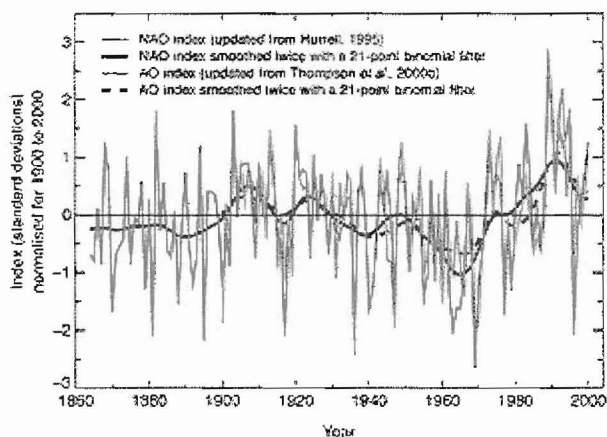




ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

Η ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΟΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΟΝ ΠΛΑΝΗΤΗ (IPCC, 2001)



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΩΝ
ΠΑΝΗ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ
ΠΑΝΗ ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ:
Χ.ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΥ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2010

100163

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ

QC
989.

8865

HB 958467
HC 1264988

P3
2010
Δ17
C-1

Εισαγωγή

Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC) είναι επιστημονική διακυβερνητική επιτροπή υπό την αιγίδα του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ). Ιδρύθηκε το 1988 από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό και το Πρόγραμμα Περιβάλλοντος. Ο σκοπός της επιτροπής είναι η αξιολόγηση της επιστημονικής βάσης και των ερευνών που διεξάγονται για την μελέτη των κλιματικών αλλαγών. Η επιτροπή αξιολογεί επίσης τις συνέπειες των κλιματικών αλλαγών που προέρχονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα, μελετώντας πιθανές πολιτικές και δράσεις για την αντιμετώπιση των ενδεχόμενων κινδύνων. Συντονίζει έμπιστημονες από ολόκληρο τον κόσμο και μέχρι το 2007 είχε δημοσιεύσει τέσσερις εκθέσεις (1990, 1995, 2001, 2007) σχετικά με τις κλιματικές αλλαγές που παρατηρούνται και τις πιθανές επιπτώσεις τους. Οι εκθέσεις της IPCC αποτελούν σημείο αναφοράς για τα ζητήματα που άπτονται της παγκόσμιας θέρμανσης και βασίζονται σε επιστημονικές δημοσιεύσεις ειδικών ερευνητών.

Η επιτροπή είναι ένα διακυβερνητικό σώμα, ανοιχτό σε όλες τις χώρες μέλη της Παγκόσμιας Μετεωρολογικής Οργάνωσης και του Προγράμματος για το Περιβάλλον του ΟΗΕ. Συνέρχεται μια φορά ετησίως, προκειμένου να καθοριστούν η εσωτερική λειτουργία, οι αρχές και το πρόγραμμα εργασίας της ή να εγκριθούν οι εκθέσεις της. Περιλαμβάνει τρεις ομάδες εργασίας για την αξιολόγηση των επιστημονικών παραμέτρων των κλιματικών μεταβολών, των κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεών τους και των πιθανών πολιτικών που μπορούν να εφαρμοσθούν για την αντιμετώπισή τους αντίστοιχα.

Η εργασία αυτή, που αποτελεί μέρος της Τρίτης Έκθεσης Αξιολόγησης (TAR-Third Assessment Report), βασίζεται στην έρευνα μιας ομάδας επιστημόνων της IPCC (WGI- Working Group I) και εστιάζει στην επιστήμη της κλιματικής μεταβολής. Συγκεκριμένα, βασίζεται στο δεύτερο από τα 14 κεφάλαια της έρευνας, τα οποία περιλαμβάνουν:

- ο το φυσικό κλιματικό σύστημα,
- ο τους παράγοντες που επηρεάζουν το κλίμα,
- ο τις αναλύσεις του κλίματος στο παρελθόν,
- ο τις αναπαραστάσεις της κλιματικής μεταβολής στο μέλλον και
- ο την ανακάλυψη και απόδοση της ανθρώπινης επίδρασης στο κλίμα.

Γενικά

Η καλύτερη εκτίμηση της μεταβολής της παγκόσμιας επιφανειακής θερμοκρασίας είναι μια αύξηση των 0.6°C από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Η αύξηση των 0.15°C στη θερμοκρασία όπως προσδιορίστηκε από τη SAR (IPCC WGI (Working Group I) - Second Assessment Report / Δεύτερη Έκθεση Αξιολόγησης) οφείλεται μερικώς στα πρόσθετα δεδομένα των τελευταίων 5 ετών. Είναι πιθανό ότι υπήρχαν πραγματικές διαφορές ανάμεσα στο ρυθμό θέρμανσης της τροπόσφαιρας και της επιφάνειας τα τελευταία 20 έτη, οι οποίες δεν είναι πλήρως εξακριβωμένες. Νέες παλαιοκλιματικές αναλύσεις των τελευταίων 1000 ετών στο Β.Ημισφαίριο δείχνουν ότι η θέρμανση του 20^{ου} αιώνα είναι πιθανώς η μεγαλύτερη αυτής της περιόδου. Επιπλέον, η δεκαετία του '90 είναι πιθανώς η θερμότερη του αιώνα, τη περίοδο αυτή. Νέες αναλύσεις δείχνουν ότι ο ωκεανός έχει θερμανθεί σημαντικά από τη δεκαετία του '40. Συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης στο ποσό της θέρμανσης ($>50\%$) συνέβη στα ανώτερα 300 m, κυρίως από τα μέσα της δεκαετίας του '50. Η παγκόσμια δεκαετής μεταβλητότητα της θέρμανσης παίζει σημαντικό ρόλο στις έρευνες. Οι νυχτερινές ελάχιστες θερμοκρασίες συνεχίζουν να αυξάνονται, παρατείνοντας την περίοδο ελεύθερης παγετού σε πολλές περιοχές μέσου και μεγάλου γεωγραφικού πλάτους. Επίσης, έχει συμβεί μια μείωση στη συχνότητα των ακραίων χαμηλών θερμοκρασιών, χωρίς μια αντίστοιχη αύξηση στη συχνότητα των ακραίων υψηλών θερμοκρασιών. Τα τελευταία 25 χρόνια, είναι πιθανό ότι οι ατμοσφαιρικοί υδρατμοί έχουν αυξηθεί σε πολλές περιοχές του Β.Ημισφαιρίου. Μία μείωση της μεταβλητότητας στις ημερήσιες και στις υπο-μηνιαίες χρονοσειρές της θερμοκρασίας έχει συμβεί τον 20^ο αιώνα. Νέες έρευνες αποδεικνύουν τη μείωση στην έκταση του Αρκτικού θαλάσσιου πάγου, ειδικά την άνοιξη και το καλοκαίρι. Σύμφωνα με αυτές είναι και οι αναλύσεις που δείχνουν μια 40% μείωση περίπου στο μέσο πάχος του θερινού Αρκτικού θαλάσσιου πάγου τα τελευταία 30 έτη, παρόλο που οι αβεβαιότητες είναι δύσκολο να εκτιμηθούν και η επίδραση της πολυ-δεκαετούς μεταβλητότητας δεν μπορεί να προσδιοριστεί ακόμη. Ευρείς

αυξήσεις είναι πιθανό να έχουν συμβεί ανάλογα προς την ολική βροχόπτωση, η οποία προέρχεται από ισχυρά και ακραία γεγονότα υετού πάνω από τη ξηρά στα μέσα και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη.

Μεταβολές στη Θερμοκρασία και σχετικές Μεταβολές

Μεταβολές της θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια σύμφωνα με καταγραφές οργάνων

- Οι παγκόσμιες μέσες επιφανειακές θερμοκρασίες έχουν αυξηθεί περίπου κατά 0.6°C από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης συνέβη σε δύο περιόδους, το 1910 έως το 1945 και το 1976 μέχρι σήμερα. Η εντονότερη πρόσφατη θέρμανση συμβαίνει το χειμώνα στο εξωτροπικό Β.Ημισφαίριο. Ο ρυθμός θέρμανσης από το 1976 ($0.17^{\circ}\text{C}/\text{δεκαετία}$) είναι λίγο εντονότερος από αυτόν της περιόδου 1910-1945 ($0.14^{\circ}\text{C}/\text{δεκαετία}$), παρόλο που η ολική αύξηση της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη την περίοδο 1910-1945. Η πιο πρόσφατη θερμή περίοδος έχει επίσης έναν ταχύτερο ρυθμό θέρμανσης πάνω από τη ξηρά σε σχέση με τους ωκεανούς. Η υψηλή παγκόσμια θερμοκρασία που σχετίζεται με το El Nino του 1997/98 ξεχωρίζει στις θερμοκρασίες της τροπόσφαιρας και της επιφάνειας, ως ένα έντονο γεγονός, ακόμη και μετά τη μελέτη του πρόσφατου ρυθμού θέρμανσης.
- Νέες αναλύσεις που περιλαμβάνουν μοντέλα θερμοκρασιακών μεταβολών στην επιφάνεια της ξηράς και νέες μελέτες για την επίδραση της αστικοποίησης στις παγκόσμιες τάσεις της θερμοκρασίας στη ξηρά, επιβεβαιώνουν το 'μέγεθος' της παγκόσμιας θέρμανσης από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Οι μεταβολές των θερμοκρασιών στην επιφάνεια της θάλασσας (SST) συνδέονται με τις μεταβολές των θερμοκρασιών του αέρα στην επιφάνεια της ξηράς κατά μήκος του ορίου ξηράς-ωκεανού

- Οι τάσεις θερμοκρασίας του 20^{ου} αιώνα δείχνουν μια ευρεία μορφή τροπικής θέρμανσης, ενώ οι εξωτροπικές τάσεις έχουν γίνει πιο μεταβλητές. Η θέρμανση από το 1910 μέχρι το 1945 ήταν αρχικά συγκεντρωμένη στον Β.Ατλαντικό ωκεανό και σε γειτονικές περιοχές. Την περίοδο 1946-1975, στο Β.Ημισφαίριο παρατηρείται ψύξη ενώ στο Ν.Ημισφαίριο θέρμανση. Η πρόσφατη θέρμανση του 1976-2000 ήταν σύγχρονη παγκοσμίως, αλλά με έμφαση στις ηπείρους του Β.Ημισφαιρίου το χειμώνα και την άνοιξη, με έναν ετήσιο κύκλο ψύξης σε μέρη των ωκεανών του Ν.Ημισφαιρίου και στην Ανταρκτική. Πρόσφατα, η ψύξη του Β.Ατλαντικού ωκεανού έχει αντιστραφεί. Γενικά, η θέρμανση στο Ν.Ημισφαίριο είναι πιο ομοιόμορφη στις καταγραφές των οργάνων απ' ό,τι στο Β.Ημισφαίριο.
- Οι τύποι μεταβολής της παγκόσμιας θέρμανσης από τη δεκαετία του '70 σχετίζονται με τη θετική (από τα δυτικά) φάση της Β.Ατλαντικού (NAO)/Αρκτικής Κύμανσης (AO) και πιθανώς με τη, δεκαετή έως πολύ-δεκαετή, μεταβλητότητα στον Ειρηνικό ωκεανό.
- Η πολύ-δεκαετής διακύμανση των SST στον Β.Ατλαντικό βρίσκεται σε φάση ανόδου από τα τέλη της δεκαετίας του '80. Η θέρμανση πολλών περιοχών του ωκεανού έχει επιταχυνθεί τα τελευταία 5 έτη και είναι πιθανό να έχει συμβάλει σε αρκετά απότομες παράλληλες αυξήσεις της θερμοκρασίας του αέρα κοντά στην επιφάνεια στο μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης.
- Νέες αναλύσεις δείχνουν ότι το παγκόσμιο ποσό θερμότητας των ωκεανών έχει αυξηθεί από τα τέλη της δεκαετίας του '50. Οι επιστήμονες μελετούν την παγκόσμια δεκαετή μεταβλητότητα της αύξησης αυτής. Το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας (>50%) συνέβη στα ανώτερα 300 m και είναι ίση με μια μέση αύξηση της τάξης των 0.037° C/δεκαετία.
- Αναλύσεις των μέσων ημερήσιων μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών του αέρα στην επιφάνεια της ξηράς συνεχίζουν να υποστηρίζουν μια

μείωση στη διακύμανση της ημερήσιας θερμοκρασίας σε πολλές περιοχές του πλανήτη. Παγκοσμίως, οι ελάχιστες θερμοκρασίες αυξάνουν σχεδόν με διπλάσιο ρυθμό από τις μέγιστες τη περίοδο 1950-1993. Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας, το διάστημα αυτό, ήταν 0.1°C και 0.2°C για την μέγιστη και την ελάχιστη θερμοκρασία, αντίστοιχα. Αυτός είναι ο μισός από το ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από τους ωκεανούς, την περίοδο αυτή.

Μεταβολές της θερμοκρασίας και σχετικές μεταβολές

- Οι αλπικοί και οι ηπειρωτικοί παγετώνες έχουν υποχωρήσει σε σημαντικό βαθμό λόγω της θέρμανσης του 20^{ου} αιώνα. Σε μερικές παραθαλάσσιες περιοχές αναπτύσσονται παγετώνες, κυρίως λόγω της αύξησης των βροχοπτώσεων που σχετίζονται με μεταβολές στην κυκλοφορία της ατμόσφαιρας.
- Στο Β.Ημισφαίριο, η διάρκεια κάλυψης των λιμναίων και των θαλάσσιων πάγων τον τελευταίο αιώνα (ή περισσότερο) δείχνει εκτεταμένες μειώσεις, κατά μέσο όρο δύο εβδομάδων λιγότερο.
- Υπάρχει ένας υψηλά σημαντικός ενδοετήσιος (+0.6) και πολύ-δεκαετής συσχετισμός ανάμεσα στις αυξήσεις της θερμοκρασίας στη ξηρά την άνοιξη στο Β.Ημισφαίριο και στην ελάττωση της χιονοκάλυψης την άνοιξη στο Β.Ημισφαίριο, από τότε που υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα (1966). Ο βαθμός χιονοκάλυψης έχει μειωθεί περίπου κατά 10% από το 1966.
- Μια 10-15% μείωση στην έκταση του Αρκτικού θαλάσσιου πάγου την άνοιξη και το καλοκαίρι από τη δεκαετία του '50 είναι σύμφωνη με μια αύξηση των εαρινών και, σε μικρότερο βαθμό, των καλοκαιρινών θερμοκρασιών στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Υπάρχει μικρή ένδειξη ότι η έκταση του Αρκτικού θαλάσσιου πάγου μειώνεται τον χειμώνα,

- Νέα δεδομένα από καταγραφές υποβρυχίων δείχνουν ότι έχει συμβεί μια 40% περίπου μείωση του πάχους του Αρκτικού θαλάσσιου πάγου το καλοκαίρι ή τις αρχές του φθινοπώρου, την περίοδο 1958-1976 και στα μέσα της δεκαετίας του '90. Το πάχος μειώνονταν κατά μέσο όρο περίπου 4 cm/έτος. Άλλοι ερευνητές παρατήρησαν μια πολύ πιο αργή μείωση στο πάχος του πάγου τον χειμώνα, περίπου 1 cm/έτος. Η επιρροή της σημαντικής ενδοετήσιας και ενδοδεκαετούς μεταβλητότητας σε αυτές τις μεταβολές δεν μπορεί να προσδιοριστεί λόγω περιορισμένων δειγμάτων.
- Σε αντίθεση, δεν υπάρχει μια εμφανής σχέση μεταξύ των δεκαετών μεταβολών στις Ανταρκτικές θερμοκρασίες και στην κάλυψη του θαλάσσιου πάγου από το 1973. Δορυφορικά δεδομένα δείχνουν ότι μετά από μια πιθανή αρχική μείωση στα μέσα της δεκαετίας '70, η κάλυψη του θαλάσσιου πάγου στην Ανταρκτική έχει μείνει σχεδόν σταθερή ή ακόμη έχει αυξηθεί από το 1978.

Μεταβολές της θερμοκρασίας πάνω από το επιφανειακό στρώμα αέρα

- Αναλύσεις των παγκόσμιων τάσεων θερμοκρασίας από το 1958 στην κατώτερη έως μέση τροπόσφαιρα, από δεδομένα 'μετεωρολογικών' μπαλονιών, δείχνει μια θέρμανση του $0.1^{\circ}\text{C}/\text{δεκαετία}$ περίπου. Αυτή είναι παρόμοια με τον μέσο ρυθμό θέρμανσης στην επιφάνεια. Από τις αρχές της δεκαετίας του '60, δεν έχουν παρατηρηθεί σημαντικές τάσεις για την παγκόσμια μέση θερμοκρασία στην ανώτερη τροπόσφαιρα.
- Οι δορυφόροι έχουν γίνει διαθέσιμοι από το 1979. Μεταξύ 1979 και 2000, η, βασισμένη σε δορυφόρους και μπαλόνια, τάση στη κατώτερη τροπόσφαιρα ήταν $+0.04 \pm 0.11^{\circ}\text{C}/\text{δεκαετία}$ και $0.03 \pm 0.10^{\circ}\text{C}/\text{δεκαετία}$, αντίστοιχα. Σε αντίθεση, οι τάσεις των επιφανειακών θερμοκρασιών, από το 1979 μέχρι το 2000, έγιναν πιο έντονες, δηλαδή $0.16 \pm 0.06^{\circ}\text{C}/\text{δεκαετία}$. Η τάση στη διαφορά των σειρών μεταξύ επιφάνειας και

κατώτερης τροπόσφαιρας, των $0.13 \pm 0.06^\circ \text{C}$, είναι στατιστικά σημαντική. Αυτή είναι σε αντίθεση με τις σχεδόν μηδενικές επιφανειακές τάσεις θερμοκρασίας, από το 1958 έως το 1978, όταν η παγκόσμια θερμοκρασία της κατώτερης τροπόσφαιρας θερμάνθηκε κατά 0.03°C /δεκαετία σε σχέση με την επιφάνεια.

- Είναι πολύ πιθανό ότι οι σημαντικές διαφορές στις τάσεις μεταξύ επιφάνειας και κατώτερης τροπόσφαιρας είναι πραγματικές. Οι διαφορές είναι ιδιαίτερα εμφανείς σε πολλές περιοχές στους τροπικούς και στους υποτροπικούς, όπου η επιφάνεια έχει θερμανθεί ταχύτερα από την από την κατώτερη τροπόσφαιρα. Σε άλλες περιοχές όπως η Β.Αμερική, η Ευρώπη και η Αυστραλία, οι τάσεις είναι πολύ όμοιες.
- Σε όλη την στρατόσφαιρα, έχουν παρατηρηθεί αρνητικές τάσεις θερμοκρασίας από το 1979. Αυτές κυμαίνονται από μια μείωση των 0.5° ή 0.6°C /δεκαετία στην κατώτερη στρατόσφαιρα έως 2.5°C /δεκαετία στην ανώτερη.

