The stations meeting criteria (1), (2) and (3) were Edmonton ( $53^\circ\text{N}$ ,  $114^\circ\text{W}$ ), Goose Bay ( $53^\circ\text{N}$ ,  $60^\circ\text{W}$ ), Lindenberg ( $52^\circ\text{N}$ ,  $14^\circ\text{E}$ ), Hohenpeissenberg

(48°N, 11°E). Additionally, use is made of the ozone sounding record of the tropical station at Hilo (19.8°N, 155°W), even though its duration is shorter, because of its vicinity to ENSO center of action in the tropical Pacific. It should be noted that data sets at these stations have been recently revised and we have made sure that Bass and Paur absorption coefficients apply. The Canadian stations records have been adjusted to account for discontinuities due to the ozonesonde type change in 1979/80, as described in Bojkov and Fioletov (1997). The altitude of different pressure levels was calculated from temperature profiles and ozonesonde data were stratified every km to the height of the thermal tropopause (WMO, 1992).

#### c. Ancillary data

Equatorial zonal winds at 30 and 50 hPa from Singapore (1°N, 104°E) are used as indices of the QBO. The 10.7 cm solar radio flux ( $F_{10.7}$ , in  $10^{-22}$  W m<sup>-2</sup> Hz<sup>-1</sup>) describes the solar activity and the widely accepted Southern Oscillation Index (SOI), namely the normalised pressure difference between Tahiti and Darwin, is used to describe the ENSO events [*Trenberth*, 1976].

### 3. Method of analysis

In this study we employ statistical analysis to filter out periodic natural oscillations (such as the QBO or the solar effect) on ozone, by the use of the following simple statistical model:

$$OZ(i,j) = S(i,j) + Q(i,j) + SO(i,j) + SE(i,j) + T(i,j) + \text{residual}$$

where  $i$  denotes the month and  $j$  the year of total ozone (OZ) and its components, the seasonal (S), the QBO (Q), the ENSO (SO), the trend (T), the solar activity effect (SE) and the "noise" residual term

Linear trends were removed at a given location by linear least squares fit, for every month of the year and for every 1 - km layer in the case of the ozone soundings. The satellite total ozone data were deseasonalized by the long-term monthly mean calculated from 1979-1990. For the ozonesonde data, the period 1975-1990 was used to calculate the mean ozone at each level except for Hilo, where the whole period (1982-1990) was used.

### 4. Results and Discussion

#### a. Observed ENSO - anomaly patterns in total ozone in 1997/98

Figure 1 shows the observed total ozone anomalies during the winter/spring 1997/98, calculated from EP TOMS after filtering out the linear trend,



the QBO, the seasonal and the solar activity components. Isolines are drawn at steps of 2%, as departures from the mean winter/spring (Dec through Mar) value, calculated in the absence of volcanic effects during 1979-81 and 1984-90. Dashed lines indicate negative anomalies, shaded when they are below -3%. From Figure 1 we see generally negative ozone anomalies prevailing at latitudes south of 30° N, peaking to (-6%) over western extra tropical Pacific.

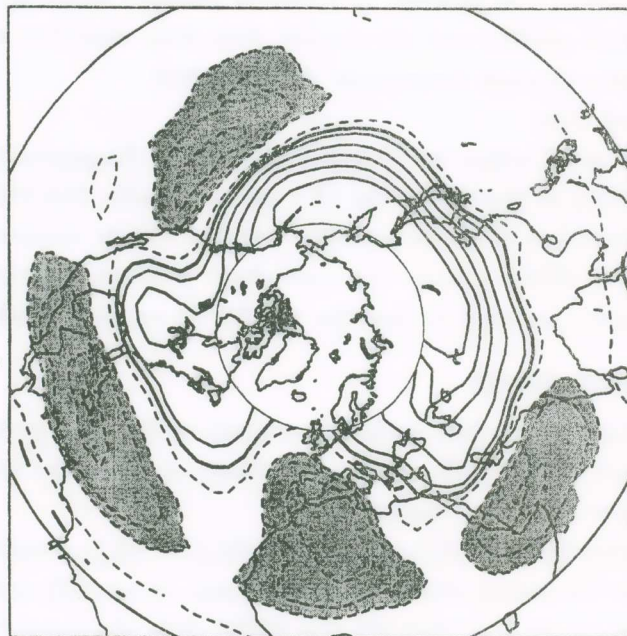


Figure 1. Total ozone changes (in %) for the winter/spring period 1997/98. Seasonal, QBO, and linear trends filtered. Contour interval 2%: the 0 line is thickened, negative contours are dashed (shading <-3%).

Positive anomalies, interrupted by smaller regions of negative anomalies, prevail to the north exceeding  $2\sigma$  over Alaska and Siberia where the peak is +10%. Earlier studies (e.g. Randel and Cobb, 1994; Zerefos et al., 1994; Kayano 1997) have proposed ENSO pattern in ozone anomalies in qualitative agreement to the pattern in Fig. 1. These studies, also Chernikov et al., (1998), and Fig. 1 show that negative ozone anomalies coincide with regions of wind divergence at 200hPa during ENSO events, while positive anomalies with convergence regions (Rasmusson and Wallace, 1983). The largest N-S total

ozone anomalies are found along the meridians between about 120W and 180. Fig. 2 (solid line) shows the observed ozone anomalies and  $\pm 1\sigma$  bars expressed in (%) as departures from the mean winter/spring as above, along the meridian 160W. Ozone anomalies for DJFM 1997/98 and the same meridian as estimated from regression analysis using actual SOI values and the long-term

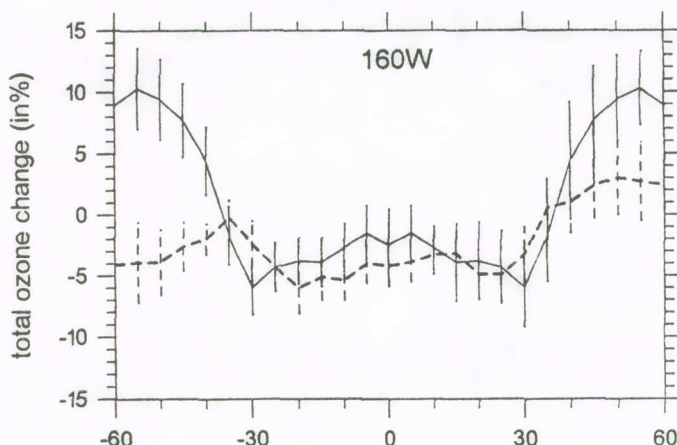


Figure 2. Total ozone anomalies and  $\pm 1\sigma$  bars expressed in (%) for the winter/spring 1997/98, observed (solid line) and statistically estimated (dashed) along the meridian 160W.

SOI - ozone correlation at each grid are shown by the dashed line. As it appears from Fig. 2, along the 160W meridian, observed and estimated ozone anomalies agree over a wide range of latitudes ( $\pm 35$ ) and qualitatively over the rest of the northern latitudes in that meridians. However, the large differences over middle and high southern latitudes reflect the limitation imposed to such analyses in the southern hemisphere summer.

Examples of such correlations are shown in Fig. 3, where 12-month running monthly mean total ozone anomalies at three stations located in Canada, the tropical pacific and Europe are compared with corresponding SOI time series. From Fig. 3 it appears that at Mauna Loa ENSO - ozone anomalies are positively correlated ( $r = 0.4$ ), even during perturb periods from volcanic eruptions (shown by the vertical lines). At the other two stations, the correlations are negative and statistically significant ( $r_{\text{Goose}} = .32$ ,  $r_{\text{Hohen}} = .41$ ) if we exclude the volcanic activity periods during which the correlation is reversed.

If should be noted, however, that not every event of the Southern Oscillation, either warm or cold, is manifested in total ozone anomaly pattern over exactly the same location or with the same amplitude, because of the large

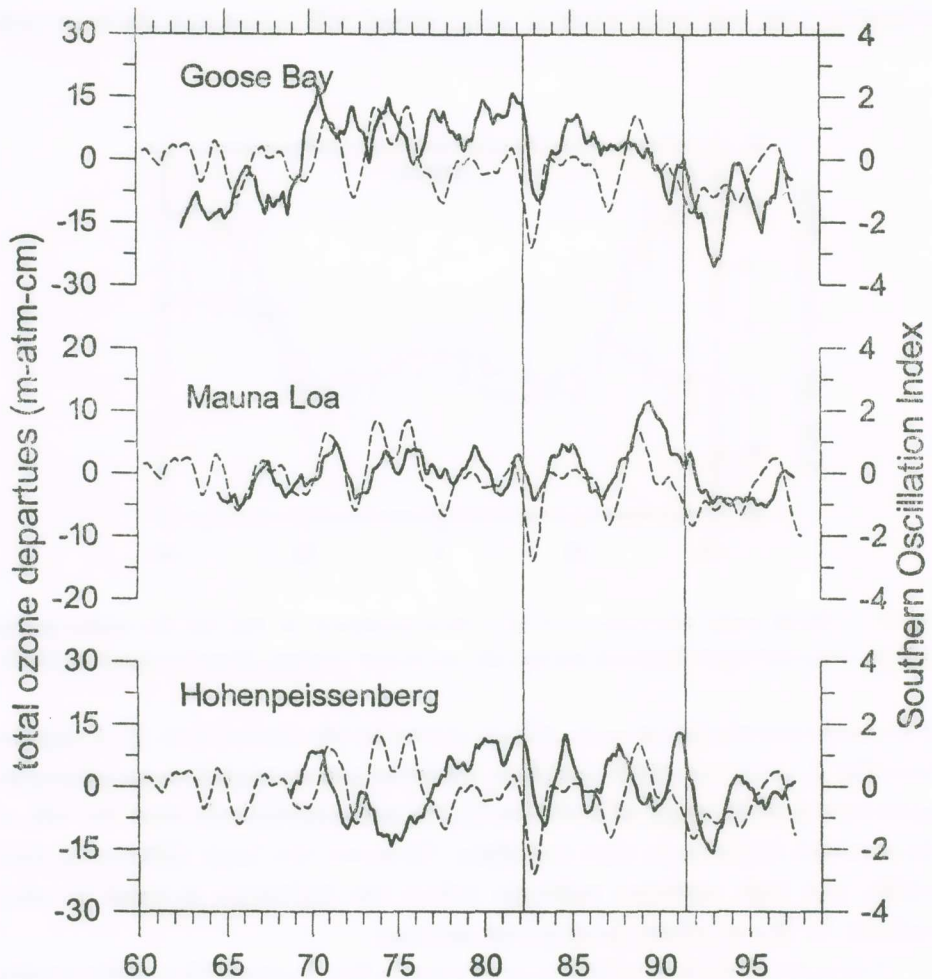


Figure 3. 12-month running mean of long term total ozone changes over Goose, Mauna Loa and Hohenpeissenberg. Vertical lines indicate large volcanic eruptions.

number of factors influencing the ozone amounts which vary from year to year and may interfere and even distort the ozone anomaly in amplitude and pattern. For example, the winter of 1997/98 has been warmer than the previous three winters, and unusually high stratospheric temperatures prevailed



over high latitudes (European Ozone coordinating Unit, report on the Winter 1997/98). This climatic anomaly in the stratosphere, whether or not linked to the 1997/98 ENSO, resulted to fewer PSCs and to less ozone destruction over high latitudes, therefore enhancing the positive ozone anomalies there.

#### b. Vertical ozone distribution

In this study we restrict our analysis of vertical soundings to the northern hemisphere, because ozone sounding records in the south do not satisfy the criteria set in the data section. The selected stations fall closely to regions of total ozone anomalies. Lag correlations between SOI and ozone anomalies at various heights were used to select the lag of highest correlation at every km level, stratified to the height of the tropopause.