Μεταβολές της Θερμοκρασίας πριν την περίοδο χρήσης οργάνων

Η τελευταία χιλιετία

- Νέες αναλύσεις δείχνουν ότι το 'μέγεθος' της θέρμανσης στο Β.Ημισφαίριο τον 20^ο αιώνα είναι πιθανό να είναι οι μεγαλύτερες από κάθε άλλο αιώνα, τα τελευταία 1000 χρόνια.
- Η δεκαετία του '90 πιθανώς να είναι η θερμότερη δεκαετία της χιλιετίας στο Β.Ημισφαίριο και το 1998 το θερμότερο έτος. Λόγω περιορισμένων δεδομένων, λίγες πληροφορίες είναι γνωστές για τους ετήσιους μέσους

όρους πριν τα τελευταία 1000 έτη και για τις συνθήκες που επικρατούσαν στο μεγαλύτερο μέρος του Ν.Ημισφαιρίου πριν το 1861.

- Διάφορες αποδείξεις δεν υποστηρίζουν την ύπαρξη παγκοσμίων σύγχρονων περιόδων ψύξης ή θέρμανσης που σχετίζονται με την 'Μικρή Παγετώδη Περίοδο' και την 'Μεσαιωνική Θερμή Περίοδο'. Παρ' όλα αυτά, αναπαραστάσεις των θερμοκρασιών του Β.Ημισφαιρίου δείχνουν μια ψύξη από τον 15^ο έως τον 19^ο αιώνα. Επίσης, δείχνουν μια σχετικά θερμή περίοδο από τον 11^ο μέχρι τον 14^ο αιώνα, παρόλο που η τελευταία περίοδος είναι ακόμη ψυχρότερη από τα τέλη του 20^{ου} αιώνα.
- Αναλύσεις των θερμοκρασιών από γεωλογικά καρότα δείχνουν μια μη γραμμική αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από τη ξηρά. Η αύξηση είναι της τάξης των $1 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ τα τελευταία 500 έτη, με την μεγαλύτερη αύξηση να συμβαίνει στα τέλη του 19^{ου} αιώνα.

Μεταβολές τα τελευταία 500.000 έτη

- Είναι πολύ πιθανό ότι μεγάλες και απότομες δεκαετείς μεταβολές στη θερμοκρασία συνέβησαν κατά την διάρκεια της τελευταίας παγετώδους περιόδου και της 'απόψυξης' της (μεταξύ 100000 και 10000 ετών περίπου πριν), ιδιαίτερα στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη του Β.Ημισφαιρίου. Στην τελευταία 'απόψυξη', η θερμοκρασία θεωρείται ότι αυξήθηκε τοπικά κατά $5-10^{\circ}\text{C}$ μέσα σε λίγες δεκαετίες.
 - Τα δεδομένα από πυρήνες πάγου της Ανταρκτικής έχουν αποδείξει τις μεταβολές της θερμοκρασίας, του CO₂ και του μεθανίου τα τελευταία 420000 έτη.
 - Υπάρχει σαφέστατη απόδειξη για σημαντικές, απότομες, τοπικές μεταβολές της θερμοκρασίας τα τελευταία 10000 έτη. Όμως, η
- 15/2/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

απόδειξη αυτή δεν δείχνει ότι κάθε γεγονός από αυτά ήταν σε πλανητική κλίμακα.

Μεταβολές στη Βροχόπτωση και σχετικές Μεταβολές

Βροχόπτωση

- Καταγραφές οργάνων της βροχόπτωσης στην επιφάνεια της ξηράς συνεχίζουν να δείχνουν μια αύξηση των 0.5 έως 1%/δεκαετία στο μεγαλύτερο μέρος των μέσων και μεγάλων γεωγραφικών πλατών του Β.Ημισφαιρίου. Εξαίρεση αποτελούν κάποιες περιοχές της Ανατ. Ρωσίας. Αντιθέτως, πάνω από τις περισσότερες υποτροπικές περιοχές (ξηράς) η βροχόπτωση έχει μειωθεί τον 20^ο αιώνα (-0.3%/δεκαετία), αλλά η τάση αυτή έχει εξασθενήσει τις πρόσφατες δεκαετίες. Άλλοι δείκτες βροχόπτωσης προτείνουν ότι μεγάλα τμήματα των τροπικών ωκεανών δέχτηκαν περισσότερη βροχόπτωση τις πρόσφατες δεκαετίες, και ότι η βροχόπτωση έχει αυξηθεί σημαντικά πάνω από τη ξηρά τροπικών περιοχών τον 20^ο αιώνα (2.4%/δεκαετία). Η αύξηση της βροχόπτωσης πάνω από τους τροπικούς δεν αποτελεί απόδειξη για τις τελευταίες δεκαετίες.
- Στο Ν.Ημισφαίριο, ο τύπος βροχόπτωσης στα νησιά, για διάφορες περιοχές του Ν.Ειρηνικού ωκεανού, έχει μεταβληθεί από τα μέσα της δεκαετίας του '70. Επίσης, συνδέεται με την πιο συχνή εμφάνιση της θερμής φάσης της El Nino-Νότιας Κύμανσης (ENSO).
- Όταν τα δεδομένα είναι διαθέσιμα, οι μεταβολές στην ετήσια ροή των ρευμάτων αέρα συνήθως σχετίζονται με τις μεταβολές στην ολική βροχόπτωση.

Υδρατμοί

- Οι μεταβολές στην αναλογία μίξης των υδρατμών έχουν αναλυθεί για συγκεκριμένες περιοχές χρησιμοποιώντας in situ επιφανειακές παρατηρήσεις, καθώς και μετρήσεις της κατώτερης τροπόσφαιρας βασισμένες σε δορυφόρους και 'μετεωρολογικά' μπαλόνια (ραδιοβολίδες). Οι πιο αξιόλογες σειρές δεδομένων δείχνουν ότι είναι πιθανό οι ολικοί ατμοσφαιρικοί υδρατμοί να έχουν αυξηθεί κατά διάφορα ποσοστά ανά δεκαετία πάνω από πολλές περιοχές του Β.Ημισφαιρίου, από τις αρχές της δεκαετίας '70. Οι μεταβολές πάνω από το Ν.Ημισφαίριο δεν μπορούν να προσδιοριστούν.
- Δορυφορικές παρατηρήσεις της υγρασίας στην ανώτερη τροπόσφαιρα, από το 1980 έως το 1997, δείχνουν στατιστικά σημαντικές θετικές τάσεις του 0.1%/έτος για τη ζώνη: 10° Β και 10° Ν. Οι υπόλοιπες τάσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές, αλλά περιέχουν μια 0.04%/έτος θετική τάση για τη ζώνη 60° Β-60° Ν και μια αρνητική τάση του -0.1%/έτος πάνω από την περιοχή των 30° Β-30° Ν.
- Παρατηρήσεις της υγρασίας στη στρατόσφαιρα πάνω από τα 18 km, σύμφωνα με καταγραφές μπαλονιών, δείχνουν μια αύξηση του 1%/έτος περίπου για την περίοδο 1981-2000. Κάποιες δορυφορικές καταγραφές δείχνουν μια παρόμοια θετική τάση, προτείνοντας ότι η μεταβολή είναι παγκόσμια. Επίσης, δείχνουν μια επιβράδυνση στη θετική τάση μετά το 1996.

Νέφη

- Είναι πιθανό να έχει συμβεί μια αύξηση στην ολική νεφοκάλυψη, περίπου 2%, πάνω από ηπειρωτικές περιοχές μέσων και μεγάλων γεωγραφικών πλατών από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα.

Μεταβολές στην Ατμοσφαιρική/Ωκεάνια Κυκλοφορία

El Nino-Νότια Κύμανση (ENSO)

- Η συχνότητα και η ένταση της ENSO είναι ασυνήθιστη από τα μέσα της δεκαετίας του '70 και συγκρίνεται με τα προηγούμενα 100 έτη. Τα θερμής φάσης ENSO επεισόδια έχουν γίνει πιο συχνά, μόνιμα, ή έντονα από την αντίθετη ψυχρή φάση την περίοδο αυτή.
- Η πρόσφατη συμπεριφορά της ENSO σχετίζεται με μεταβολές στη βροχόπτωση και στη θερμοκρασία, πάνω από τις περισσότερες τροπικές και υποτροπικές περιοχές (παγκοσμίως) και σε μερικές περιοχές των μέσων γεωγραφικών πλατών. Το τελικό αποτέλεσμα είναι πιθανώς μια μικρή συμβολή στην αύξηση της παγκόσμιας επιφανειακής θερμοκρασίας τις τελευταίες δεκαετίες.

Ατμοσφαιρικές κυμάνσεις

- Η Ενδοδεκαετής Ειρηνική Κύμανση είναι πιθανό να είναι μια εκδήλωση της Δεκαετούς Κύμανσης του Ειρηνικού ωκεανού. Και οι δύο σχετίζονται με τη δεκαετή κλιματική μεταβλητότητα πάνω από τη λεκάνη του Ειρηνικού. Πιθανώς τα φαινόμενα αυτά να διαμορφώνουν την κλιματική μεταβλητότητα της ENSO.
- Η χειμερινή Κύμανση του Β.Ατλαντικού ωκεανού (NAO) και η Αρκτική Κύμανση (AO), που φαίνεται να είναι κατά μεγάλο μέρος το ίδιο φαινόμενο, έδειξαν δεκαετή έως πολύ-δεκαετή μεταβλητότητα. Από τη δεκαετία του '70 αυτές οι Κυμάνσεις είναι στη φάση που δίνουν ισχυρούς δυτικούς ανέμους πάνω από το μεγαλύτερο μέρος της εξωτροπικής Ευρασίας, το χειμερινό μισό του έτους. Αυτό συνδέεται με τη θέρμανση της ψυχρής περιόδου στην περιοχή αυτή, αλλά με ψύξη σε μερικές περιοχές πιο νότια.

- Η Ανταρκτική Κύμανση (AAO) στο Ν.Ημισφαίριο ήταν σε μια αυξητική θετική φάση τα τελευταία 15 έτη, με ισχυρότερους δυτικούς ανέμους πάνω από τον Νότιο ωκεανό.
- Απότομες μεταβολές της κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας και των ωκεανών μπορεί να συνέβησαν κατά τη διάρκεια των μεσοπαγετωδών περιόδων. Οι μεταβολές επηρέασαν το τοπικό κλίμα, χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση.

Μεταβολές των Ακραίων Καιρικών Φαινομένων και Κλιματικά Γεγονότα

Βροχόπτωση

- Νέες αναλύσεις δείχνουν ότι σε περιοχές όπου η βροχόπτωση έχει αυξηθεί, είναι πολύ πιθανό να υπάρχουν ακόμη πιο σαφείς αυξήσεις σε ισχυρά και ακραία γεγονότα βροχόπτωσης. Το αντίστροφο είναι επίσης αληθές.
- Σε μερικές περιοχές, τα ισχυρά και ακραία γεγονότα βροχόπτωσης έχουν αυξηθεί παρά το γεγονός ότι η ολική βροχόπτωση έχει μειωθεί ή έχει παραμείνει σταθερή. Αυτό αποδίδεται στη μείωση της συχνότητας των γεγονότων βροχόπτωσης. Οι μεταβολές στη συχνότητα της ισχυρής βροχόπτωσης μπορούν να προκύψουν από διάφορες αιτίες, π.χ. μεταβολές στην ατμοσφαιρική υγρασία ή κυκλοφορία.
- Κατά το β' μισό του 20^{ου} αιώνα, είναι πιθανό να έγινε μια 2-4% αύξηση στη συχνότητα της ισχυρής βροχόπτωσης, όπως αναφέρεται από σταθμούς παρατήρησης στα μέσα και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη του Β.Ημισφαιρίου.

- Οι τάσεις της έντονης ξηρασίας και οι στατιστικές για τις υγρές περιοχές από το 1900 έως το 1995 είναι σχετικά μικρές πάνω από τη ξηρά σε παγκόσμιο επίπεδο. Παρ' όλα αυτά, τις τελευταίες δύο ή τρεις δεκαετίες έχουν αυξηθεί παγκοσμίως οι έντονα ξηρές και υγρές περιοχές.

Θερμοκρασία

- Σε πολλές περιοχές το ημερήσιο θερμομετρικό εύρος έχει μειωθεί. Οι αυξήσεις στις ημερήσιες ελάχιστες θερμοκρασίες περατούν την περίοδο ελεύθερης παγετού στις πιο πολλές περιοχές των μέσων και μεγάλων γεωγραφικών περιοχών.
- Μια σημαντική μείωση στη συχνότητα των ακραίων χαμηλών μηνιαίων και εποχιακών μέσων θερμοκρασιών έχει συμβεί κατά μήκος του μεγαλύτερου μέρους του πλανήτη, από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Παρ' όλα αυτά, έχει παρατηρηθεί μια σχετικά μικρότερη αύξηση στη συχνότητα των ακραίων υψηλών μηνιαίων και εποχιακών μέσων θερμοκρασιών.

Κатаιγίδες

- Οι μεταβολές στην ένταση και τη συχνότητα των τροπικών και εξωτροπικών καταιγίδων επηρεάζονται από ενδοδεκαετείς και πολύ-δεκαετείς μεταβολές τον 20^ο αιώνα.
- Μη συστηματικές μεταβολές στη συχνότητα των ανεμοστροβίλων, των θυελλωδών ημερών, ή των γεγονότων με χαλάζι είναι προφανείς σε περιορισμένες περιοχές που έχουν αναλυθεί.

1.

Πόσο μεγάλη είναι η Παγκόσμια Θέρμανση;

Γενικά

Σύμφωνα με τη SAR (IPCC WGI(Working Group I)- Second Assessment Report) σε παγκόσμια κλίμακα, η επιφανειακή θερμοκρασία του αέρα και της επιφάνειας της θάλασσας αυξήθηκαν από 0.3° C έως 0.6° C τη τελευταία δεκαετία του 19^{ου} αιώνα και το 1994.

Η θερμοκρασία για τη ξηρά και την θάλασσα

Αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι σειρές δεδομένων έχουν προσαρμοστεί να έχουν μηδενική ανωμαλία όταν αναλογούν στην περίοδο 1961 έως 1990.

➤ Θερμοκρασία αέρα στην επιφάνεια της ξηράς

Οι επιδράσεις της αστικοποίησης τον 20^ο αιώνα, παγκόσμια και για κάθε ημισφαίριο χωριστά, επηρέασαν την θερμοκρασία του αέρα στην επιφάνεια της ξηράς. Αυτή δεν υπερβαίνει τους 0.05° C τη περίοδο 1900 έως 1990.

Το Σχ. 1a δείχνει τους CRU (Climatic Research Unit) ετήσιους μέσους όρους με μία ομαλή, περίπου, δεκαετή καμπύλη ώστε να τονιστούν οι δεκαετείς ή μεγαλύτερες μεταβολές. Αυτό συγκρίνεται με τις ομαλές καμπύλες των άλλων τριών αναλύσεων στο Σχ. 1b. Επίσης έχει προστεθεί η εκτίμηση της αβεβαιότητας εξαιτίας της, λόγω αστικοποίησης, αύξησης από το μηδέν το 1900 σε 0.12° C το 2000. Σημειωτέον ότι η θέρμανση υπερβαίνει σημαντικά τις υπολογισμένες αβεβαιότητες.

Παγκοσμίως, πάνω από τη ξηρά έχει συμβεί μία περαιτέρω θέρμανση του επιφανειακού αέρα. Οι NCDC (National Climatic Data Center) σειρές δεδομένων δηλώνουν σαφώς μεγαλύτερη θέρμανση από τις σειρές CRU, από τα μέσα του 1980. Οι παλαιότερες σειρές είναι ένας απλός μέσος όρος από δεδομένα περιοχών ξηράς, τοπικά, υπολογισμένες ανάλογα με το μέγεθός τους, ενώ αντιθέτως οι σειρές CRU είναι ένας απλός μέσος όρος από δεδομένα των δύο ημισφαιρίων ο οποίος δίνει περισσότερο βάρος στη σχετικά μικρή περιοχή ξηράς στο Ν.ημισφαίριο. Επειδή η ξηρά του

Β.ημισφαιρίου έχει θερμανθεί πολύ πιο γρήγορα από τη ξηρά του Ν.ημισφαιρίου από από τα μέσα του 1980 (Πιν. Α), ο απλός μέσος όρος καταλήγει σε λιγότερη θέρμανση.

Πίνακας Α: Περιορισμένες μέγιστες γραμμικές τάσεις των ετήσιων μέσων ανωμαλιών για την θερμοκρασία του αέρα στην επιφάνεια της ξηράς (LSAT) από το CRU και ανωμαλίες των θερμοκρασιών στην επιφάνεια της θάλασσας (SST) και της νυχτερινής θερμοκρασίας του αέρα στη θάλασσα (NMAT) από το UKMO (UK Met Office). Διπλές αποκλίσεις των τόσεων φαίνονται στα πλαίσια. Οι τάσεις δίνονται σε °C/δεκαετία.

	1861 to 2000	1901 to 2000	1910 to 1945	1946 to 1975	1976 to 2000
Northern Hemisphere CRU LSAT (Jones <i>et al.</i> , 2001)	0.06 (0.02) 1%	0.07 (0.03) 1%	0.14 (0.05) 1%	-0.04 (0.06)	0.31 (0.11) 1%
Southern Hemisphere CRU LSAT (Jones <i>et al.</i> , 2001)	0.03 (0.01) 1%	0.05 (0.01) 1%	0.08 (0.04) 1%	0.02 (0.05)	0.13 (0.08) 1%
Global CRU LSAT (Jones <i>et al.</i> , 2001)	0.05 (0.02) 1%	0.06 (0.02) 1%	0.11 (0.03) 1%	-0.01 (0.05)	0.22 (0.08) 1%
Northern Hemisphere UKMO SST (Jones <i>et al.</i> , 2001)	0.03 (0.01) 1%	0.05 (0.02) 1%	0.15 (0.04) 1%	-0.05 (0.10)	0.18 (0.05) 1%
Southern Hemisphere UKMO SST (Jones <i>et al.</i> , 2001)	0.04 (0.01) 1%	0.06 (0.01) 1%	0.13 (0.05) 1%	0.06 (0.07)	0.10 (0.05) 1%
Global UKMO SST (Jones <i>et al.</i> , 2001)	0.04 (0.01) 1%	0.06 (0.01) 1%	0.15 (0.04) 1%	0.01 (0.06)	0.14 (0.04) 1%
Global UKMO NMAT (Parker <i>et al.</i> , 1995)		0.05 (0.02) 1%	0.14 (0.04) 1%	-0.01 (0.06)	0.11 (0.05) 1%

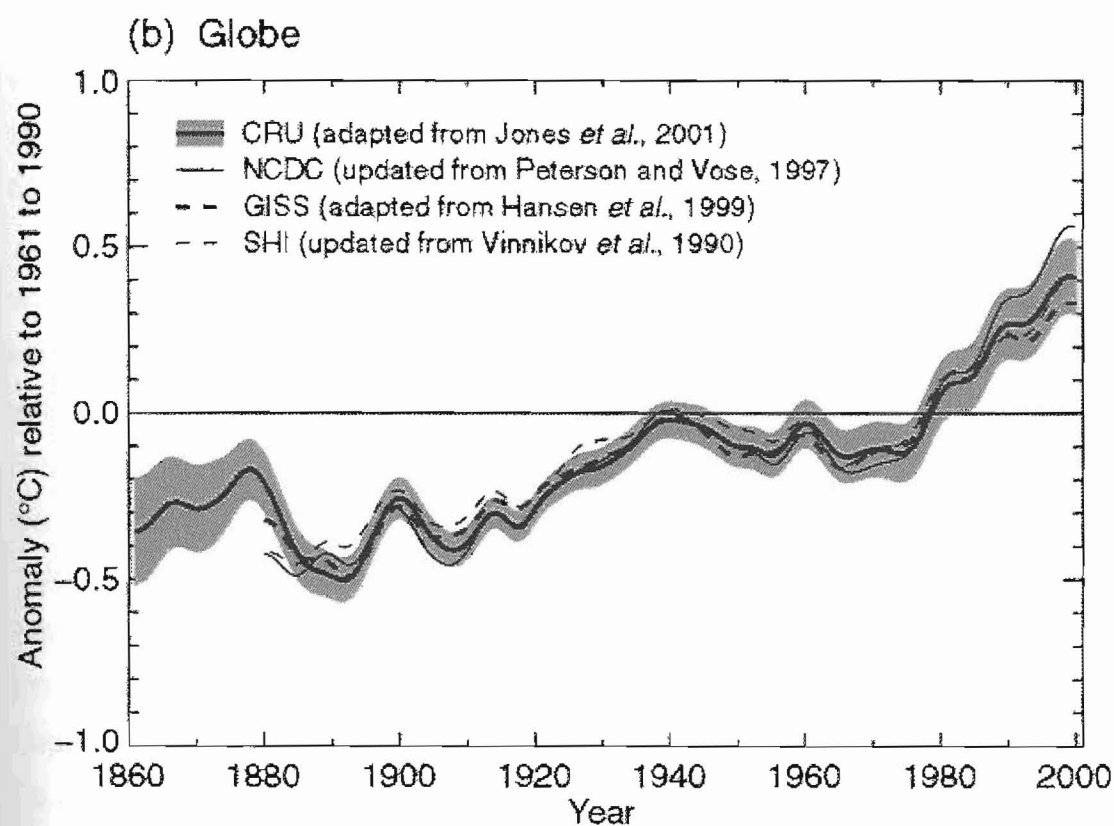
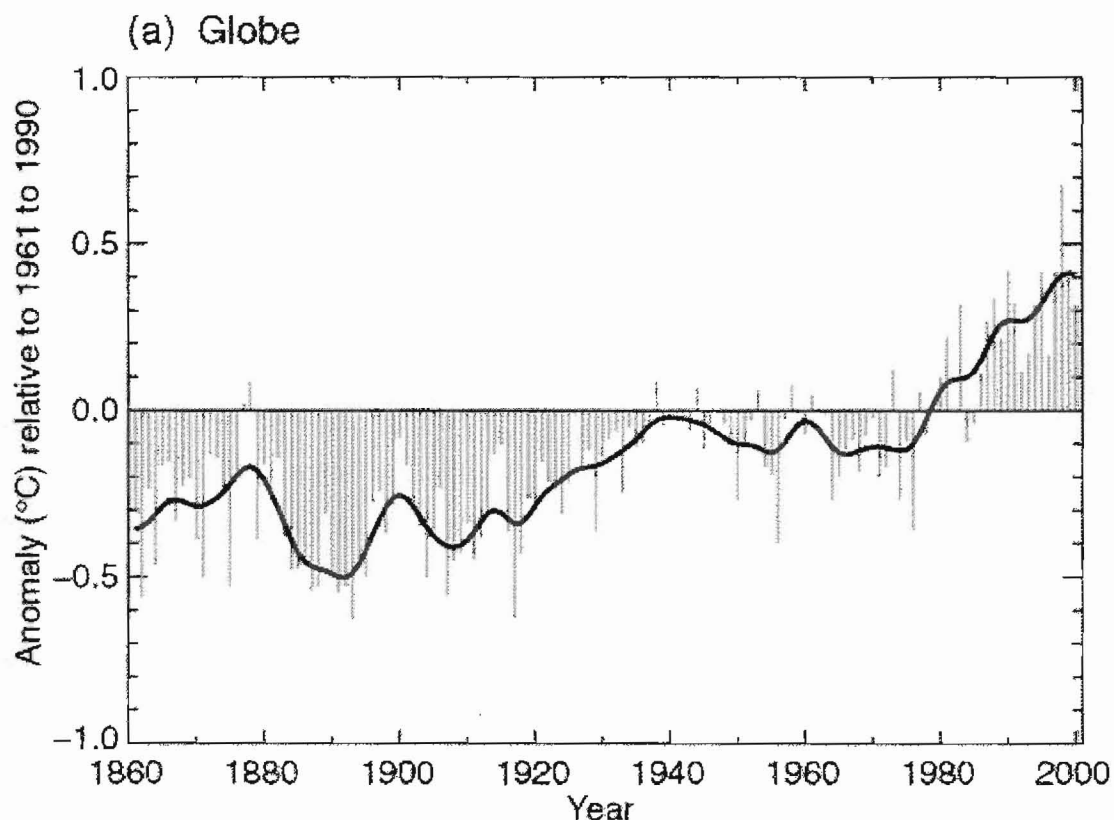
Οι GISS (Goddard Institute for Space Studies) σειρές έχουν αναθεωρηθεί προσφάτως και δείχνουν μια λίγο μικρότερη θέρμανση από τις σειρές CRU, από τα τέλη του 1980.

Ένας λόγος για αυτή τη συμπεριφορά συνδέεται με το τρόπο δημιουργίας των σειρών αυτών. Μεταξύ άλλων διαφορών, οι σειρές αυτές δίνουν πολύ περισσότερο βάρος στα νησιά των ωκεανών και την Ανταρκτική. Επειδή οι ωκεανοί και η Ανταρκτική έχουν θερμανθεί λιγότερο σε σχέση με την υπόλοιπη ξηρά, παγκοσμίως, τα τελευταία 15 χρόνια, οι σειρές GISS αναμένεται να δείχνουν μικρότερη θέρμανση.

Ένα νέο αρχείο έγινε και για τις τέσσερις σειρές το 1998. Γενικά, το 1998 επηρεάστηκε από το ισχυρό El Nino γεγονός του 1997/98. Παρ'όλα αυτά, το 1998 ήταν πολύ πιο θερμό έτος από το 1983, ένα έτος που θερμάνθηκε από το El Nino του 1982/83. Στην πραγματικότητα, το 1998 ήταν από 0.34°C έως 0.54°C θερμότερο από το 1983 πάνω από τη ξηρά, βασισμένο στις σειρές θερμοκρασίας που χρησιμοποιήθηκαν. Το 1999 ήταν παγκοσμίως πιο ψυχρό έτος από το 1998, με μία ανωμαλία των 0.40°C στη σειρά CRU, καθώς είχε ψυχθεί από το πολύ ισχυρό La Nina του 1988/89. Είναι αξιοσημείωτο, παρ'όλα αυτά, ότι βόρεια των 20°N , το 1999 ήταν σχεδόν το ίδιο θερμό με το 1998.

Με βάση τα CRU δεδομένα, στον Πιν. Α φαίνονται οι ισότιμες γραμμικές τάσεις, παγκοσμίως, της επιφανειακής θερμοκρασίας του αέρα στο Νότιο και Β.Ημισφαίριο. Οι τάσεις φαίνονται ως $^{\circ}\text{C}/\text{δεκαετία}$. Οι δύο κύριες περίοδοι θέρμανσης και στις τρεις σειρές είναι περίπου μεταξύ του 1910 έως το 1945 και του 1976 έως το 2000.

Ο Πιν. Α και το Σχ. 1 δείχνουν ότι ο ρυθμός της παγκόσμιας και ανά ημισφαιρίου θέρμανσης του επιφανειακού αέρα πάνω από τη ξηρά, από το 1976 έως το 2000, ήταν δύο φορές πιο ταχύς (αλλά ετησίως πιο ποικίλος) για την περίοδο 1910-1945.



Σχήμα 1: (α) Ετήσιες ανωμαλίες της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας του αέρα στην επιφάνεια της ξηράς ($^{\circ}\text{C}$), το 1861 ως το 2000, σε σχέση με τις τιμές της περιόδου 1961-1990. Οι στήλες και η καμπύλη είναι από το CRU. Οι τιμές είναι ο μέσος όρος των ανωμαλιών στα δύο ημισφαίρια. (β) Η λεπτή καμπύλη είναι από το NCDC, η παχιά διακεκομμένη από το GISS και η λεπτή διακεκομμένη από το SHI. Φαίνονται οι δύο αποκλίσεις στην CRU καμπύλη λόγω αστικοποίησης.

Οι γραμμικές αλλαγές στο παγκόσμιο μέσο όρο της CRU επιφανειακής θερμοκρασίας του αέρα μεταξύ 1861-2000 και 1901-2000 λαμβάνουν υπόψη τα ετήσια δειγματικά λάθη και τις αβεβαιότητες λόγω αστικοποίησης και είναι $0.63 \pm 0.24^\circ \text{C}$ και $0.61 \pm 0.18^\circ \text{C}$ αντιστοίχως. Αντίστοιχες αλλαγές για το Βόρειο και το Ν.Ημισφαίριο την περίοδο 1901-2000 είναι $0.71 \pm 0.31^\circ \text{C}$ και $0.52 \pm 0.13^\circ \text{C}$ αντιστοίχως.

Μέγιστη και Ελάχιστη Θερμοκρασία

Η αύξηση της θερμοκρασίας τις τελευταίες δεκαετίες έχει ως αποτέλεσμα μία ταχεία άνοδο της ημερήσιας ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας (DTR-Daily Temperature Range) σε πολλές ηπειρωτικές περιοχές. Αυτό μειώνει το ημερήσιο θερμομετρικό εύρος (ΗΘΕ) σε πολλές περιοχές του κόσμου.

Η παγκόσμια τάση για τη μέγιστη θερμοκρασία κατά τη περίοδο 1950-1993 είναι περίπου 0.1°C /δεκαετία και η τάση για την ελάχιστη θερμοκρασία είναι περίπου 0.2°C /δεκαετία. Συνεπώς, η τάση του DTR είναι περίπου -0.1°C /δεκαετία. Ο ρυθμός της αύξησης της θερμοκρασίας και για την ελάχιστη και για τη μέγιστη, την περίοδο αυτή, είναι μεγαλύτερος της μέσης θερμοκρασίας του 20^{ου} αιώνα, αντιπροσωπεύοντας την πιο έντονη θέρμανση τις τελευταίες δεκαετίες.

Αφού το ΗΘΕ είναι η μέγιστη θερμοκρασία μείον της ελάχιστης, τότε μπορεί να ελαττώνεται όταν η τάση της μέγιστης ή της ελάχιστης θερμοκρασίας είναι καθοδική, ανοδική ή αμετάβλητη. Το γεγονός αυτό, συμβάλλει σε λιγότερο χωρική συνοχή στον χάρτη του ΗΘΕ απ' ότι σε χάρτες τάσεως της μέσης θερμοκρασίας. Οι μέγιστες θερμοκρασίες έχουν αυξηθεί πάνω από τις περισσότερες περιοχές με εξαίρεση τον ανατολικό Καναδά, τις νότιες ΗΠΑ, τμήματα της ανατολικής και νότιας Ευρώπης, τη νότια Κίνα και μέρη της νότιας Αμερικής. Οι ελάχιστες θερμοκρασίες, παρ' όλα αυτά, αυξάνονται σχεδόν παντού εκτός από τον ανατολικό Καναδά και μικρές περιοχές της ανατολικής Ευρώπης και της Μέσης Ανατολής.

Το ΗΘΕ είναι, συγκεκριμένα, επιρρεπής σε αστικές επιδράσεις. Αποτελέσματα ερευνών δείχνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές στο ΗΘΕ μεταξύ σταθμών που βρίσκονται σε αγροτικές περιοχές και αυτών που βρίσκονται σε αστικές περιοχές. Γενικά, το ΗΘΕ που μετρήθηκε σε αγροτικό περιβάλλον είναι μεγαλύτερο από το ΗΘΕ που μετρήθηκε σε αστικό περιβάλλον.

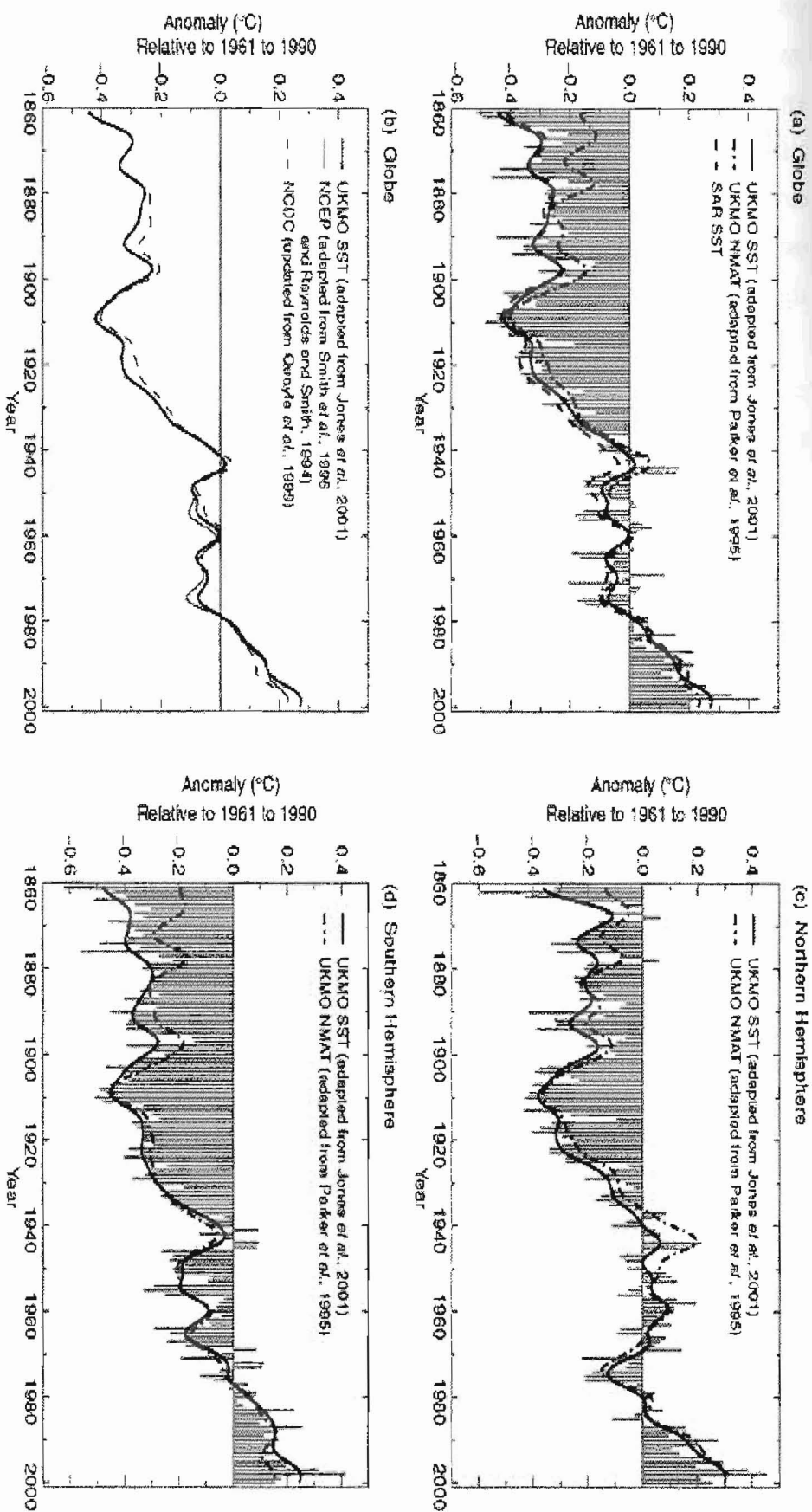
Οι ελάχιστες θερμοκρασίες και για τα δύο ημισφαίρια αυξήθηκαν απότομα στα τέλη του 1970. Ταυτόχρονα, ο χαρακτήρας της El Nino- Νότιας Κύμανσης (ENSO) μεταβλήθηκε αισθητά, δίνοντας διαρκώς θερμότερες θαλάσσιες θερμοκρασίες στον τροπικό κεντρικό και ανατολικό Ειρηνικό ωκεανό. Εποχιακά, οι εντονότερες μεταβολές στο ΗΘΕ συνέβησαν τον χειμώνα (-0.13°C /δεκαετία για 'αγροτικούς' σταθμούς) ενώ οι πιο μικρές μεταβολές κατά το καλοκαίρι (-0.065°C /δεκαετία), φανερώνοντας μία εποχικότητα στις μεταβολές.

➤ Θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας και θερμοκρασία αέρα στον ωκεανό

Οι αναλύσεις των SST, που έχουν περιγραφεί εδώ, εκτιμούν τη θερμοκρασία της υποεπιφάνειας (η θερμοκρασία στα πρώτα 5m του ωκεανού) στον ωκεανό, κι όχι την επιφανειακή.