Figure 4a shows the profile of ozone anomalies in (%) of the long-term mean per SOI unit for every km, along with the corresponding  $2\sigma$  error bars,

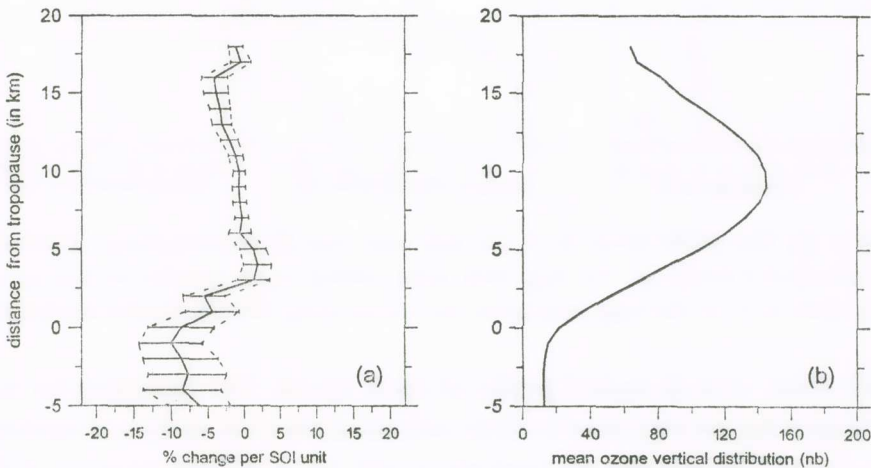


Figure 4. (a) The ENSO effect in % per SOI unit over Hilo. Horizontal bars indicate  $2\sigma$  levels. (b) The long term mean vertical ozone distribution.

for the station of Hilo, Hawaii. The mean ozone profile is also plotted for comparison (Figure 4b). The ENSO - related significant anomalies at Hilo, are found in the vicinity of the tropopause, exceeding  $-6\%$  per SOI unit. During a strong warm event of the oscillation, such as the one of 1997/98, when the seasonal winter/spring value of the SOI was less than  $-2$ , the effect should be double the one shown in Figure 4a. For a cold event, the sign of the

distrurbance will be the opposite. The sign of the effect on the vertical distribution is the same as expected from the location of the station, when compared to ENSO effect on total ozone.

Figure 5a shows results from the long-term analysis for the station of Hohenpeissenberg, where the change per SOI unit is estimated to reach over +5%, with the highest anomalies found a few kilometers above the tropopause. The mean ozone profile is shown for comparison in figure 5b, while figure 5c shows the observed change during the last winter/spring 1997/98

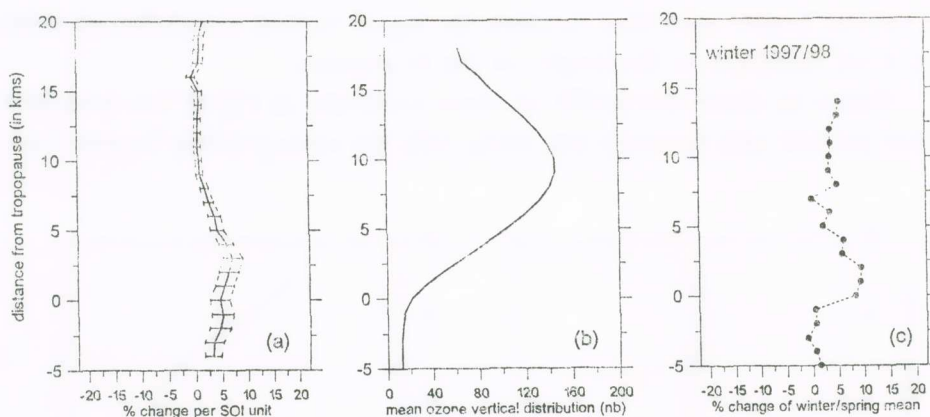


Figure 5. (a) The ENSO effect in % per SOI unit over Hohenpeissenberg. Horizontal bars indicate  $2\sigma$  levels. (b) The long term mean vertical ozone distribution and (c) the ENSO effect in % of the long term mean, for winter/spring 1997/98 (dashed-black dots).

ENSO event, seen as dashed profile of black circles. The anomalies for this last large event are very close to those estimated from the analysis of the long-term record. The analysis for Lindenberg and Goose showed response of the same sign and amplitude as for Hohenpeissenberg while the station of Edmonton, which falls at the zero isoline (Figure 1), showed response of the same sign and at the same height, but smaller than the others.

Summarizing the above, all stations examined show consistent results with the total ozone anomaly patterns caused by ENSO events seen in Figures 1 and 3. The ENSO signal in the lower stratosphere appears with reversed polarity relative to the upper troposphere, indicative of geopotential height field perturbations decaying with height (Yulaeva and Wallace, 1994). The warming of the tropical troposphere, reduces the static stability near the



tropopause level, enhances the potential vorticity gradient, and the disturbance moves away from the region as a train of dispersing nearly stationary Rossby waves. The dynamical effect in the lower stratosphere would be evident near the tropopause region. Variations in the tropopause height explain a large portion of total ozone variability (e.g. Schubert and Munteanu, 1988).

Figure 6 provides an epilogue to the anomalies induced in the thermal structure of the troposphere and lower stratosphere by the interannual varia-

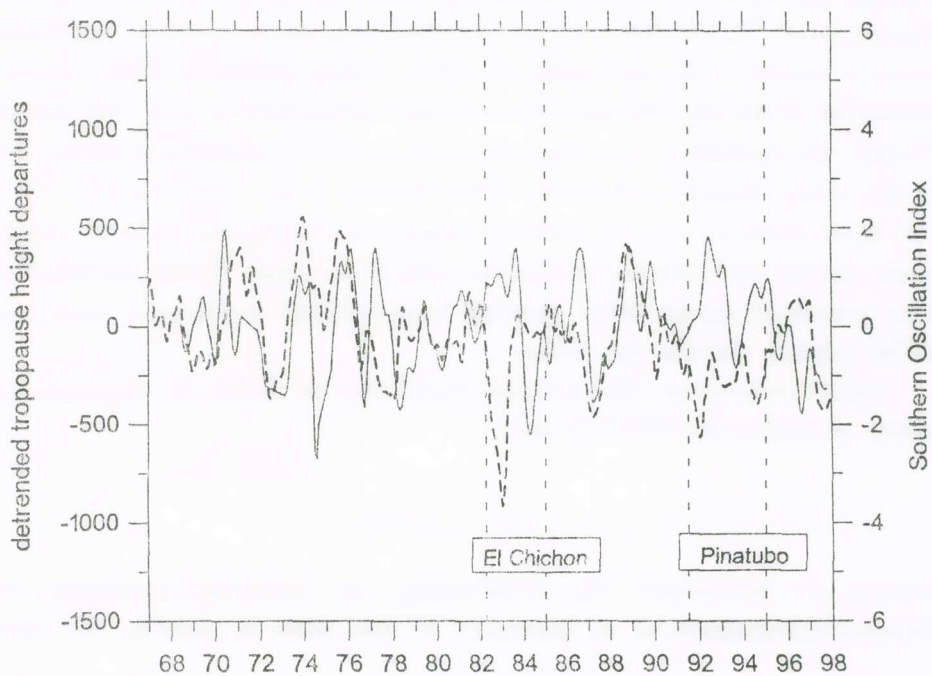


Figure 6. Tropopause height anomalies (seasonal and linear trend effect filtered) over Hohenpeissenberg (solid line). The SOI (dashed line) time series is plotted for comparison. Vertical dashed lines indicate periods with enhanced volcanic aerosol.

bility of the Southern Oscillation and its implications in regional ozone surplus or deficiency. The figure shows statistically significant positive correlation to exist between the tropospheric height anomalies (linear trend removed) over Hohenpeissenberg, and the time series of SOI, excluding the periods of volcanic interference, since volcanic effects (dynamical and radiative) in the tropopause are capable of masking the ENSO signal. The tropopause ano-

malies - SOI correlation ( $r = 0.4$ ) is significant at the 95% confidence level and independently agrees with the findings discussed before.

In conclusion, the ENSO signal in the vertical ozone profiles over north Pacific, north America and the European region, is statistically significant at the 95% confidence level as evidenced from the longest available ozonesonde records deposited at the WMO/WOUDC Toronto data base. The signal consists of positive (or negative) anomalies exceeding  $2\sigma$  near the tropopause. Peak departures are expected to occur few km above the tropopause reaching +6% per SOI unit over Hohenpeissenberg and Goose Bay. At Hilo, the negative departures of - 5% per SOI unit just above the tropopause result to significant ozone anomalies over that center of action during periods of ENSO events. Anomalies of the opposite sign are expected during periods with cold events. Finally, the qualitative agreement between the ENSO patterns in earlier and in this study (Randel and Cobb, 1994; Zerefos et al., 1994; Kayano, 1997) and those observed over the northern hemisphere during the 1997/98 winter/spring period need further verification with future large events, undisturbed from competing signals as for example large volcanic eruptions or other non ENSO related climatic anomalies.

**Acknowledgments:** The authors would like to thank R. Nagatani for kindly providing the SBUV/2 data.

#### Π Ε Ρ Ι Λ Η Ψ Η

**Μελέτη των διαταραχών της κατακόρυφης και όριζοντίας κατανομής του Όζοντος σχετιζομένων με το φαινόμενο El Nino κατά το χειμώνα 1997-1998**

Στην παρούσα μελέτη εξετάζονται οι διαταραχές τόσο του όλικου όζοντος όσο και της κατακόρυφης κατανομής του, κατά τη διάρκεια του τελευταίου θερμού επεισοδίου της Νότιας Κύμανσης, η όπως επεκράτησε να λέγεται, ως φαινόμενο 'El Nino (ENSO). Το φαινόμενο αυτό εκδηλώνεται άπεριοδικά, με άρχική θέση εμφάνισης την περιοχή του τροπικού Ειρηνικού Όκεανού και ισχυροτάτη επίδραση τόσο στις ωκεάνιες ύδατινες μάζες, όσο και στην υπερκείμενη άτμόσφαιρα, προκαλώντας μεγάλες άτμοσφαιρικές διαταραχές, οι όποίες εμφανίζονται άλλοι μόν με πλημμύρες άλλοι δέ με ξηρασία.

Η παρούσα μελέτη άσχολείται άποκλειστικώς με τις άτμοσφαιρικές μεταβολές, οι όποίες διαδίδονται σε παγκόσμια κλίμακα και ειδικότερα με τις επιπτώ-

σεις στὶς μεταβολὲς τοῦ προστατευτικοῦ στρώματος τοῦ ὄζοντος. Ἀποδεικνύεται ὅτι ἡ ἐπίδραση τοῦ φαινομένου El Nino στὸ ὄζον δὲν παρουσιάζει ζωνικὴ συμμετρία, ἀλλὰ διαδίδεται δι' ἐνὸς συρμοῦ ἀτμοσφαιρικῶν κυμάτων, ἀπὸ τὸν ἰσημερινὸ καὶ τὴν περιοχὴ τοῦ τροπικοῦ Εἰρηνικοῦ Ὤκεανοῦ πρὸς βορρὰ καὶ νότο, μὲ τὴν ἰσχυρότερη διάδοση πάντα πρὸς τὸ χειμερινὸ ἡμισφαίριο. Γιὰ τὴν ποσοτικὴ καὶ ποιοτικὴ περιγραφὴ τοῦ φαινομένου, ἔχει δημιουργηθεῖ δείκτης ὁ ὁποῖος ὀνομάζεται Δείκτης τῆς Νοτίου Κυμάνσεως (Southern Oscillation Index SOI).

Ὁ δείκτης αὐτὸς ὑπολογίζεται ἀπὸ τὴ διαφορὰ τῆς ἀτμοσφαιρικῆς πιέσεως ἐπιφανείας μεταξὺ τῆς νήσου Ταϊτῆς (στὸ νοτιανατολικὸ Εἰρηνικὸ Ὤκεανὸ) καὶ τῆς πόλεως Darwin στὴ βόρεια Αὐστραλία. Μὲ τὴ χρῆση αὐτοῦ τοῦ δείκτη γίνεται ἀμέσως ἐμφανὴς ἡ κυματικὴ φύση τοῦ φαινομένου, τὸ ὁποῖο ἐκδηλώνεται καὶ ὡς ἀνταλλαγὴ ἀερίων μαζῶν μεταξὺ ἀνατολικοῦ καὶ δυτικοῦ ἡμισφαιρίου, στὴν ὁποία ἐπιπροστίθενται παροδικὰ μεγάλὰ ἐπεισόδια El Nino, ὅπως αὐτὸ ποὺ μελετήθηκε στὴν παρούσα ἐργασία.