Το Σχ.2α δείχνει τις ετήσιες τιμές των παγκόσμιων θερμοκρασιών στην επιφάνεια της θάλασσας (SST) χρησιμοποιώντας μία προσφάτως βελτιωμένη UKMO (UK Meteorological Office) ανάλυση, με δεκαετείς ομαλές τιμές των SST. Οι νυχτερινές θαλάσσιες θερμοκρασίες του αέρα (NMAT) φαίνονται επίσης. Αυτές, γενικά, συμφωνούν αρκετά μετά το 1900, αλλά οι NMAT είναι θερμότερες πριν από τη περίοδο αυτή, με μια αργή ψύξη να αρχίζει το 1860. Η ψύξη δεν φαίνεται στις SST, παρόλο που η ελάχιστη θερμοκρασία το 1900 περίπου, φαίνεται και στις δυο σειρές. Η ανάλυση των SST φαίνεται επίσης. Οι μεταβολές των SST είναι γενικά μικρές, παρόλο που το μέγιστο της θέρμανσης στις αρχές της δεκαετίας '40 είναι περισσότερο προφανές στις πιο πρόσφατες αναλύσεις, και υποστηρίζονται από την NMAT ανάλυση. Σε αυτό το σημείο, η συμβολή σε μια δεκαετή, κατά μέσο όρο, παγκόσμια θέρμανση φαίνεται να έχει ενταθεί από τα El Nino γεγονότα των περιόδων 1939-1941 και 1942-1944.

Οι NMAT επιβεβαιώνουν τις τάσεις των SST τον 20^ο αιώνα μέχρι το 1991 (βλ. Πιν. Α). Μετά το 1991, οι NMAT αυξήθηκαν με βραδύτερο ρυθμό από ότι οι SST, εν μέρει στο Ν.Ημισφαίριο, αξιοσημείωτα στον Ινδικό και στον τροπικό Ν.Ειρηνικό ωκεανό. Γενικά, παρόλο που τα SST δεδομένα θα έπρεπε να θεωρηθούν πιο αξιόπιστα οι σχετικές μεταβολές των NMAT μέχρι το 1991 ίσως είναι εν μέρει πραγματικά.



Σχήμα 2: (a) Ετήσιες αναμειγμένες SST (στηλές και συνεχής καμπύλη) και παγκόσμια νυχτερινή μέση θερμοκρασία του αέρα (NMAT, καμπύλη με κουκκίδες), την περίοδο 1861-2000, σε σχέση με την περίοδο 1961-1990 ($^{\circ}\text{C}$) από UKMO αναλύσεις. Επίσης φθάνονται οι αντίστοιχες SST αναμειγμένες από τη SAR (διακεκομμένη καμπύλη). (b) Ετήσιες παγκόσμιες SST ($^{\circ}\text{C}$), την περίοδο 1861-2000, σε σχέση με την περίοδο 1961-1990 από το NCDC των ΗΠΑ (κεπή διακεκομμένη γραμμή), από το NCEP των ΗΠΑ (κεπή συνεχής γραμμή και από το UKMO (παχιά γραμμή). (c) Χρονοσειρές των UKMO SST και NMAT αναμειγμένων για το Β. Ημισφαίριο (d) Ομοίως για το Ν. Ημισφαίριο και τα δύο για την περίοδο 1861-2000

Οι παρόμοιες τάσεις ανάμεσα στη SST και τη θερμοκρασία του αέρα στα νησιά, για περιοχές του τροπικού και εξωτροπικού Ν.Ειρηνικού ωκεανού, υποστηρίζουν τη μεγάλη αξιοπιστία των SST δεδομένων.

Το Σχ. 2β δείχνει τις τρεις χρονοσειρές των μεταβολών στην παγκόσμια SST. Οι UKMO σειρές (όπως και στο Σχ. 2γ) δεν περιλαμβάνουν πολικά, τροχιακά δορυφορικά δεδομένα. Τα NCEP (National Centers for Environmental Prediction) δεδομένα αρχίζοντας το 1950, δεν περιλαμβάνουν δορυφορικά μετά το 1981. Οι NCDC σειρές ξεκινούν από το 1880 και περιλαμβάνουν δορυφορικά δεδομένα για να παρέχουν σχεδόν πλήρη παγκόσμια κάλυψη.

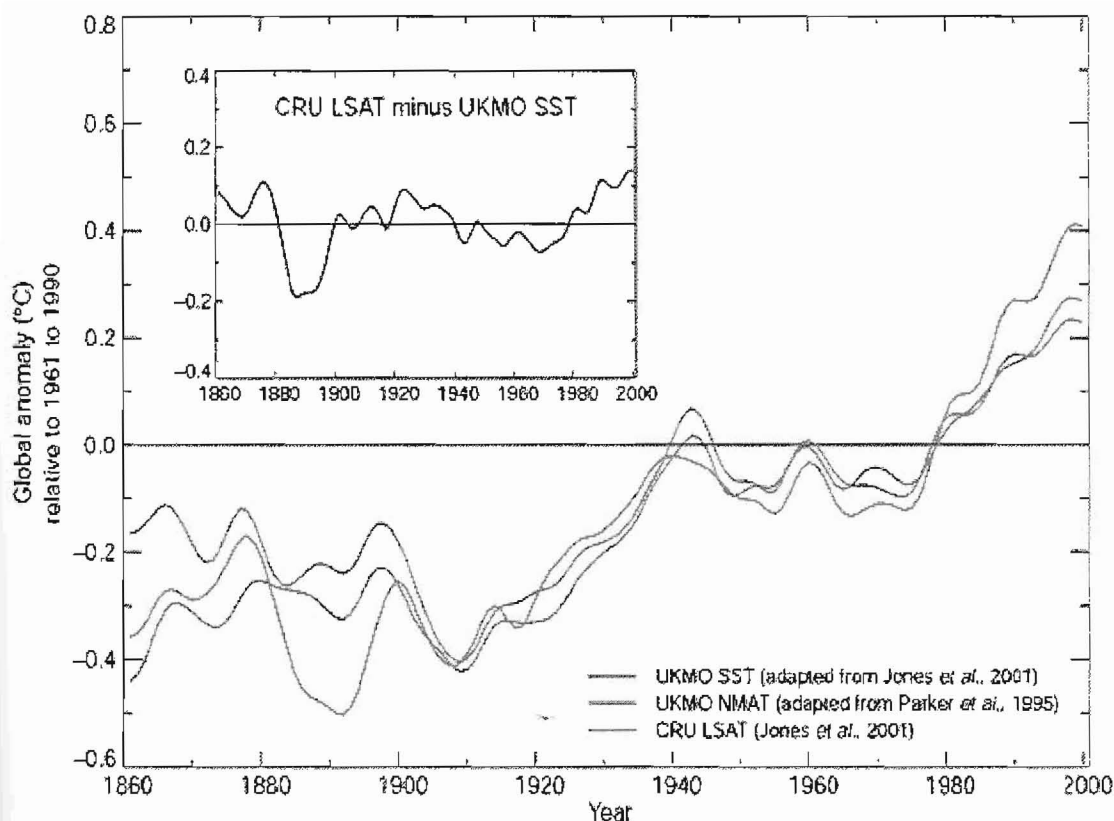
Παγκοσμίως, το θερμότερο έτος σε κάθε SST καταγραφή ήταν το 1998 (UKMO, 0.43°C , NCDC, 0.39°C και NCEP, 0.34°C από το 1961 ως το 1990 κατά μέσο όρο). Τα πέντε θερμότερα έτη σε κάθε μία από τις UKMO, NCDC και NCEP αναλύσεις των SST έχουν συμβεί μετά το 1986, ενώ τέσσερα από αυτά τη δεκαετία '90 στην UKMO ανάλυση.

Κυρίως, η έντονη θέρμανση έχει συμβεί στον εξωτροπικό Β.Ατλαντικό ωκεανό από τα μέσα του 1980. Αυτή η θέρμανση σχετίζεται εν μέρει με τη θερμή φάση της πολυ-δεκαετούς διακύμανσης. Η ψύξη στον βορειοδυτικό Β.Ατλαντικό, νότια της Γροιλανδίας, που αναφέρεται στη SAR, έχει σταματήσει.

➤ Ξηρά και θάλασσα

Το Σχ.3 συνοψίζει τις σχετικές μεταβολές των θερμοκρασιών του επιφανειακού ηπειρωτικού αέρα στις UKMO, SST, UKMO, NMAT και CRU σειρές.

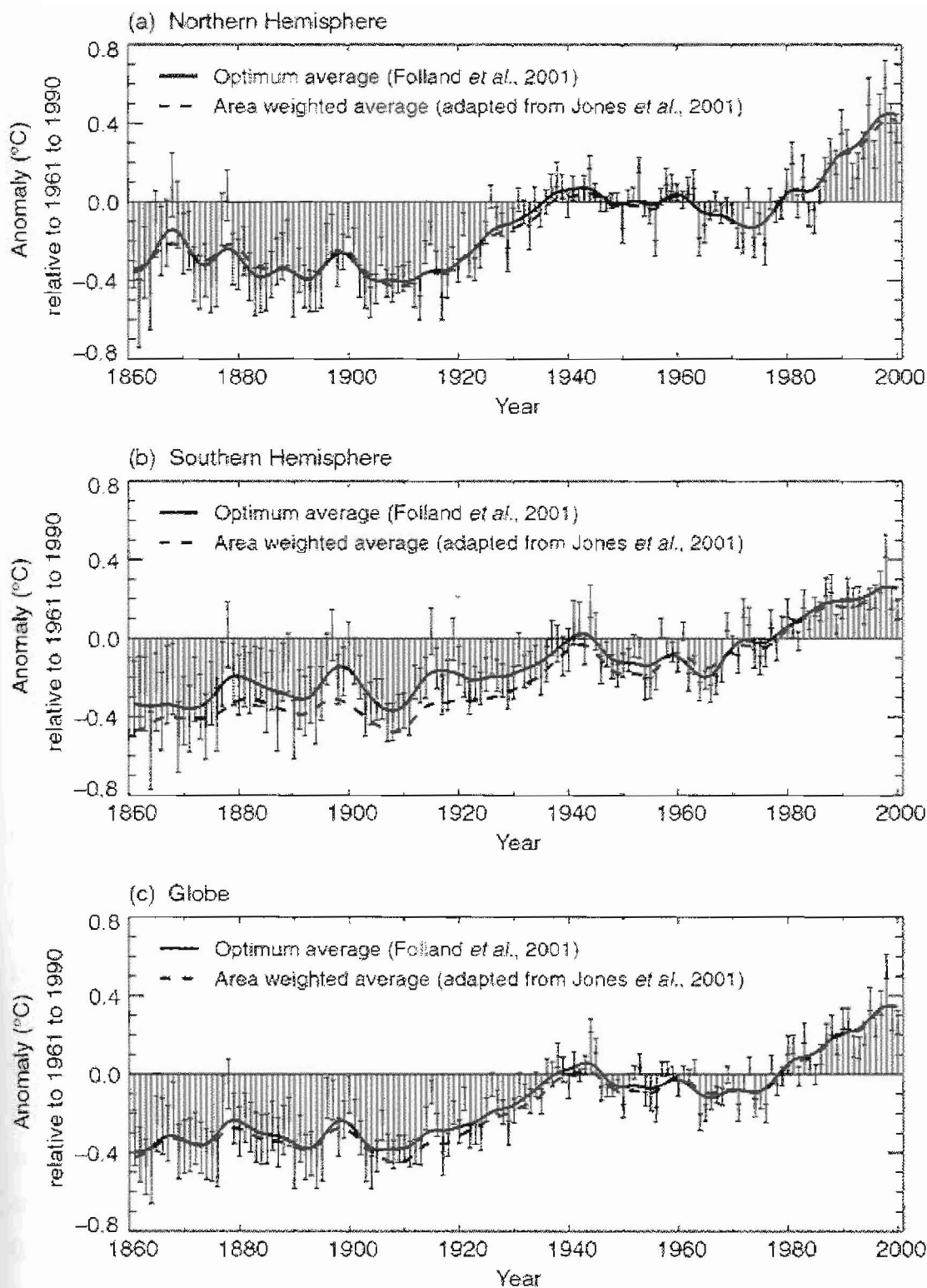
Η σχετική ψύξη της ξηράς, το 1885 και το 1895 περίπου, προέρχεται από την ηπειρωτική ενδοχώρα του Β.ημισφαιρίου, κυρίως το χειμώνα, καθώς η θερμοκρασία του αέρα παράκτιας περιοχής και οι 'γειτονικές' SST ανωμαλίες συμφωνούν αρκετά σ' αυτό το σημείο. Τα CRU δεδομένα ξηράς είναι γενικά περίπου 0.1 έως 0.2°C ψυχρότερα στο Β.ημισφαίριο, εκτός από την αρχή της καταγραφής (αρχές 1980) και πιο ψυχρά από τη περίοδο 1885 έως 1890. Το αντίθετο συμβαίνει στο Ν.ημισφαίριο, πριν το 1885, όταν η SST είναι γενικά 0.1 έως 0.2°C ψυχρότερη και 0.3°C ψυχρότερη γύρω στο 1875.



Σχήμα 3: Ετήσιες ανωμαλίες των παγκόσμιων μέσων SST ($^{\circ}\text{C}$) το 1861 έως το 2000, σε σχέση με το 1961 έως το 1990 (μπλέ καμπύλη), των νυχτερινών ωκεάνιων θερμοκρασιών του αέρα (πράσινη καμπύλη) και των θερμοκρασιών του αέρα στη επιφάνεια της ξηράς (κόκκινη καμπύλη). Επίσης, στο εσωτερικό πλαίσιο φαίνονται οι διαφορές μεταξύ των ανωμαλιών των SST και της θερμοκρασίας του αέρα στην επιφάνεια της ξηράς.

Η θερμοκρασία στα ηπειρωτικά του Ν.ημισφαιρίου μπορεί πραγματικά να αντιπροσωπεύει μία πολύ μικρή περιοχή παρατήρησης του ημισφαιρίου, ενώ τα SST δεδομένα, παρ'ότι αραιά, είναι γενικώς σημαντικά πιο διαδεδομένα. Η απότομη ψύξη της SST το 1903/4, στο Σχ. 2 και στο Σχ. 3, παρατηρείται στη ξηρά. Επίσης, φαίνονται οι δύο σειρές δεδομένων την επιφάνειας του ωκεανού, για τον Β.Ατλαντικό και τον Ινδικό ωκεανό, λίγο μετά το γεγονός.

Τα Σχ. 4α-ε δείχνουν τις ετήσιες χρονοσειρές των ανωμαλιών της θερμοκρασίας του επιφανειακού αέρα ξηράς και των SSTs, για τα δυο ημισφαίρια και παγκοσμίως, από το 1861. Οι σειρές βασίζονται στα τελευταία CRU δεδομένα θερμοκρασίας του αέρα στη ξηρά και στα UKMO SST δεδομένα.



Σχήμα 4: Ετήσιες ανωμαλίες των SST και των θερμοκρασιών του αέρα στην επιφάνεια της ξηράς την περίοδο 1861-2000, σε σχέση με την περίοδο 1961-1990, για (a) το Β.Ημισφαίριο, (b) το Ν.Ημισφαίριο και (c) παγκοσμίως.

Το εύρος των αποκλίσεων τους συμβολίζεται ως 'I'.

Η γενική επιρροή της παγκόσμιας θερμοκρασίας, παρ'όλα αυτά, είναι μικρή (Σχ. 4c).

Πίνακας Β: Οι ετήσιες μέσες CRU ανωμαλίες της θερμοκρασίας του αέρα στην επιφάνεια της ξηράς (LSAT) σε συνδυασμό με τις UKMO ανωμαλίες της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της θάλασσας (SST).

	1861 to 2000	1901 to 2000	1910 to 1945	1946 to 1975	1976 to 2000
Northern Hemisphere CRU LSAT + UKMO SST (Folland <i>et al.</i> , 2001)	0.05 (0.02) 1%	0.06 (0.02) 1%	0.17 (0.03) 1%	-0.05 (0.05)	0.24 (0.07) 1%
Southern Hemisphere CRU LSAT + UKMO SST (Folland <i>et al.</i> , 2001)	0.04 (0.01) 1%	0.05 (0.02) 1%	0.09 (0.05) 1%	0.03 (0.07)	0.11 (0.05) 1%
Global CRU LSAT + UKMO SST (Folland <i>et al.</i> , 2001)	0.04 (0.01) 1%	0.06 (0.02) 1%	0.14 (0.04) 1%	-0.01 (0.04)	0.17 (0.05) 1%

Ο Πιν. Β δείχνει τις γραμμικές τάσεις των βέλτιστων ετήσιων μέσων όρων, και εις διπλούν τις τυπικές αποκλίσεις τους, για τον πλανήτη και τα δυο ημισφαίρια χωριστά, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο περιορισμένης μέγιστης πιθανότητας, όπως στον Πιν. Α. Οι τάσεις αφήνουν περιθώριο για ετήσιες αβεβαιότητες εξαιτίας των 'κενών' στα δεδομένα, της αστικοποίησης στη ξηρά και των διορθώσεων στην SST. Από το 1861, τα ημισφαίρια έχουν θερμανθεί κατά το ίδιο ποσοστό περίπου. Παρ' όλα αυτά, και η πρώιμη περίοδος θέρμανσης (1910 έως 1945) και η πιο πρόσφατη (1976 έως 1999) φανερώνουν ρυθμούς θέρμανσης περίπου δυο φορές πιο έντονους στο Β.ημισφαίριο. Ακόμη, το 1946 μέχρι το 1975, υπήρχε συνεχής θέρμανση (όχι σημαντική) στο Ν.ημισφαίριο, αν και σε μικρότερο βαθμό. Αυτή αντιστάθμισε μερικώς τη (μη σημαντική) ψύξη στο Β.ημισφαίριο, την ίδια περίοδο, για να δώσει μία (μη σημαντική) ψύξη των 0.03°C παγκοσμίως. Η παγκόσμια τάση από το 1861 έως το 2000 μπορεί επιφυλακτικά να ερμηνευθεί ως μία ισοδύναμη γραμμική θέρμανση των 0.61° C σε μία περίοδο 140 ετών, με μία πιθανότητα 95% για αβεβαιότητα των ±0.16° C. Από το 1901, έχει συμβεί μία ισοδύναμη θέρμανση των 0.57° C με μία αβεβαιότητα των ±0.17° C.

Με αναφορά ξανά στον Πίνακα Β, η καλύτερη εκτίμησή των ερευνητών για ισοδύναμο γραμμικό ρυθμό θέρμανσης της επιφάνειας της ξηράς και των ωκεανών μεταξύ 1861 και 2000, παγκοσμίως, είναι $0.044^{\circ}\text{C}/\text{δεκαετία}$, ή μια θέρμανση των $0.61 \pm 0.16^{\circ}\text{C}$. Την περίοδο 1901-2000, οι αντίστοιχες τιμές είναι $0.058^{\circ}\text{C}/\text{δεκαετία}$ ή μία θέρμανση των $0.57 \pm 0.17^{\circ}\text{C}$. Αυτές οι τιμές περιλαμβάνουν τα τροποποιημένα αποτελέσματα των ετήσιων αβεβαιοτήτων. Έτσι, έχει υπολογιστεί ότι από τα τέλη του 19^{ου} ή τις αρχές του 20^{ου} αιώνα έως το 2000, η παγκόσμια θέρμανση είναι $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$. Αυτό είναι 0.15°C μεγαλύτερη θέρμανση από το 0.3° έως 0.6°C , εκτιμώμενο πιο υποκειμενικά μέχρι το 1994 από τη SAR. Αυτή η σχετικά μεγάλη αύξηση εξηγείται από την αύξηση στην θερμοκρασία έως ότου η SAR να ολοκληρωθεί, από βελτιωμένες μεθόδους ανάλυσης και από το γεγονός ότι η SAR δεν αναβάθμισε τη τιμή στην Πρώτη Έκθεση Αξιολόγησης (FAR), χωρίς πρόσθετη θέρμανση. Η τελευταία απόφαση έγινε εξαιτίας μιας προσεκτικής ερμηνείας των γενικών αβεβαιοτήτων οι οποίες τη φάση αυτή ήταν υποκειμενικά προσδιορισμένες.

Είναι οι μεταβολές της επιφανειακής θερμοκρασίας στη ξηρά και στους ωκεανούς σε αμοιβαία συμφωνία;

Η εντονότερη θέρμανση τον 20^ο αιώνα συνέβη σε δύο ξεχωριστές περιόδους, που διαχωρίζονται, παγκοσμίως, από αρκετές δεκαετίες μικρής ολικής, κατά μέσο όρο, μεταβολής.

Η ταχύτερη θέρμανση στην επιφάνεια της ξηράς σε σχέση με την επιφανειακή θερμοκρασία στους ωκεανούς θα μπορούσε εν μέρει να είναι ένα στοιχείο ανθρωπογενούς θέρμανσης. Παρ'όλα αυτά, ένα τμήμα, τουλάχιστον στο Β.ημισφαίριο, βόρεια των 40 έως 45°B , μπορεί να είναι αποτέλεσμα της απότομης αύξησης στη θετική φάση του χειμερινού μισού έτους της Κύμανσης του Β.Ατλαντικού (NAO)/ Αρκτικής Κύμανσης (AO) μέχρι περίπου το 1970.

Γενικά, τον 20^ο αιώνα παρατηρήθηκε μία συνεχής, μεγάλης-κλίμακας, θέρμανση του αέρα στην επιφάνεια της ξηράς και των ωκεανών. Μερικές τοπικές λεπτομέρειες μπορούν να αποδειχθούν από ταυτόχρονες μεταβολές της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας.

Θερμοκρασία στην υπο-επιφάνεια των ωκεανών και αλατότητα

Ενώ η θερμοκρασία των ανώτερων στρωμάτων των ωκεανών και η αλατότητα είναι συνδεδεμένες με την ατμόσφαιρα σε ημι-ημερήσιες και εποχιακές χρονοκλίμακες, ο βαθύς ωκεανός ανταποκρίνεται σε πολύ μεγαλύτερες κλίμακες χρόνου. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, τα δεδομένα για το προφίλ της θερμοκρασίας και της αλατότητας είναι πιο προσιτά.

➤ Ειρηνικός ωκεανός

Οι μεταβολές της θερμοκρασίας και της αλατότητας είναι σύμφωνες με την επιφανειακή θέρμανση και ανανέωση στα μέσα και υψηλά γεωγραφικά πλάτη και με την επακόλουθη υποβύθιση αυτών των μεταβολών στο θερμοκλινές. Από το 1968/69 και το 1990/91, τα νερά του Ν.Ειρηνικού ωκεανού κάτω από τη βάση του θερμοκλινούς έχουν ψυχθεί και ανανεωθεί. Η πιο έντονη ψύξη και ανανέωση των -1.0 και 0.25°C , αντιστοίχως, συνέβησαν κοντά στις 48°N και παρατηρήθηκαν ακόμη στις 20°N . Όλες οι βαθιές υδάτινες μάζες δείχνουν μία ψύξη και ανανέωση σε αυτά τα υψηλά νότια γεωγραφικά πλάτη.

➤ Αρκτικός ωκεανός

Πρόσφατα έρευνες έχουν αποκαλύψει ένα υπο-επιφανειακό στρώμα θερμού νερού, που έρχεται από τον Ατλαντικό ωκεανό. Αυτό είναι έως 1°C θερμότερο και η μέγιστη θερμοκρασία του είναι έως 100 dbar πιο ρηχή, όπως παρατηρήθηκε στα παγοκαλύματα από το 1950 έως το 1980. Επίσης, δεδομένα από πάγους στα τέλη του 1980 και τις αρχές του 1990 υποστηρίζουν την άποψη αυτή. Η θέρμανση είναι εντονότερη στην Ευρασιατική Λεκάνη. Ετήσιες έρευνες νότια της λεκάνης του Καναδά από το 1979 απέδειξαν:

- τη θέρμανση και την υποβύθιση χαμηλότερα του στρώματος του Ατλαντικού,
- τη ψύξη του χαμηλότερου στρώματος του αλοκλινούς κατά 0.12°C και
- τη θέρμανση του ανώτερου στρώματος του αλοκλινούς κατά 0.15°C .

Ακόμη, αποδείχτηκε ότι τα νερά του ψυχρού αλοκλινούς καλύπτουν μία σημαντικά μικρότερη περιοχή στα νεότερα δεδομένα. Αυτό είναι σύμφωνο με

μία μειωμένη τροφοδοσία ψυχρών, φρέσκων νερών του αλοκλινούς από τις περιοχές Shelf του Ειρηνικού.

➤ Ατλαντικός ωκεανός

Ο υπο-αρκτικός Β.Ατλαντικός ωκεανός παρουσιάζει δεκαετή μεταβλητότητα εξίσου στη θερμοκρασία και την αλατότητα. Οι επιστήμονες ανακάλυψαν ότι η μεταβλητότητα της αλατότητας σε όλη τη υπο-αρκτική περιοχή, τη περίοδο 1948-1990, ήταν χαρακτηριστική για περιόδους 10-ετών ή περισσότερο. Αυτή επεκτεινόταν από την επιφάνεια μέχρι κάτω από τη βάση του αναμεμιγμένου χειμερινού στρώματος. Αυτό το στοιχείο αλατότητας παρατηρήθηκε σε οποιοδήποτε σημείο του ΒΔ Ατλαντικού ωκεανού.

Τα βαθιά νερά του Β.Ατλαντικού ξεκινούν ως ενδιάμεσα νερά των Νορβηγικών θαλασσών. Τα νερά έχουν ανανεωθεί τις δεκαετίες των '80 και '90. Επιπλέον, η απουσία της μεταφοράς θερμότητας σε βάθος, την ίδια περίοδο, είχε ως αποτέλεσμα τα νερά του πυθμένα της Νορβηγικής θάλασσας να γίνουν πιο θερμά, πιο αλμυρά και λιγότερο πυκνά. Οι μειωμένες αλατότητες κατέληξαν σε μειωμένες πυκνότητες και σε μία μείωση περίπου 1-7%/δεκαετία στη μεταφορά βαθένων υδάτων στον Β.Ατλαντικό ωκεανό.

Ανάμεσα στις τροπικές και υποτροπικές περιοχές του Β.Ατλαντικού, οι βαθιές και ενδιάμεσες υδάτινες μάζες θερμαίνονται. Στον ωκεάνιο σταθμό S (NA των Βερμούδων, 32° 17'Β, 64° 50'Δ) οι ερευνητές ανακάλυψαν ένα σχεδόν συνεχή ρυθμό θέρμανσης, 0.05° C/δεκαετία, για το στρώμα των 1500 έως 2500 dbar για την 73ετή περίοδο 1922-1995. Αυτό αντιστοιχεί σε μια κατακόρυφη ροή θερμότητας 0.7 Wm⁻². Τέλος αποδείχθηκε ένας ρυθμός θέρμανσης 0.06° C/δεκαετία.

➤ Ινδικός ωκεανός

Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν από το 1959 έως το 1987 φανερώνουν θέρμανση στα ανώτερα 900 m της υδάτινης στήλης (μέγιστη μέση θέρμανση των 0.5° C στα 220 dbar).

Θερμοκρασία αέρα στα ανώτερα στρώματα

Αρκετά συστήματα μέτρησης είναι διαθέσιμα για να εκτιμήσουν τις θερμοκρασιακές μεταβολές και τις κατευθύνσεις του αέρα άνω της επιφάνειας. Τέτοια συστήματα μέτρησης είναι:

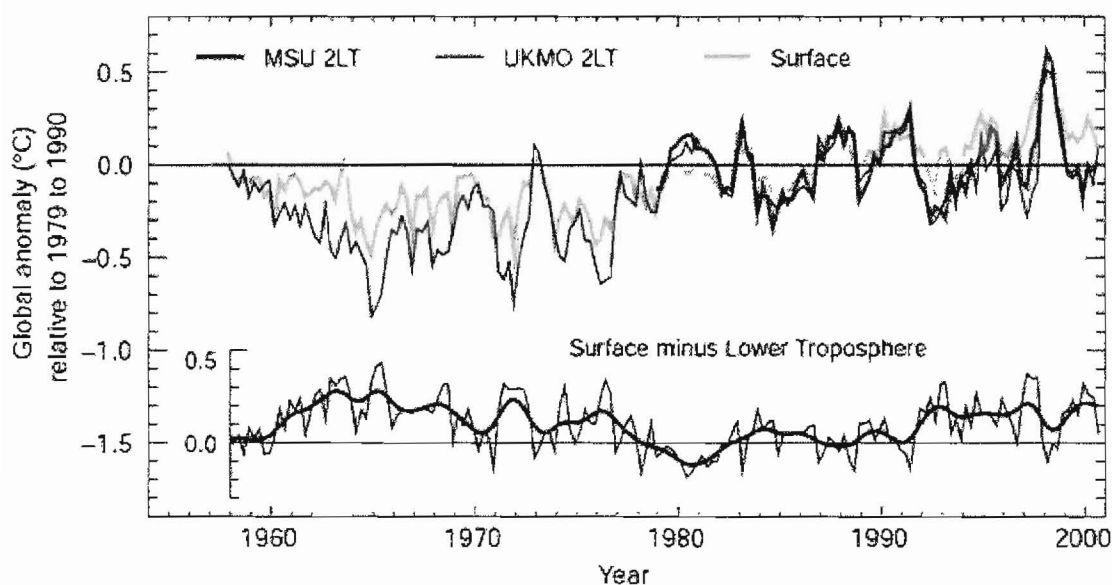
- τα 'μετεωρολογικά' μπαλόνια
- οι δορυφόροι
- rocketsondes και lidar
- οι επανεξετάσεις και οι αναλύσεις των καταγραφών.

Πως συγκρίνονται οι μεταβολές της επιφανειακής και της ανώτερης θερμοκρασίας του αέρα;

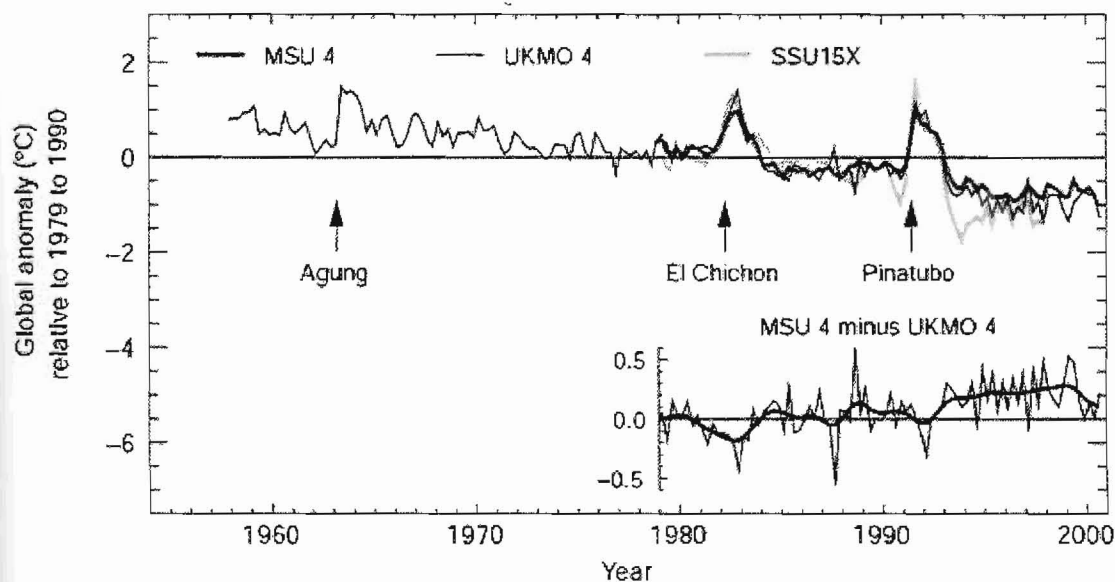
Στο Σχ.5 φαίνονται οι μεταβολές της θερμοκρασίας στην επιφάνεια, την τροπόσφαιρα και τη στρατόσφαιρα (με τη χρήση αντιπροσωπευτικών σειρών δεδομένων). Οι τιμές των τάσεων ($^{\circ}\text{C}/\text{δεκαετία}$) διακρίνονται στον Πίνακα Γ με 95% αντιπροσωπευτικά διαστήματα. Εν μέρει, αυτές αντιπροσωπεύουν τις αβεβαιότητες λόγω 'χρονικών' λαθών στη δειγματοληψία, κι όχι λόγω λαθών στις μετρήσεις.

Το αποτέλεσμα των εκρηξιγενών ηφαιστειακών γεγονότων είναι φανερό στο Σχ.5, καθώς είναι μια σχετική μεταβολή προς θερμότερες θερμοκρασίες στην κατώτερη τροπόσφαιρα σε σύγκριση με την επιφάνεια, στα τέλη του 1970, ακολουθούμενη από μεγάλες μεταβολές λόγω της ENSO (ειδικότερα το 1998). Μετά τη μεταβολή στα τέλη του 1970, η ολική τάση θερμοκρασίας στην τροπόσφαιρα είναι σχεδόν μηδενική, αλλά η επιφάνεια έχει θερμανθεί (Σχ. 5α και Πιν. Γ).

a) Lower troposphere and surface



b) Lower stratosphere



Σχήμα 5: (a) Εποχιακές ανωμαλίες της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$), την περίοδο 1958-2000, σε σχέση με την περίοδο 1979-1990 για την κατώτερη τροπόσφαιρα όπως καταγράφηκαν από δορυφόρους (MSU 2LT) και από μετεωρολογικά μπαλόνια (UKMO 2LT), και για τη επιφάνεια. (b) Ομοίως για τη θερμοκρασία της κατώτερης στρατόσφαιρας, με βάση καταγραφές δορυφόρων (MSU 4 και SSU 15X) και μπαλονιών (UKMO 4).

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ

Πίνακας Γ: Οι ετήσιες μέσες ανωμαλίες της θερμοκρασίας του αέρα στην επιφάνεια και στα ανώτερα στρώματα από διαφορετικές σειρές δεδομένων.

	1958 to 2000		1958 to 1978		1979 to 2000	
	Globe	Tropics	Globe	Tropics	Globe	Tropics
Surface						
UKMO LSAT + UKMO SST (Jones <i>et al.</i> , 2001)	0.10 (0.05)	0.08 (0.06)	-0.05 (0.07)	-0.09 (0.12)	0.16 (0.06)	0.10 (0.10)
GISS LSAT + UKMO ISST (Hansen <i>et al.</i> , 1999; Rayner <i>et al.</i> , 2000)	0.09 (0.04)	0.09 (0.06)	-0.03 (0.07)	-0.09 (0.11)	0.13 (0.07)	0.09 (0.10)
NCDC LSAT + NCEP SST (Quayle <i>et al.</i> , 1999; Reynolds and Smith, 1994)	0.09 (0.05)	0.09 (0.06)	-0.05 (0.06)	-0.08 (0.11)	0.14 (0.06)	0.10 (0.11)
Lower troposphere						
UKMO 2LT (Parker <i>et al.</i> , 1997)	0.11 (0.07)	0.13 (0.08)	-0.03 (0.12)	0.07 (0.16)	0.03 (0.10)	-0.08 (0.12)
MSU 2LT (Christy <i>et al.</i> , 2000)					0.04 (0.11)	-0.06 (0.16)
NCEP 2LT (Stendel <i>et al.</i> , 2000)	0.13 (0.07)	0.08 (0.08)	0.02 (0.18)	-0.05 (0.17)	0.01 (0.11)	-0.07 (0.14)
NOAA 850–300hPa (Angell, 2000)	0.07 (0.08)	0.07 (0.07)	-0.08 (0.15)	0.04 (0.20)	-0.03 (0.15)	-0.11 (0.19)
RIHMI 850–300hPa (Sterin, 1999)	0.04 (0.04)	0.07 (0.05)	-0.03 (0.06)	0.07 (0.08)	0.00 (0.07)	-0.06 (0.09)
Lower stratosphere						
UKMO 4 (Parker <i>et al.</i> , 1997)	-0.39 (0.15)	-0.31 (0.19)	-0.37 (0.21)	-0.07 (0.51)	-0.64 (0.47)	-0.50 (0.54)
MSU 4 (Christy <i>et al.</i> , 2000)					-0.52 (0.48)	-0.29 (0.51)
NCEP 4 (Stendel <i>et al.</i> , 2000)	-0.25 (0.62)	-0.04 (0.32)	-0.36 (0.33)	-0.46 (0.29)	-0.61 (1.21)	-0.57 (0.77)
NOAA 100–50hPa (Angell, 2000)	-0.64 (0.30)	-0.58 (0.39)	-0.23 (0.22)	0.20 (0.43)	-1.10 (0.58)	-0.68 (2.08)
RIHMI 100–50hPa (Sterin, 1999)	-0.25 (0.12)	-0.22 (0.12)	-0.20 (0.27)	-0.08 (0.10)	-0.43 (0.24)	-0.45 (0.28)
Surface minus lower troposphere						
	-0.01 (0.05)	-0.05 (0.07)	-0.03 (0.08)	-0.16 (0.10)	0.13 (0.06)	0.17 (0.06)

Στο Σχ. 5β όλες οι σειρές δεδομένων που αφορούν τη στρατόσφαιρα, εκτός της NCEP 4 διότι περιέχει λανθασμένες τάσεις, δείχνουν σημαντικά αρνητικές τάσεις (Πιν. Γ).