Τὰ δεδομένα ποὺ χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται, γιὰ μὲν τὴν περίπτωσή τοῦ ὀλικοῦ ὄζοντος, ἀπὸ παρατηρήσεις δορυφόρων τῆς NASA καὶ τοῦ NOAA (ΗΠΑ). Γιὰ τὴ μελέτῃ τῆς κατακόρυφης κατανομῆς τοῦ ὄζοντος χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ἀπὸ 3 αὐστηρῶς ἐπιλεγμένους σταθμούς, τῶν ὁποίων οἱ παρατηρήσεις εἶναι κατατεθειμένες στὴ βάση δεδομένων τοῦ Παγκοσμίου Κέντρου Στοιχείων Ὁζοντος, τὸ ὁποῖο ἐδρεύει στὸ Τορόντο τοῦ Καναδᾶ. Ἀπὸ τὴν ἴδια βάση δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν καὶ δεδομένα μέτρησης ὀλικοῦ ὄζοντος ἀπὸ ἐπίγειους σταθμούς, ἐπιλεγμένους ἔτσι ὥστε νὰ συμπίπτουν μὲ τοὺς σταθμούς μετρήσεως τῆς κατακόρυφης κατανομῆς τοῦ ὄζοντος. Ἡ μελέτῃ καὶ ἐν συνεχείᾳ ἡ ἀπάλειψη τῆς ἐπίδρασης ἄλλων γνωστῶν περιοδικῶν διαταραχῶν στὸ ὄζον ἔγινε μὲ τὴ βοήθεια στατιστικοῦ μοντέλου. Μὲ τὴ βοήθεια τοῦ μοντέλου αὐτοῦ ἀπαλείφθηκε ἐπίσης ἡ γενικότερη κλιματικὴ τάση ἀραίωσης τοῦ ὄζοντος μὲ σκοπὸ τὴ διευκόλυνση τῆς σύγκρισης μὲ προηγούμενα ἐπεισόδια τοῦ El Nino.

Ἡ μεθοδολογία αὐτὴ ἐφαρμόσθηκε τόσο στὸ ὀλικὸ ὄζον ὅσο καὶ στὴν κατακόρυφη κατανομὴ του. Εἰδικότερα, γιὰ τὴ μελέτῃ τῆς κατακόρυφης κατανομῆς, ἔγινε ἀνάλυση τῶν πρωτογενῶν στοιχείων, μὲ τὴν ὁποία ἐπετεύχθη ὁ ὑπολογισμὸς τῆς κατανομῆς τοῦ ὄζοντος καθ' ὕψος. Ἡ κατανομὴ αὐτὴ ἔγινε ἀνὰ χιλιόμετρο ὕψους, ὑπολογισμένου μὲ ἀναφορὰ τοῦ ὕψους τῆς τροποπαύσεως.

Ἡ τροποποίησις εἶναι τὸ φυσικὸ διαχωριστικὸ στρώμα μεταξὺ τοῦ χαμηλοτέρου τμήματος τῆς ἀτμόσφαιρας, τὸ ὁποῖο ὀνομάζεται τροπόσφαιρα καὶ περιλαμβάνει περίπου τὸ 75% τῆς ἀτμοσφαιρικῆς μάζας καὶ τῆς ἀμέσως ὑπερκειμένης ἀτμο-



σφαιρικής περιοχής της στρατόσφαιρας, στην οποία υπάρχει και το πλεϊστον του προστατευτικού στρώματος του όζοντος. Χρησιμοποιώντας ως άναφορά το ύψος της τροποπαύσεως, επιτυγχάνεται σαφής διαχωρισμός της κατανομής του όζοντος στις ατμοσφαιρικές περιοχές της τροποσφαίρας και της στρατοσφαίρας, στις οποίες οι ατμοσφαιρικές διαταραχές εκδηλώνονται διαφορετικές, πολλές φορές και με αντίθετο πρόσημο.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες μεταβολές του όλικου όζοντος στο Βόρειο Ήμισφαίριο από την ανάλυση δεδομένων δορυφορικών παρατηρήσεων. Οι μεταβολές αυτές παρουσιάζονται ως ποσοστόν επί τοις εκατό της μακροχρόνιας μέσης τιμής του, κατά την ψυχρή περίοδο (από Δεκέμβριο μέχρι τέλη Μαρτίου) του 1997-1998. Η εποχική μεταβολή, όπως και οι επιδράσεις της σχεδόν διετούς κύμανσης (QBO), της ήλιακής δραστηριότητας καθώς και η μακροχρόνια κλιματική τάση έχουν αφαιρεθεί. Οι ισοπληθείς έχουν χαραχθεί σε βήματα ανά 2% και οι αρνητικές μεταβολές έχουν χαραχθεί διακεκομμένες. Οι σκιασμένες περιοχές δηλώνουν μεταβολές μικρότερες του 3%.

Από την ανάλυση προκύπτει ότι εμφανίζεται μείωση του όλικου όζοντος κατά τους μήνες οι οποίοι έπονται έπεισοδίων της Νότιας Κύμανσης/ENSO, ή οποία μείωση είναι έντονότερη σε γεωγραφικά πλάτη νοτίως των 30 μοιρών βορείου πλάτους και η οποία φθάνει σε ποσοστό μέχρι και -6%, καλύπτοντας την περιοχή του δυτικού Ειρηνικού Ώκεανού, πάνω από την τροπική ζώνη. Όπως παρατηρούμε, δεν εμφανίζεται ζωνική συμμετρία.

Στις βόρειες περιοχές υπερισχύουν διαταραχές οι οποίες δηλώνουν αύξηση του όλικου όζοντος με μέγιστο στις περιοχές της Αλάσκας και της Σιβηρίας, όπου η διαταραχή φθάνει σε ποσοστιαία αύξηση του όζοντος κατά +10%. Οι αρνητικές διαταραχές συμπίπτουν με τις περιοχές στις οποίες εμφανίζεται απόκλιση στο πεδίο των ανέμων πλησίον της τροποπαύσεως, ενώ οι αντίστοιχες θετικές διαταραχές συμπίπτουν με περιοχές σύγκλισης. Παρατηρούμε επίσης ότι η μεγαλύτερη άσυμμετρία και οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις κατά τον άξονα Βορρά-Νότου εμφανίζονται κατά μήκος των μεσημβρινών που περικλείουν τον Ειρηνικό Ώκεανό.