Επίσης, διάφορες μελέτες δείχνουν μια αρνητική τάση στη θερμοκρασία, αυξανόμενη με το ύψος:

- -0.5° C / δεκαετία στα 15 km
- -0.8° C / δεκαετία στα 20-35 km
- -2.5° C / δεκαετία στα 50 km.

Το κάθετο προφίλ των τάσεων της θερμοκρασίας, που βασίστηκε σε επιφανειακά δεδομένα και radiosondes, είναι σύμφωνο με τις θερμοκρασίες που καταγράφηκαν από τους δορυφόρους. Οι παγκόσμιες τάσεις από το 1979 είναι:

- πιο θετικές στην επιφάνεια, αν και λιγότερο θετικές για τις νυχτερινές θαλάσσιες θερμοκρασίες του αέρα στο Ν.ημισφαίριο,
- σχεδόν μηδενικές στα επίπεδα μεταξύ 850 - 300 hPa (1.5-8 km) και
- αρνητικές στα 200 hPa (11 km) και πάνω.

Έτσι, κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών, η επιφάνεια, το μεγαλύτερο μέρος της τροπόσφαιρας και η στρατόσφαιρα έχουν ανταποκριθεί διαφορετικά στις κλιματικές επιρροές επειδή διαφορετικές φυσικές διαδικασίες έχουν επικρατήσει σε κάθε μία από αυτές τις περιοχές τη περίοδο αυτή.

Τη περίοδο 1979-2000, το μέγεθος των τάσεων μεταξύ της επιφάνειας και της MSU 2LT είναι γενικά παρόμοιο σε πολλά μέρη των εξωτροπικών (20° B προς τους πόλους) στο Β.Ημισφαίριο. Για παράδειγμα, οι βόρειες εξωτροπικές τάσεις για την επιφάνεια και την MSU 2LT ήταν 0.28 και 0.21° C/δεκαετία, αντίστοιχως, και οι τάσεις στα ηπειρωτικά της Β.Αμερικής ήταν 0.27±0.24 και 0.28±0.23° C/δεκαετία, αντίστοιχα. Στην Ευρώπη, οι ρυθμοί ήταν 0.38±0.36 και 0.38±0.30° C/δεκαετία, αντίστοιχα. Στους τροπικούς, ήταν 0.10±0.16 και -0.06±0.16° C/δεκαετία, αντίστοιχα (Πιν. Γ), και στους νότιους εξωτροπικούς 0.08±0.06 και -0.05±0.08° C/δεκαετία, αντίστοιχα. Οι τάσεις που υπολογίστηκαν για τις διαφορές μεταξύ της επιφάνειας και της τροπόσφαιρας, την περίοδο 1979-2000, είναι (στατιστικά σημαντικές) παγκοσμίως 0.13±0.06° C/δεκαετία, και στους τροπικούς 0.17±0.06° C/δεκαετία. Η ακολουθία μιας ηφαιστειακής έκρηξης, τα ENSO γεγονότα και οι τάσεις στην Αρκτική Κύμανση έχουν όλα συνδεθεί με ένα μέρος της διαφοράς στους ρυθμούς θέρμανσης.

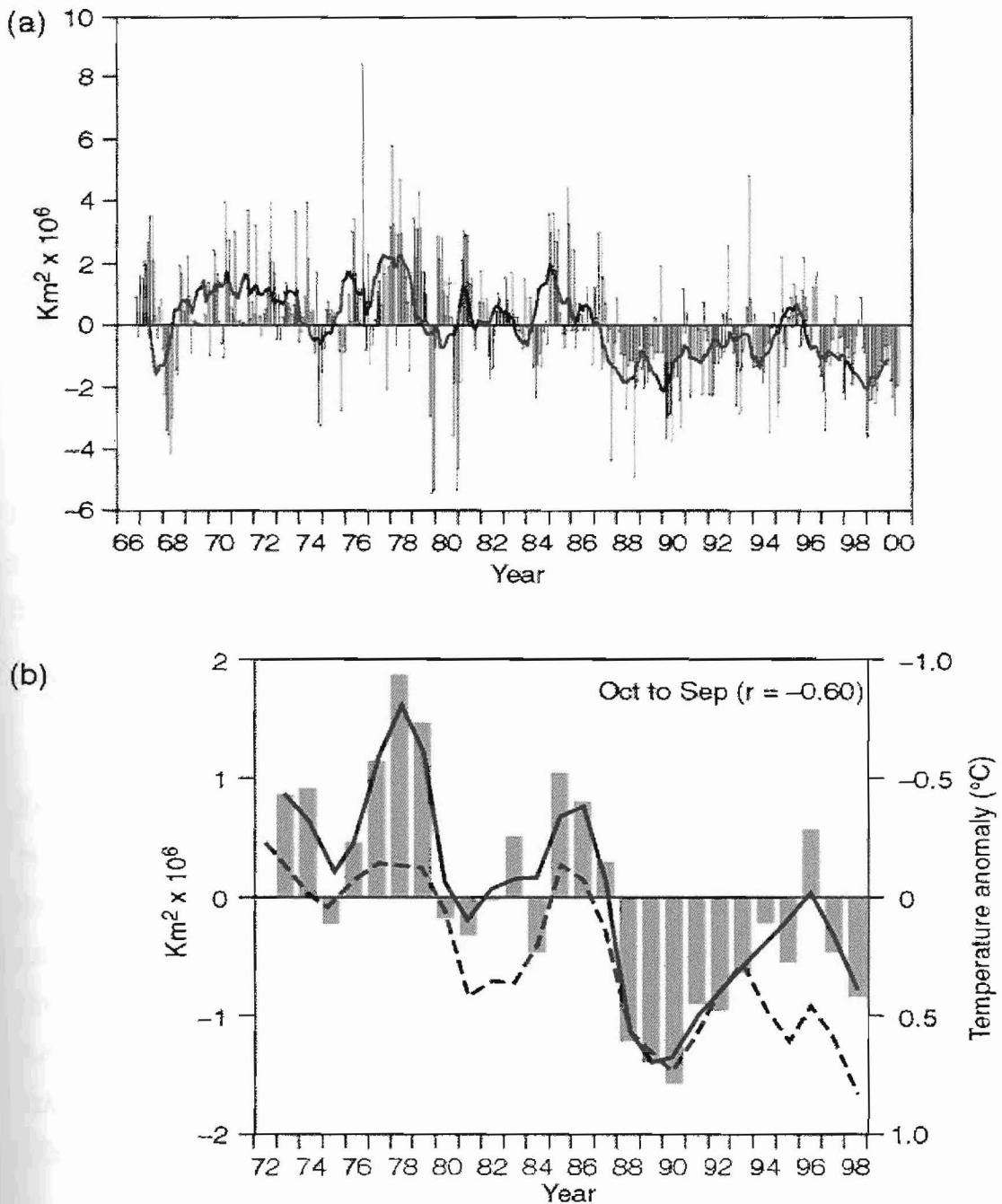
Οι αβεβαιότητες που προέρχονται από λάθη μέτρησης μπορεί να είναι σημαντικές. Μία εκτίμηση της αβεβαιότητας μπορεί να προέρχεται από τις συγκρίσεις των ποικίλων αναλύσεων στον Πιν. Γ. Για τις τάσεις κάτω των 300 hPa, η αβεβαιότητα μπορεί να είναι ±0.10° C/δεκαετία από το 1979.

Γενικά, είναι πολύ πιθανό ότι η επιφάνεια έχει θερμανθεί, κατά μέσο όρο παγκοσμίως, αναφορικά με τη τροπόσφαιρα και η τροπόσφαιρα αναφορικά με τη στρατόσφαιρα από το 1979. Παρ'όλα αυτά η σχετική θέρμανση είναι χωρικά πολύ μεταβλητή και αρκετά σημαντική στους τροπικούς και υποτροπικούς. Αποδείχτηκε ότι η τροπόσφαιρα θερμάνθηκε σχετικά με την επιφάνεια στην προ-‘δορυφορική’ περίοδο. Οι αβεβαιότητες εξαιτίας των περιορισμένων ‘χρονικών’ δειγμάτων αποτρέπουν τη σίγουρη παρέκταση αυτών των κατευθύνσεων σε άλλες ή μεγαλύτερες χρονικές περιόδους.

Αλλαγές στην Κρυόσφαιρα

➤ Χιονοκάλυμμα (και χιονόπτωση)

Δορυφορικές καταγραφές δείχνουν ότι οι ετήσιες εκτάσεις χιονοκαλύμματος (SCE) στο Β.ημισφαίριο έχουν μειωθεί περίπου κατά 10% από το 1966. Αυτό οφείλεται κυρίως στις μειώσεις την άνοιξη και το καλοκαίρι, από τα μέσα του 1980, στην Ευρασιατική και Αμερικάνικη ήπειρο (Σχ. 6α).



Σχήμα 6: (α) Ανωμαλίες της μηνιαίας χιονοκάλυψης στην ξηρά του Β.Ημισφαιρίου μεταξύ Νοεμβρίου του 1966 και Μαΐου του 2000. (β) Εποχιακές ανωμαλίες της χιονοκάλυψης σε σχέση με τις θερμοκρασιακές ανωμαλίες.

Οι χειμερινές και οι φθινοπωρινές SCE δε δείχνουν στατιστικά σημαντική αλλαγή. Η μείωση της χιονοκάλυψης, στα μέσα προς τα τέλη της δεκαετίας '80, ήταν αρκετά σχετική με αυξήσεις της θερμοκρασίας σε χιονοκαλυμμένες εκτάσεις (Σχ. 6β). Υπάρχει μια πολύ σημαντική ενδοετήσια (+0.6) και πολύ-δεκαετής συσχέτιση μεταξύ των αυξήσεων της θερμοκρασίας και της μείωσης της χιονοκάλυψης την άνοιξη στο Β.Ημισφαίριο, εφόσον τα δεδομένα ήταν διαθέσιμα (1966). Η έκταση του χιονοκαλύμματος έχει μειωθεί περίπου 10% από το 1966.

Μεγάλες τοπικές χρονο-σειρές, βασισμένες σε καταγραφές σταθμών και αναπαραστάσεις, προτείνουν ότι οι εαρινές και οι θερινές SCE του Β.Ημισφαιρίου, την τελευταία δεκαετία, ήταν στις χαμηλότερες τιμές τους τα τελευταία 100 έτη. Επίσης, το κοινό σημείο των μελετών που έχουν εξετάσει την εποχικότητα είναι μια ολική μείωση εαρινό χιονοκάλυμμα στο τελευταίο μισό του 20^{ου} αιώνα.

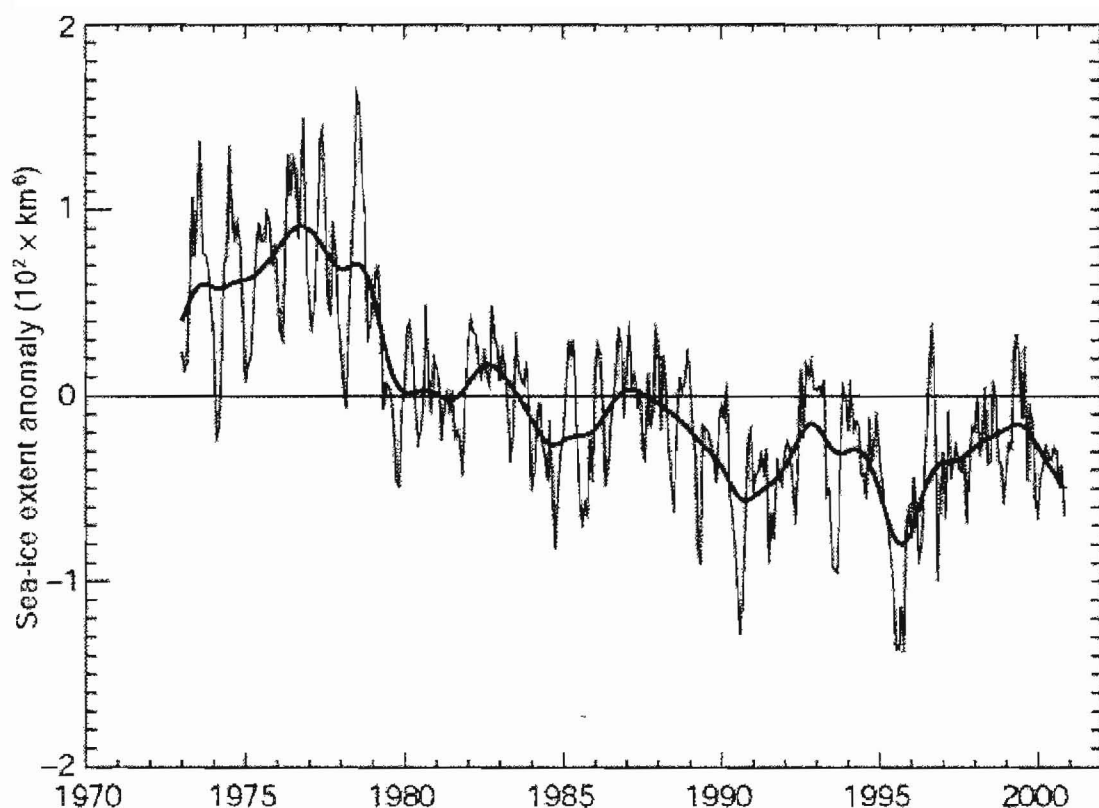
Παγκοσμίως, έχουν γίνει αρκετές μελέτες για τις τάσεις της χιονόπτωσης. Έχουν παρατηρηθεί στατιστικά σημαντικές αυξήσεις στην εποχιακή χιονόπτωση στις κεντρικές ΗΠΑ, τον 20^ο αιώνα. Τις πρόσφατες δεκαετίες, η χιονόπτωση ήταν ισχυρότερη στην υπήνεμη πλευρά των Μεγάλων Λιμνών στη Β.Αμερική, σε σχέση με τις αρχές του αιώνα.

➤ Έκταση θαλάσσιου πάγου και πυκνότητα

Έκταση θαλάσσιου πάγου

Η έκταση του θαλάσσιου πάγου αναμένεται να είναι ένας ευαίσθητος δείκτης του θερμού κλίματος. Όμως, μόνο πρόσφατα έγιναν διαθέσιμες μεγάλες καταγραφές στον Αρκτικό ωκεανό, ενώ οι γνώσεις για την έκταση του θαλάσσιου πάγου της Ανταρκτικής πριν τη δεκαετία '70 ήταν περιορισμένη.

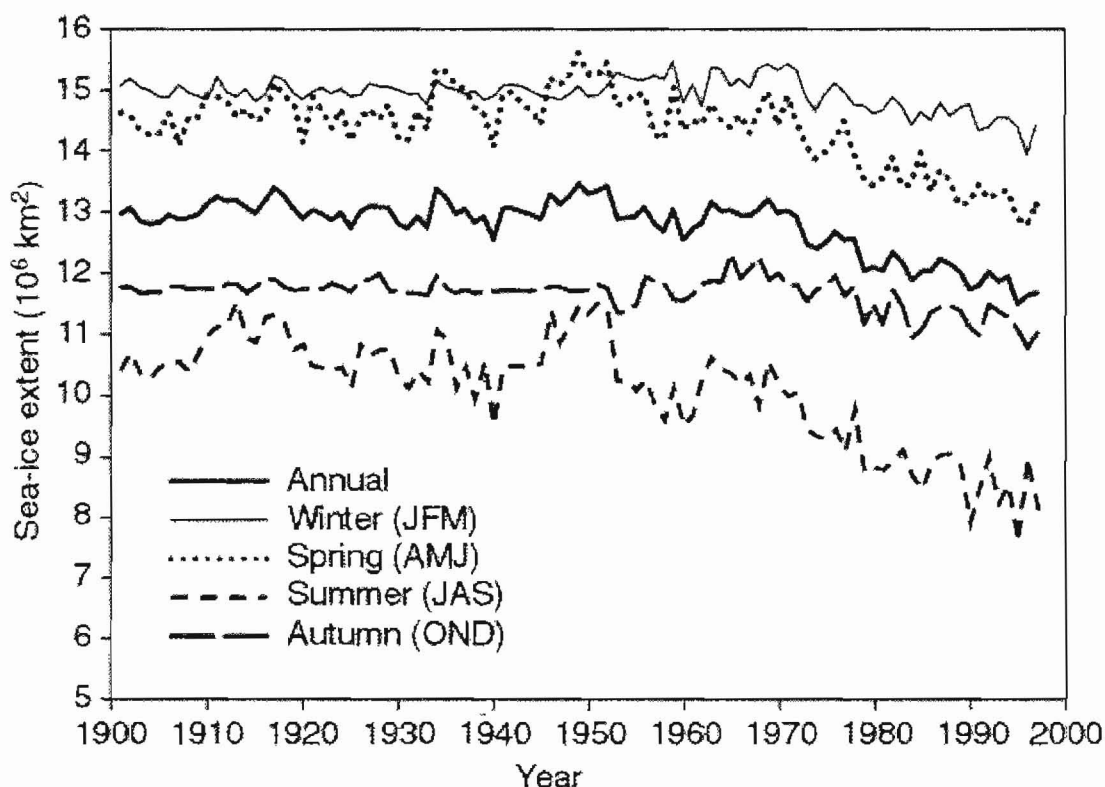
Από το Νοέμβριο του 1978 μέχρι το Δεκέμβριο του 1996, η έκταση του θαλάσσιου πάγου στο Β.ημισφαίριο έδειξε μία μείωση των $-2.8 \pm 0.3^\circ$ C/δεκαετία (Σχ. 7).



Σχήμα 7: Μηνιαίες ανωμαλίες της έκτασης του Αρκτικού θαλάσσιου πάγου, το 1973 έως το 2000, σε σχέση με το 1973 έως το 1996.

Το Σχ. 8 δείχνει τις ετήσιες χρονοσειρές του θαλάσσιου πάγου στο Β.ημισφαίριο για την περίοδο 1901 έως 1999 (χρησιμοποιώντας in situ δεδομένα πριν τη χρήση δορυφόρων).

Πρέπει να τονιστεί ότι η χωρική κάλυψη των προγενέστερων δεδομένων δεν είναι ολοκληρωμένη, με τα μεγαλύτερα 'κενά' τους το φθινόπωρο και τον χειμώνα. Επειδή λίγα δεδομένα ήταν διαθέσιμα, η μεταβλητότητα των φθινοπωρινών και χειμερινών σειρών στο Σχ. 8 είναι μικρότερη τις προηγούμενες δεκαετίες του αιώνα. Η καλοκαιρινή μείωση που είναι αρκετά υπεύθυνη για την ολική κατακόρυφη τάση, τη περίοδο χρήσης των δορυφόρων, είναι εμφανής το β' μισό του 20^{ου} αιώνα. Οι εαρινές τιμές δείχνουν μια ασθενή αρνητική τάση την περίοδο αυτή.



Σχήμα 8: Χρονοσειρές της ετήσιας και της εποχιακής έκτασης του θαλάσσιου πάγου στο Ν.Ημισφαίριο, το 1901 έως το 1999.

Η ολική πρόσφατη μείωση της έκτασης του Αρκτικού παγοκαλύμματος είναι σύμφωνη με τον σύγχρονο τύπο θερμοκρασιακής αλλαγής στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, που περιλαμβάνει αύξηση της θερμοκρασίας στις περισσότερες από τις υποαρκτικές περιοχές.

Σχετική με τη μείωση της έκτασης του θαλάσσιου πάγου είναι η μείωση στη διάρκεια της εποχής του θαλάσσιου πάγου και η αύξηση στη διάρκεια της Αρκτικής εποχής της καλοκαιρινής τήξης μεταξύ 1979 και 1998 (βασισμένη σε δορυφορικά δεδομένα). Η πιο σύντομη περίοδος ήταν το 1979 (57 ημέρες) και η μεγαλύτερη το 1998 (81 ημέρες) με μία αυξανούσα τάση 5 ημερών ανά δεκαετία. Η 7% /δεκαετία μείωση στην πολύ-ετή περιοχή με πάγους το 1978 έως το 1998, είναι σχετικά συγκρινόμενη με μία μείωση περίπου 2%/δεκαετία στην ολική παγωμένη περιοχή το χειμώνα. Αυτό αντιπροσωπεύει μεγαλύτερη καλοκαιρινή τήξη.

Υφαλοκρηπίδες πάγου στην Ανταρκτική Χερσόνησο

Παρ'όλο που η θέρμανση στην Ανταρκτική, γενικά, φαίνεται να είναι πιθανώς μισός βαθμός το τελευταίο μισό αιώνα, η Ανταρκτική χερσόνησος θερμάνθηκε πιο απότομα και συγκεκριμένα άνω των 2° C από τη δεκαετία του 1940. Αυτή η περιοχική θέρμανση έχει οδηγήσει σε μία μετανάστευση του 'κλιματικού ορίου' των υφαλοκρηπίδων πάγου προς το νότο, με αποτέλεσμα πέντε υφαλοκρηπίδες πάγου να έχουν υποχωρήσει τον τελευταίο αιώνα. Η προοδευτική υποχώρηση τελικά κατέληξε στην εκπληκτική κατάρρευση του Prince Custav και τμημάτων της υφαλοκρηπίδας πάγου Larsen το 1995. Το κάθε ένα άφησε μία μικρή υπολειμματική προεξοχή.

Πάχος του θαλάσσιου πάγου

Οι επιστήμονες συγκεντρώνουν πληροφορίες για το πάχος των θαλάσσιων πάγων στην Ανταρκτική μέσω των sonar των υποβρυχίων. Η γενική μείωση του μέσου πάχους του θαλάσσιου πάγου το 1976 έως το 1996 ήταν 43%. Για κάθε 1° και άνω, γεωγραφικού πλάτους, παρατηρήθηκε μία σημαντική μείωση του πάχους του πάγου και μερικές φορές τελείως 'ανοιχτά' ύδατα.

Η περίοδος του πολύ-ετούς πάγου και οι εκτιμήσεις του πάχους του πάγου (χειμώνας) δείχνουν μία μείωσή του κατά 5-7% ανά δεκαετία, σημαντικά μικρότερη από τις εκτιμήσεις που έγιναν υποθαλάσσια (τέλη καλοκαιριού).

➤ Παγετώνας (Permafrost)

Περίπου το 25% της ξηράς στο Β.ημισφαίριο είναι καλυμμένο με παγετώνα. Ο παγετώνας σε μεγάλο μέρος εξαρτάται από το κλίμα. Πάνω από το 50% του παγετώνα παγκοσμίως είναι σε θερμοκρασίες λίγων βαθμών κάτω από του 0° C. Οι θερμοκρασιακές μεταβολές του παγετώνα κοντά στην επιφάνεια (20 εως 200 m βάθος) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν ένας ευαίσθητος δείκτης της ενδοετήσιας και δεκαετούς-έως-αιώνιας κλιματικής μεταβλητότητας και των, μεγάλων περιόδων, μεταβολών στην επιφανειακή ενεργειακή ισορροπία. Πολύ μικρές μεταβολές του κλίματος στην επιφάνεια μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές μεταβολές στις θερμοκρασίες του παγετώνα. Έρευνες απέδειξαν ότι

υπήρχε μία γενική θέρμανση του παγετώνα στον Αρκτικό ωκεανό της Αλάσκας των 2 έως 4° C το τελευταίο αιώνα.

Στη Β.Αμερική, το νότιο άκρο της ασυνεχούς ζώνης του παγετώνα έχει μεταναστεύσει βόρεια ως ανταπόκριση στη θέρμανση μετά τη 'Μικρή Παγετώδη Περίοδο' (Little Ice Age) και συνεχίζει έτσι μέχρι σήμερα.

Πρόσφατες αναλύσεις δείχνουν ότι ο παγετώνας σε πολλές περιοχές της γης αρχίζει να θερμαίνεται. Παρ'όλα αυτά, το μέγεθος (από λίγα δέκατα έως μερικούς βαθμούς Κελσίου) και ο ρυθμός θέρμανσης ποικίλουν περιοχικά και λίγα μέρη σε μια δοσμένη περιοχή δείχνουν την ίδια τάση.

➤ Ορεινοί Παγετώνες

Η υποχώρηση των ορεινών παγετώνων χρησιμοποιήθηκε από την IPCC (1990) για να υποστηρίξουν την άνοδο των παγκόσμιων θερμοκρασιών μέχρι τα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Δύο τύποι δεδομένων περιέχουν κλιματικές πληροφορίες:

i) οι παρατηρήσεις στην ισορροπία των μαζών και

ii) τα δεδομένα στη γεωμετρία των παγετώνων

αξιόλογα με το μήκος των παγετώνων.

Η συγκεκριμένη ισορροπία μαζών ορίζεται ως το 'δίκτυο' ετήσιας προσθήκης ή απώλειας μάζας στην επιφάνεια των παγετώνων, ανά μονάδα περιοχής στην επιφάνεια. Εάν ένας παγετώνας που υποχωρεί σταθερά γίνει πιο λεπτός, η ισορροπία μάζας θα γίνει πιο αρνητική εξαιτίας της βραδέως αυξανόμενης θερμοκρασίας του επιφανειακού αέρα, λόγω της εξασθενημένης επιφάνειας που δεν αντιπροσωπεύεται σε μεγάλης-κλίμακας θερμοκρασία.

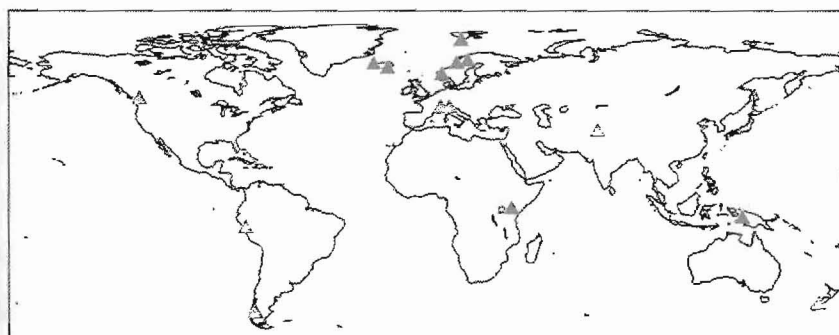
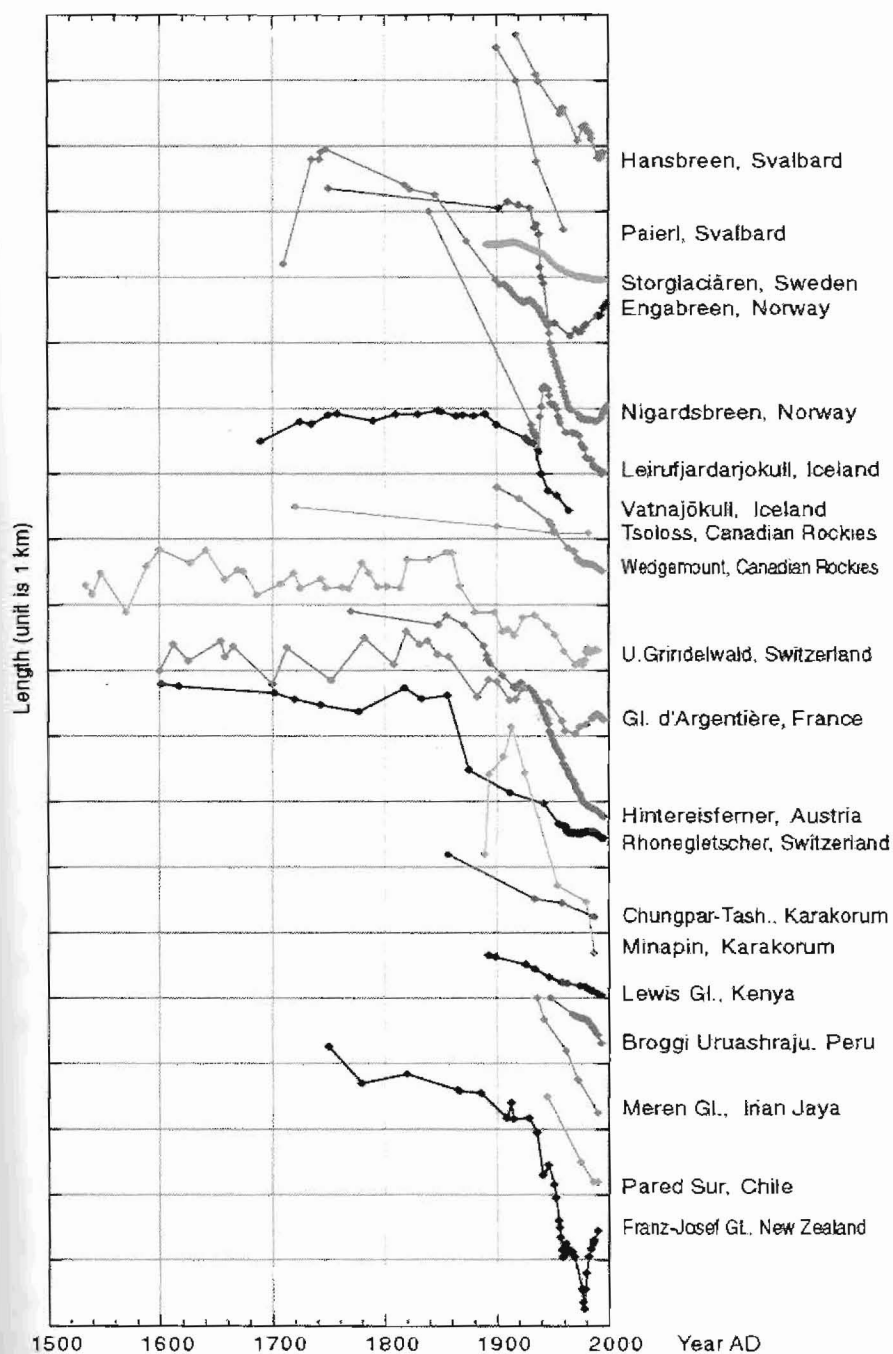
Πολλές πληροφορίες υπάρχουν στη γεωμετρία των παγετώνων των κοιλάδων. Οι καταγραφές των παγετώνων είναι πολύ χρήσιμες για τις μελέτες της μεταβλητότητας του κλίματος στο Ολόκαινο. Ένα μεγάλο ποσοστό των πληροφοριών είναι διαθέσιμο από σχέδια, χαλκογραφίες, ζωγραφιές και παλιές φωτογραφίες παγετώνων, παρόλο που τα περισσότερα δείχνουν τους ίδιους παγετώνες. Περίπου 50 παγετώνες έχουν δύο ή περισσότερες χρήσιμες εικόνες από διαφορετικές περιόδους. Σε πολλές περιπτώσεις η γεωμορφολογική απόδειξη της μορφής των τελικών μοραίνων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μία αξιόπιστη συμπληρωματική πληροφορία για να δημιουργήσουν την 'εικόνα' ενός παγετώνα τις τελευταίες δεκαετίες. Η συστηματική χαρτογράφηση των

παγετώνων άρχισε μόλις 100 χρόνια πριν και έχει περιοριστεί σε μερικούς. Τα πιο 'πλήρη' δεδομένα προέρχονται από μεταβολές μήκους. Οι καταγραφές μήκους των παγετώνων συμπληρώνουν τις καταγραφές από τα μετεωρολογικά όργανα επειδή

- i. μερικές επεκτείνονται πολύ πίσω στο χρόνο,
- ii. μερικές είναι από 'κινητές' περιοχές όπου λίγες μετεωρολογικές παρατηρήσεις επικρατούν,
- iii. κατά μέσο όρο, οι παγετώνες επικρατούν σε ένα σημαντικά μεγαλύτερο υψόμετρο από αυτό των μετεωρολογικών σταθμών.

Η μείωση του μήκους των πρόσφατων τροπικών παγετώνων και η έλλειψη της θέρμανσης στην κατώτερη τροπόσφαιρα από το 1979, αποδεικνύεται από δορυφόρους και ραδιοκύματα στους τροπικούς. Η μεγάλης-περιόδου παρακολούθηση της επέκτασης των παγετώνων δίνει πληθώρα αποδείξεων ότι οι τροπικοί παγετώνες υποχωρούν με ένα αυξανόμενο ρυθμό σε όλες τις περιοχές των τροπικών ορέων.

Παρόλα αυτά, η ταχεία υποχώρηση των παγετώνων στους τροπικούς δείχνει ότι είναι σύμφωνη με μία αύξηση του ψύχους σε τροπικά ύψη των 100m την περίοδο 1970-1986,. Αυτή είναι αντίστοιχη με μία αύξηση των 0.5° C στα τροπικά υψηλά επίπεδα των ορέων τα οποία επίσης συνδέονται με αυξήσεις στην τροπική SST από τα μέσα του 1970 (Σχ. 9)



Σχήμα 9: Είκοσι καταγραφές μήκους των παγετώνων από διαφορετικά μέρη του πλανήτη. Επίσης, φαίνεται η γεωγραφική συγκέντρωση των δεδομένων. παρ'όλο που ένα 'τρίγωνο' μπορεί να αναπαριστά πάνω από έναν παγετώνες.

Σε παγκόσμια κλίμακα, η θερμοκρασία του αέρα θεωρείται από τους περισσότερους μελετητές των παγετώνων ότι είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας για την υποχώρηση ενός παγετώνα. Αυτό βασίζεται σε υπολογισμούς με μοντέλα ισορροπίας μάζας. Για έναν τυπικό παγετώνα, στα μέσα γεωγραφικά πλάτη, μία μείωση στη νέφωσης κατά 30% ή μία μείωση στη βροχόπτωση κατά 25% θα έχει την ίδια επίδραση όσο μιας αύξησης 1° C της θερμοκρασίας.

Γενικά, οι παγετώνες δεν βρίσκονται σε ισορροπία με τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες. Θα πάρει αρκετό χρόνο προτού μοντελοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός παγετώνων. Ωστόσο, στο Σχ. 9 φαίνονται τα μήκη των παγετώνων σε έναν ρυθμό 10 έως 70 ετών. Άρα, η έναρξη της υποχώρησης των παγετώνων δείχνει ότι μια σημαντική παγκόσμια θέρμανση είναι πιθανό να έχει ξεκινήσει όχι αργότερα από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα.

Τις τελευταίες δύο μέχρι τρεις δεκαετίες, περισσότερες καταγραφές από αυτές του σχήματος είναι διαθέσιμες. Η γενική εικόνα είναι μίας ευρείας υποχώρησης, όπως παρατηρείται στην Αλάσκα, στην Ασία, στις Άλπεις, στην Ινδονησία, στην Αφρική, στις τροπικές και υποτροπικές περιοχές της Ν.Αμερικής. Σε μερικές περιοχές, όμως, ένας σημαντικός αριθμός παγετώνων έχουν πρόσφατα αναπτυχθεί (π.χ., Δ.Νορβηγία, Νέα Ζηλανδία).

➤ Πάγος Λίμνης και ποταμών

Πολλές μελέτες προτείνουν τη σημασία της διάλυσης του λιμναίου πάγου και του ποτάμιου πάγου ως ένα δείκτη κλιματικής μεταβλητότητας και μεταβολής, ειδικά καθώς σχετίζονται με τη θερμοκρασία και το χιονοκάλυμμα. Οι καταγραφές του λιμναίου και ποτάμιου πάγου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμήσουν ανεξάρτητα τις μεταβολές της θερμοκρασίας και σε μερική έκταση, του χιονοκαλύμματος. Μεγαλύτερες λίμνες συχνά έχουν τις καλύτερες καταγραφές, αλλά συχνά εντοπίζονται κοντά σε ανθρώπινες εγκαταστάσεις που μπορούν να επηρεάσουν την ομογένεια της καταγραφής.

Μία πρόσφατη ανάλυση έχει δημιουργηθεί από τάσεις σε 39 εκτεταμένες καταγραφές λιμναίου και ποτάμιου πάγου του Β.ημισφαιρίου για την 150ετή περίοδο από το 1846 έως το 1995. Οι ημερομηνίες διάλυσης του πάγου συμβαίνουν τώρα κατά μέσο όρο περίπου εννέα ημέρες νωρίτερα την άνοιξη

απ'ότι στην αρχή της καταγραφής και η φθινοπωρινή ψύξη συμβαίνει κατά μέσο όρο δέκα ημέρες αργότερα.

Είναι η υποχώρηση των Παγετώνων, του Θαλάσσιου Πάγου και του Χιονοκαλύμματος σχετική με τις Τάσεις της Επιφανειακής Θερμοκρασίας;

Μια σημαντική σχέση έχει βρεθεί μεταξύ των ενδοετήσιων μεταβολών (συσχετισμός= -0.60) της έκτασης του χιονοκαλύμματος του Β.ημισφαιρίου και των επιφανειακών θερμοκρασιών του αέρα στη ξηρά, την άνοιξη από τη δεκαετία του 1960. Παρ' όλα αυτά, η παρατηρούμενη αύξηση της θερμοκρασίας τη διάρκεια του χειμώνα δεν εκφράζεται σε μια μειωμένη έκταση του χιονοκαλύμματος.