Αυτή άκριβως η άσυμμετρία απεικονίζεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 2, στο οποίο παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες μεταβολές του όλικου όζοντος ως ποσοστού επί τοις εκατό της μέσης τιμής, (%) κατά την ψυχρή περίοδο από το Δεκέμβριο του 1997 μέχρι το τέλος Μαρτίου του 1998, και κατά μήκος του μεσημβρινού 160 δυτικά του Greenwich. Οι μεταβολές αυτές έχουν υπολογισθεί επίσης από την ανάλυση των δορυφορικών παρατηρήσεων του όλικου όζοντος και εμφανίζονται ως συνεχής γραμμή

στο Σχήμα. 'Η αντίστοιχη εκτίμηση των μεταβολών, όπως αυτή υπολογίζεται από το στατιστικό μοντέλο, έχει σχεδιασθεί ως διακεκομμένη γραμμή. Οι κάθετες γραμμές δηλώνουν το στατιστικό σφάλμα ( $\pm 1\sigma$ ).

Τα αποτελέσματα της ανάλυσεως των δορυφορικών παρατηρήσεων του όλικου όζοντος είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της ίδιας μεθοδολογίας όπως αυτή εφαρμόστηκε σε δεδομένα τα οποία προέρχονται από επίγειους σταθμούς μετρήσεως όλικου όζοντος. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι δωδεκάμηνοι μέσοι κυλιόμενοι όροι των μακροχρόνιων μεταβολών του όλικου όζοντος για τους επίγειους σταθμούς Goose Bay, ο οποίος βρίσκεται στον Καναδά (53 B), το σταθμό Mauna Loa, ο οποίος βρίσκεται στο σύμπλεγμα των νήσων Hawaii στον τροπικό Ειρηνικό Ωκεανό (20 B), και τέλος στο σταθμό του Hohenpeissenberg, ο οποίος είναι όρεινός σταθμός (975 μέτρα ύψομετρο) στην περιοχή της Βαυαρίας της Κεντρικής Ευρώπης (49 B). Οι κάθετες γραμμές δηλώνουν τη χρονολογία των μεγάλων ήφαιστειακών εκρήξεων των ήφαιστειών El Chichon και Pinatubo, τα έτη 1982 και 1991 αντίστοιχα. 'Ο προαναφερθείς δείκτης της Νότιας Κύμανσης / ENSO έχει σχεδιασθεί ως διακεκομμένη γραμμή. 'Από το Σχήμα 3 γίνεται εμφανές ότι οι διακυμάνσεις του όλικου όζοντος στη Mauna Loa, στον τροπικό Ειρηνικό Ωκεανό παρουσιάζουν θετική συσχέτιση με τις μεταβολές του δείκτη της Νότιας Κύμανσης / ENSO, ή οποία συσχέτιση είναι στατιστική σημαντική σε επίπεδα μεγαλύτερα του 95%, ενώ οι δύο άλλοι σταθμοί παρουσιάζουν αρνητική συσχέτιση, επίσης στατιστικά σημαντική όταν παραλειφθούν οι χρονικές περιόδους κατά τις οποίες παρεμβάλλονται οι ήφαιστειακές εκρήξεις.

Πρέπει να τονισθεί ότι τα επεισόδια της Νότιας Κύμανσης / ENSO δεν εμφανίζουν πάντα ακριβώς το ίδιο ποσοστό επίδρασης, και αυτό εξ αιτίας του μεγάλου αριθμού παραγόντων οι οποίοι επηρεάζουν το όλικό όζον και οι οποίοι μεταβάλλονται από έτος σε έτος. 'Ο χειμώνας του έτους 1997-98 υπήρξε θερμότερος από τους χειμώνες της τελευταίας πενταετίας, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μικρότερου αριθμού Πολικών Στρατοσφαιρικών Νεφών, τα οποία είναι παγωμένα νέφη που εμφανίζονται κυρίως το χειμώνα στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη και τα οποία συμβάλλουν κατά κύριο λόγο στην καταστροφή του στρώματος του όζοντος. 'Η μείωση της εμφάνισης των Πολικών Στρατοσφαιρικών Νεφών είχε έπομένως ως άμεση συνέπεια μικρότερη καταστροφή του όζοντος στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη του βορείου ημισφαιρίου κατά το χειμώνα 1997-98.

'Από την ανάλυση των μεταβολών της κατακόρυφης κατανομής του όζοντος στους 3 επιλεγμένους σταθμούς προκύπτει ότι η επίδραση του ENSO στο όζον εμφανίζεται σημαντική, με μέγιστο στην περιοχή ακριβώς πάνω από την τροπό-



παυση. Η κατεύθυνση της επίδρασης αυτής, θετική ή αρνητική, βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία με τις αναμενόμενες θετικές ή αρνητικές αποκλίσεις του όλικου ὄζοντος στην αντίστοιχη γεωγραφική περιοχή στην οποία ανήκει ο κάθε σταθμός.

Στά ἐπόμενα σχήματα 4 καὶ 5 παρουσιάζονται τὰ δύο πιὸ σημαντικὰ ἀποτελέσματα τῆς ἀνάλυσης τῶν μεταβολῶν τῆς κατακόρυφης κατανομῆς τοῦ ὄζοντος, γιὰ τοὺς σταθμοὺς Hilo καὶ Hohenpeissenberg, στὸν τροπικὸ Εἰρηνικὸ καὶ στὴν Εὐρώπη ἀντίστοιχα.

Στὸ Σχῆμα 4 (α) παρουσιάζεται ἡ επίδραση τῆς Νότιας Κύμανσης / ENSO στὸν σταθμὸ Hilo. Ὁ σταθμὸς αὐτὸς βρίσκεται ἐπίσης στὸ σύμπλεγμα τῶν νήσων Hawaii στὸν τροπικὸ Εἰρηνικὸ Ὠκεανό, καὶ σὲ γεωγραφικὸ πλάτος 20 Β. Ἡ επίδραση τοῦ ENSO παρουσιάζεται ὡς ποσοστιαία μεταβολὴ (%) ἀνὰ μονάδα μεταβολῆς τοῦ δείκτη τῆς Νότιας Κύμανσης / ENSO. Οἱ ὀριζόντιες γραμμὲς δηλώνουν τὰ ἐπίπεδα τοῦ διπλάσιου τῆς τυπικῆς αποκλίσεως τῶν τιμῶν (2 σ). Στὸ Σχῆμα 4(b) παρουσιάζεται ἡ μακροχρόνια κατακόρυφη κατανομὴ τοῦ ὄζοντος σὲ nanobars, χάριν συγκρίσεως.

Στὸ Σχῆμα 5(a) παρουσιάζεται ἡ επίδραση τῆς Νότιας Κύμανσης / ENSO στὴν κατακόρυφη κατανομὴ τοῦ ὄζοντος στὸν σταθμὸ Hohenpeissenberg. Ὅπως προαναφέρθηκε, ὁ σταθμὸς αὐτὸς εἶναι ὀρεινὸς σταθμὸς τῆς κεντρικῆς Εὐρώπης, καὶ βρίσκεται σὲ βόρειο πλάτος 48 Β. Ἡ επίδραση τῆς Νότιας Κύμανσης / ENSO παρουσιάζεται ὡς ποσοστιαία μεταβολὴ (%) ἀνὰ μονάδα μεταβολῆς τοῦ δείκτη. Οἱ ὀριζόντιες γραμμὲς δηλώνουν τὰ ἐπίπεδα τοῦ 2 σ, ἐνῶ στὸ Σχῆμα 5(a) παρουσιάζεται ἡ μακροχρόνια κατακόρυφη κατανομὴ τοῦ ὄζοντος σὲ nanobars. Στὸ τρίτο τμήμα τοῦ Σχήματος 5, (ε) παρουσιάζεται ἡ επίδραση τῆς Νότιας Κύμανσης / ENSO στὴν κατακόρυφη κατανομὴ τοῦ ὄζοντος, γιὰ τὴν ψυχρὴ περίοδο ἀρχῆς Δεκεμβρίου 1997 - τέλη Μαρτίου 1998, ὡς ποσοστιαία μεταβολὴ (ἐκατοστιαῖο ποσοστὸ τῆς μακροχρόνιας μέσης τιμῆς).

Ἀπὸ τὰ δύο αὐτὰ Σχήματα, παρατηροῦμε ὅτι ὁ μὲν σταθμὸς τοῦ Hilo παρουσιάζει μείωση τοῦ ὄζοντος στὴν περιοχή τῆς τροποπαύσεως, ἡ ὁποία φθάνει σὲ ποσοστὰ μικρότερα τοῦ -6% ἀνὰ μονάδα τοῦ δείκτη τῆς Νότιας Κύμανσης / ENSO, ἐνῶ ὁ σταθμὸς τοῦ Hohenpeissenberg παρουσιάζει θετικὴ ἀπόκλιση, σὲ αὔξηση τοῦ ὄζοντος μερικὰ χιλιόμετρα πάνω ἀπὸ τὴν τροπόπαυση, κατὰ περίπου 5% ἀνὰ μονάδα τοῦ δείκτη. Αὐτὸ σημαίνει ὅτι, στὴν περίπτωση ἐνὸς ἰσχυροῦ ἐπεισοδίου, ὅπως γιὰ παράδειγμα αὐτὸ τοῦ 1997/98, ὅπου ἡ τιμὴ τοῦ δείκτη κατὰ τὴν ψυχρὴ περίοδο τοῦ 1997-1998 ἔφθασε τὸ (-2), οἱ ποσοστιαῖες αὐτὲς μεταβολὲς διπλασιάζονται, δηλαδὴ φθάνουν στὴν περίπτωση τοῦ Hilo τὸ -12%, ἐνῶ στὸ Hohenpeissenberg τὸ +10%.



Τὸ σῆμα τῆς Νότιας Κύμανσης / ENSO στὴν κατώτερη στρατόσφαιρα ἐμφανίζεται ἀντίθετο ἀπὸ ὅ,τι στὴν ἀνώτερη τροπόσφαιρα, ἐνδεικτικὸ διαταραχῶν στὸ πεδίο τῶν γεωδυναμικῶν ὑψῶν, οἱ ὁποῖες ἐξασθενοῦν μὲ τὸ ὕψος. Ἡ θέρμανση τῆς τροπικῆς τροπόσφαιρας, χαρακτηριστικὸ τῶν θερμῶν ἐπεισοδίων τῆς Νότιας Κύμανσης / ENSO, μειώνει τὴ στατικὴ εὐστάθεια στὴν περιοχὴ τῆς τροποπαύσεως, μὲ δυναμικὸ ἀποτέλεσμα τὴ μεταβολὴ τοῦ ὕψους τῆς τροποπαύσεως καὶ μάλιστα τὴ «συρρίκνωση» τοῦ στρώματος τοῦ ὄζοντος.

Οἱ μεταβολές τοῦ ὕψους τῆς τροποπαύσεως, οἱ ὁποῖες καὶ συσχετίζονται μὲ τὰ ἐπεισόδια τῆς Νότιας Κύμανσης / ENSO, συνεισφέρουν ἄμεσα στὶς διαταραχές τοῦ ὁλικοῦ ὄζοντος. Αὐτὸ γίνεται ἐμφανές στὸ Σχῆμα 6, στὸ ὁποῖο παρουσιάζονται οἱ μεταβολές τοῦ ὕψους τῆς τροποπαύσεως, σὲ μέτρα στὸ σταθμὸ τοῦ Hohenpeissenberg, οἱ ὁποῖες παριστάνονται μὲ τὴν συνεχῆ γραμμὴ στὸ Σχῆμα. Ἡ ἐτήσια μεταβολὴ καὶ ἡ μακροχρόνια κλιματικὴ τάση ἔχουν ἀφαιρεθεῖ. Ὁ SOI (δείκτης τῆς Νότιας Κύμανσης / ENSO) ἔχει σχεδιασθεῖ γιὰ σύγκριση, ὡς διακεκομμένη γραμμὴ. Οἱ κάθετες διακεκομμένες γραμμὲς δηλώνουν τὶς ἐκρήξεις τῶν ἠφαιστείων El Chichon καὶ Pinatubo (ἔτη 1982 καὶ 1991 ἀντίστοιχα). Παρατηροῦμε ὅτι ὑπάρχει πράγματι θετικὴ συσχέτιση μεταξὺ τοῦ ὕψους τῆς τροποπαύσεως καὶ τοῦ SOI, ἡ ὁποία εἶναι στατιστικὰ σημαντικὴ σὲ ἐπίπεδο μεγαλύτερο τοῦ 95% ὅταν ἐξαιροῦνται οἱ περίοδοι κατὰ τὶς ὁποῖες ὑπάρχει ἰσχυρὴ ἐπίδραση τῶν ἠφαιστειακῶν ἐκρήξεων. Τὰ ἀποτελέσματα αὐτὰ συμφωνοῦν ἀπόλυτα μὲ τὰ ἀντίστοιχα εὐρήματα τὰ προερχόμενα ἀπὸ τὴν ἀνάλυση τόσο τοῦ ὁλικοῦ ὄζοντος ὅσο καὶ τῆς κατακόρυφης κατανομῆς του.

Συνοψίζοντας τὰ προηγούμενα παρατηροῦμε ὅτι στὴν περίπτωση τοῦ ὁλικοῦ ὄζοντος, τὰ ἀποτελέσματα παρουσιάζουν συμφωνία μὲ προηγούμενες ἐργασίες μὲ τὴν ἐμφάνιση μεγάλων ἀσυμμετριῶν κατὰ μῆκος τοῦ ἄξονα Βορρᾶ - Νότου στὸν τροπικὸ Εἰρηνικὸ Ὁκεανό, στὴ διάρκεια τῶν μηνῶν οἱ ὁποῖοι ἔπονται μεγάλων ἐπεισοδίων τῆς Νότιας Κύμανσης / ENSO.

Ἐπίσης, σὲ ἐπιλεγμένους σταθμοὺς μετρήσεων τῆς κατακόρυφης κατανομῆς τοῦ ὄζοντος, ἐμφανίζεται ἐπίδραση τῆς Νότιας Κύμανσης / ENSO, στατιστικὰ σημαντικὴ, μερικὰ χιλιόμετρα πάνω ἀπὸ τὴν τροποποίηση. Πρέπει νὰ τονισθεῖ ὅτι κατὰ τὰ ἀντίστροφα ἐπεισόδια τῆς Νότιας Κύμανσης / ENSO, γνωστὰ καὶ ὡς ψυχρὰ ἐπεισόδια ἢ ἐπεισόδια La Nina, ὅπως γιὰ παράδειγμα ἐκεῖνο τοῦ 1988-89, οἱ μεταβολές ποὺ παρατηροῦνται τόσο στὸ ὁλικὸ ὄζον ὅσο καὶ στὴν κατακόρυφη κατανομή του ἐμφανίζονται μὲ ἀντίθετο σῆμα.

## R E F E R E N C E S

- Angell, J. K. Estimated impact of Agung, El Chichon, and Pinatubo volcanic eruptions on global and regional total ozone after adjustment for the quasi-biennial oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, 6, 647-650, 1997.
- Bojkov, R. D., The 1983 and 1985 anomalies in ozone distribution in perspective, *Mon. Weather Rev.*, 115, 2187-2201, 1987.
- Bojkov, R. D., and V. Fioletov, Changes of the lower stratospheric ozone over Europe and Canada, *J. of Geophys. Res.*, 102, 1337-1347, 1997.
- Chernikov, A. A. et al., Influence of ENSO event 1997/98 on the ozone layer of the Earth, (in Russian) *Meteorology and Hydrology*, 3, 107-112, 1998.
- Hasebe, F., Dynamical response of the tropical total ozone to sea surface temperature changes, *J. Atmos. Sci.*, 50, 345-356, 1993.
- Kayano, Principal modes of the total ozone on the Southern Oscillation timescale and related temperature variations, *J. of Geophys. Res.*, 102, 25797-25806, 1997.
- Randel, W. J., and J. B. Cobb, Coherent Variations of monthly mean total ozone and lower stratospheric temperature, *J. Geophys. Res.*, 99, 5433-5447, 1994.
- Rasmusson, E. M. and Wallace, J. M., Meteorological aspects of ENSO, *Science*, 222, 1195-1202, 1983.
- Schubert, S. D., and J. M. Munteanu, An analysis of tropopause pressure and total ozone correlations, *Mon. Weather Rev.*, 116, 569-582, 1988.
- Shiotani, M., Annual, quasi-biennial and ESO timescale variations in equatorial total ozone, *J. Geophys. Res.*, 97, 7625-7633, 1992.
- Trenberth, K. E., Spatial and temporal variations of the Southern Oscillation, *Q. J.R. Meteorol. Soc.* 102, 639-653, 1976.
- Tribbia, J. J., The rudimentary theory of atmospheric teleconnections associated with ENSO, in *Teleconnections linking worldwide climate anomalies*, Eds M. Glantz, R. Katz and N. Nicholls, Cambridge, Univ. press, New York, 1991.
- Wallace, J. M., and D. Gutzler, teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter, *Mon. Weather Rev.* 100, 518-541, 1981.
- World Meteorological Organisation (WMO), *Int. Meteorological Vocabulary*, No 182, 1992.
- World Meteorological Organisation (WMO), *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994*, W. M. O. Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 37.
- Yulaeva and Wallace, The signature of ENSO in global temperature and precipitation fields derived from the Microwave Sounding Unit, *J. of Climate*, 7, 1719-1736, 1994.
- Zerefos, C. S., K. Tourpali, A. F. Bais, Further studies on possible volcanic signal to the ozone layer, *J. of Geophys. Res.*, 99, D'2, 25741-25746, 1994.