Η μειωμένη παγοκάλυψη στις λίμνες και τους ποταμούς του Β.ημισφαιρίου την άνοιξη, είναι σύμφωνη με τη μειωμένη έκταση χιονοκαλύμματος αυτή την εποχή. Η υποχώρηση του θαλάσσιου πάγου την Αρκτική άνοιξη και το καλοκαίρι είναι επίσης σύμφωνη με μία αύξηση των εαρινών, και σε μία μικρότερη έκταση, των καλοκαιρινών θερμοκρασιών στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη του Β.Ημισφαιρίου. Οι καλοκαιρινές αυξήσεις της θερμοκρασίας ήταν μικρότερες απ'ότι την άνοιξη σε γειτονικές περιοχές, αλλά η έκταση του Αρκτικού θαλάσσιου πάγου και ειδικότερα η πυκνότητά του έχουν έντονα μειωθεί. Ωστόσο, υπάρχει μία μόνο μικρή ένδειξη μειωμένου Αρκτικού θαλάσσιου πάγου τον χειμώνα, όταν οι θερμοκρασίες έχουν επίσης αυξηθεί. Η έκταση του θαλάσσιου πάγου της Ανταρκτικής δεν έχει μειωθεί από τα τέλη της δεκαετίας '70 και η υποχώρηση του παγετώνα στους τροπικούς ήταν ιδιαίτερα έντονη τις πρόσφατες δεκαετίες, παρ'όλο που τροπικές θερμοκρασίες στην ελεύθερη ατμόσφαιρα, κοντά στα επίπεδα παγετώνα έχουν αυξηθεί λίγο από το 1980 σύμφωνα με τα radiosondes και τα MSU δεδομένα.

Συμπέρασμα

Οι παγκόσμιες επιφανειακές θερμοκρασίες έχουν αυξηθεί από 0.4 έως 0.8°C από τα τέλη του $19^{\text{ου}}$ αιώνα. Το μεγαλύτερο μέρος της θέρμανσης συνέβη σε δύο υποπεριόδους: 1910-1945 και 1976-σήμερα. Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας από το 1946 είναι $0.15^{\circ}\text{C}/\text{δεκαετία}$.

Νέες αναλύσεις των μέσων ημερήσιων μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών υποστηρίζουν μια μείωση στο ρυθμό των ημι-ημερήσιων θερμοκρασιών, με τις ελάχιστες θερμοκρασίες να αυξάνουν περίπου δύο φορές από τον ρυθμό των μέγιστων στο β' μισό του $20^{\text{ου}}$ αιώνα. Εποχιακά, στο Β.Ημισφαίριο η εντονότερη θέρμανση στη ξηρά συνέβη το χειμώνα και την άνοιξη, αλλά σημαντική ήταν και η θέρμανση κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Η θέρμανση του Ν.Ημισφαίριου έγινε επίσης έντονη το χειμώνα, στη ξηρά. Οι εντονότεροι ρυθμοί θέρμανσης συνεχίζουν να παρατηρούνται στις μέσου και χαμηλού πλάτους ηπειρωτικές περιοχές του Β.Ημισφαίριου.

Οι αναλύσεις των ολικών τάσεων της θερμοκρασίας στη χαμηλή έως την μέση τροπόσφαιρα και κοντά στην επιφάνεια από το 1958 είναι σε καλή συμφωνία, με μια θέρμανση του 0.1°C περίπου ανά δεκαετία. Από την αρχή της καταγραφής των δορυφόρων (1979), παρ' όλα αυτά, οι θερμοκρασίες της χαμηλής και μέσης τροπόσφαιρας έχουν αυξηθεί με παγκόσμιο ρυθμό των 0.04 και $0.03^{\circ}\text{C}/\text{δεκαετία}$, αντιστοίχως. Αυτό είναι περίπου $0.12^{\circ}\text{C}/\text{δεκαετία}$ λιγότερο από τον ρυθμό της αύξησης της θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια από το 1979. Η διαφορά στο ρυθμό της θέρμανσης οφείλεται κατά 50% στις διαφορές της 'χωρικής' κάλυψης και στις φυσικές επιδράσεις των ηφαιστείων και της ENSO. Στην τροπόσφαιρα, οι δορυφόροι και τα 'μετεωρολογικά' μπαλόνια καταγράφουν συνεχώς μια ψύξη. Ο ταχύτερος ρυθμός υποχώρησης των ορεινών παγετώνων στους τροπικούς τα τελευταία 20 έτη, παραμένει ανεξήγητος, παρόλο που μερικοί παγετώνες μπορεί να αντιδρούν ακόμη στη θέρμανση που συνέβη περίπου το 1976 έως το 1981.

2.

Είναι η πρόσφατη θέρμανση ασυνήθιστη;

Γενικά

Για να καθοριστεί πόσο ασυνήθιστη είναι η θέρμανση του 20^{ου} αιώνα, είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί στο γενικό πλαίσιο της μακράς περιόδου κλιματικής μεταβλητότητας. Εξαιτίας των λίγων καταγραφών από όργανα, ειδικά, πριν από τον 19^ο αιώνα, οι εκτιμήσεις της παγκόσμιας κλιματικής μεταβλητότητας κατά τους τελευταίους αιώνες πρέπει συχνά να βασίζονται σε έμμεσους 'proxy' δείκτες. Τα 'proxy' δεδομένα μπορούν να θεωρηθούν παγκόσμιας κλίμακας δείγματα των κλιματικών μεταβολών των διαφορετικών αιώνων στο παρελθόν, δίνοντας τη δυνατότητα να αναλυθούν μεγάλης κλίμακας μοντέλα κλιματικών μεταβολών πριν τη περίοδο της χρήσης οργάνων, με πολλούς σημαντικούς προσδιορισμούς και αβεβαιότητες.

Η SAR (IPCC WGI(Working Group I)- Δεύτερη Έκθεση Αξιολόγησης) απέδειξε τη κλιματική μεταβολή στο παρελθόν, σε χρονοσειρές αιώνων έως χιλιετίες. Κατέληξε στο ότι οι θερινές θερμοκρασίες στο Β.Ημισφαίριο κατά τις πρόσφατες δεκαετίες είναι οι θερμότερες για τουλάχιστον έξι αιώνες.

Μέχρι τότε, ένα πλήθος μελετών, βασιζόμενες σε παλαιοκλιματικές πληροφορίες, έχουν επιτρέψει πιο αποφασιστικά συμπεράσματα σχετικά με χωρικά και χρονικά μοντέλα κλιματικών μεταβολών στους προηγούμενους αιώνες. Επιπλέον, οι τελευταίες μελέτες πάνω σε πολλαπλά-'proxy' δεδομένα είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για περιγραφή παγκόσμιων ή ημισφαιρικών μοντέλων κλιματικής μεταβλητότητας προηγούμενων αιώνων.

Η θερμοκρασία τα τελευταία 1000 έτη

Τα έτη αυτά είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό χρονικό πλαίσιο για να προσεγγίσουμε τη φυσική μεταβλητότητα του κλίματος για την ανακάλυψη της κλιματικής μεταβολής.

‘Proxy’ παλαιοκλιματικοί δείκτες

Ένας ‘proxy’ κλιματικός δείκτης είναι μια τοπική καταγραφή που ερμηνεύεται χρησιμοποιώντας φυσικές ή βιοφυσικές αρχές για να αναπαριστά κάποιο συνδυασμό κλιματικά σχετιζόμενων μεταβολών μέσα στο χρόνο. Οι σημαντικότεροι ‘proxy’ δείκτες, όπως:

- οι δακτύλιοι δέντρων
- τα κοράλλια
- οι πυρήνες πάγου
- τα (οριζόντια) λιμναία ή θαλάσσια ιζήματα

μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δώσουν αναλυτικές πληροφορίες για ετήσιες ή σχεδόν ετήσιες κλιματικές μεταβολές πίσω στο χρόνο. Άλλες ‘proxy’ πληροφορίες (καταγραφές, π.χ., από γεωτρήσεις, παγετώδεις μοραίνες, και μη-οριζόντια θαλάσσια ιζήματα) μπορούν να συμπληρώσουν αυτές τις πληροφορίες.

➤ Δακτύλιοι δέντρων

Οι καταγραφές του παλαιοκλίματος από δακτυλίους δέντρων είναι με ακρίβεια χρονολογημένες, ετήσια αναλυμένες και μπορούν να μετρούνται και να επαληθεύονται πολύ καλά. Τυπικά εκτείνονται από το παρόν έως αρκετούς αιώνες ή περισσότερο πίσω στο παρελθόν. Πρόσφατα, μελέτες προσπαθούν να αναπαραστήσουν τις ετήσιες θερμοκρασίες καθώς και τις θερμές περιόδους αρκετούς αιώνες πριν βασισμένες στο πάχος ή την πυκνότητα της ανάπτυξης των δακτυλίων. Επίσης να αναπαραστήσουν χωρικά τις μεταβολές της θερμοκρασίας στο παρελθόν και να εκτιμήσουν τις θερμοκρασιακές αλλαγές τόσο των ημισφαιρίων όσο και παγκοσμίως.

Από την άλλη, οι πληροφορίες από τους δακτυλίους των δέντρων είναι διαθέσιμες μόνο σε ηπειρωτικές περιοχές, ενώ τα κλιματικά ‘σήματα’ από το πάχος ή τη πυκνότητα των δακτυλίων αντανakλούν μια πολύπλοκη βιολογική ανταπόκριση στη κλιματική δύναμη, η οποία μπορεί να αλλάξει με τη πάροδο του χρόνου. Επίσης οι δακτύλιοι είναι ευαίσθητοι σε διάφορες πηγές μόλυνσης. Έτσι, οι ερευνητές βρίσκουν τα δεδομένα από τους δακτυλίους των

δέντρων πιο χρήσιμα όταν συμπληρώνονται από άλλους τύπους 'proxy' πληροφοριών ή σε πολλαπλές-'proxy' εκτιμήσεις αλλαγών στο παρελθόν.

➤ Κοράλλια

Τα κοράλλια αναπτύσσονται στους τροπικούς, σε σχετικά ρηχά νερά, και συχνά ζούνε για αρκετούς αιώνες. Οι παλαιοκλιματικές αναπαραστάσεις από κοράλλια γενικά βασίζονται σε γεωχημικά χαρακτηριστικά του σκελετού τους, όπως προσωρινές μεταβολές σε ίχνη στοιχείων ή σταθερά ισότοπα. Αυτές παρέχουν σπουδαίες γνώσεις της μεταβλητότητας των τροπικών και υποτροπικών ωκεανών, καθώς και της ατμόσφαιρας στο παρελθόν, με ετήσιες και εποχιακές αναλύσεις.

➤ Πυρήνες πάγου

Πυρήνες πάγου από τη Β.Γροιλανδία, τον Καναδά, τα νησιά του Β.Ατλαντικού και του Αρκτικού ωκεανού, την Ανταρκτική, αλλά και τις ορεινές περιοχές όπως οι Άλπεις, καθώς και οι μεγάλοι ορεινοί όγκοι των τροπικών και υποτροπικών περιοχών μπορούν να δώσουν πολλούς διαφορετικούς κλιματικούς δείκτες. Αυτοί οι δείκτες μπορεί να είναι

- σταθερά ισότοπα (π.χ, ^{18}O)
- το κλάσμα της τήξης του πάγου
- ο ρυθμός συσσώρευσης της βροχόπτωσης
- συγκεντρώσεις πολλών αλάτων και οξέων
- το ποσό σκόνης γύρης στην ατμόσφαιρα και
- αέρια, όπως CH_4 και CO_2 .

Πλεονεκτούν για την υψηλή τους ανάλυση και τη διαθεσιμότητά τους σε πολικές και μεγάλου υψομέτρου περιοχές, όπου άλλοι τύποι 'proxy' πληροφοριών δεν είναι διαθέσιμοι. Οι καλύτερα χρονολογημένες σειρές βασίζονται στην εποχική δειγματοληψία των πυρήνων και στη μέτρηση των εποχιακών στρωμάτων πάγου (αλλά περιέχουν και απόλυτα χρονολογικά λάθη).

➤ Λιμναία και Ωκεάνια ιζήματα

Τα ετήσια οριζόντια λιμναία ιζήματα προσφέρουν υψηλής ανάλυσης δεδομένα παλαιοπεριβαλλοντικών συνθηκών, όπου άλλοι υψηλής ανάλυσης 'ροxy' δείκτες δεν είναι διαθέσιμοι (π.χ., ξηρές ηπειρωτικές περιοχές). Παρέχουν εποχιακή έως ενδοετήσια ανάλυση κατά τους αιώνες έως χιλιετίες. Τρεις βασικές κλιματικές μεταβολές μπορεί να τα επηρεάσουν:

- 1) η θερινή θερμοκρασία,
- 2) η χειμερινή χιονόπτωση και
- 3) η βροχόπτωση.

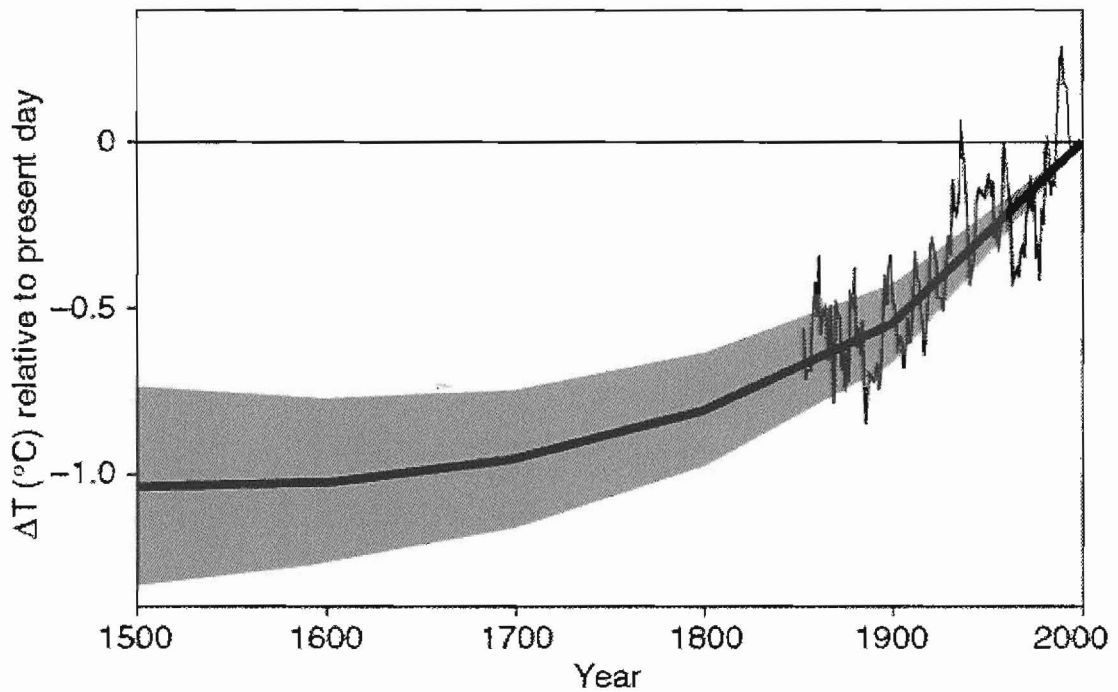
Τα ωκεάνια ιζήματα είναι επίσης χρήσιμα για τις υψηλής ανάλυσης κλιματικές αναπαραστάσεις, κι εφόσον οι ρυθμοί ιζηματογένεσης είναι επαρκώς υψηλοί, η εκατονταετής-κλίμακας μεταβλητότητα μπορεί να είναι αναλύσιμη.

➤ Μετρήσεις σε γεωτρήσεις

Από τις μετρήσεις σε γεωτρήσεις, οι μελετητές προσπαθούν να συσχετίσουν το προφίλ των θερμοκρασιών με το βάθος στην επιφάνεια της γης. Τα βάθη των προφίλ αυτών ποικίλλουν από περίπου 200 έως άνω των 1000 m, επιτρέποντας αναπαραστάσεις παλαιοθερμοκρασιών αρκετά εκατοντάδες έως χιλιάδες χρόνια πίσω. Χρειάζεται όμως σημαντική ευαισθησία για τη μετατροπή των προφίλ αυτών σε αλλαγές της θερμοκρασίας στην επιφάνεια.

Το Σχ.10 δείχνει μια αναπαράσταση της επιφανειακής παγκόσμιας θερμοκρασίας, από ένα μέσο όρο 358 ξεχωριστών περιοχών, οι περισσότερες από τις οποίες βρίσκονται στη Β.Αμερική και την Ευρασία, αλλά μερικές στην Αφρική, στη Ν.Αμερική και την Αυστραλία. Σημαντική είναι και η εκτίμηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας του επιφανειακού αέρα. Το σύνολο των αναπαραστάσεων δείχνουν ότι η μέση θερμοκρασία στην επιφάνεια της γης έχει αυξηθεί κατά περίπου 0.5°C κατά τον 20° αιώνα και ότι αυτός ήταν ο θερμότερος των τελευταίων πέντε αιώνων. Η εκτιμώμενη μέση αθροιστική αλλαγή θερμοκρασίας στην επιφάνεια του εδάφους μέχρι το 1500 είναι σχεδόν $1.0 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$. Οι αβεβαιότητες στην εκτίμηση της θερμοκρασίας (γραμμοσκιασμένη περιοχή) φαίνονται επίσης στο σχήμα.

Ενώ τα δεδομένα από τις γεωτρήσεις παρέχουν μια άμεση εκτίμηση των επιφανειακών θερμοκρασιών της γης σχετικά με τις γεωθερμικές ιδιότητες της γης κοντά στη γεώτρηση, ένας αριθμός παραγόντων, όπως η υγρασία του εδάφους και οι αλλαγές στη χρήση της γης, περιπλέκει την ερμηνεία τους.



Σχήμα 10: Αναπαράσταση της παγκόσμιας θερμοκρασίας εδάφους όπως εκτιμήθηκε από δεδομένα γεωτρήσεων, τους τελευταίους πέντε αιώνες. Η σκιερή περιοχή αναπαριστά την αβεβαιότητα των μέσων τιμών.

➤ Ιστορικά κείμενα

Ιστορικά κείμενα είναι σημαντικές πηγές πληροφοριών για το κλίμα στο παρελθόν. Παρ' όλα αυτά, η χρήση τους απαιτεί μεγάλη προσοχή, καθώς μερικά περιγράφουν μόνο ακραία γεγονότα ή είναι επιρρεπή σε λάθη χρονολόγησης. Επίσης απαιτείται προσεκτική μέτρηση και επαλήθευση έναντι των σύγχρονων δεδομένων από καταγραφές οργάνων. Δύο περιοχές με πλούσια ιστορικά τεκμήρια είναι η Ευρώπη και η Κίνα.

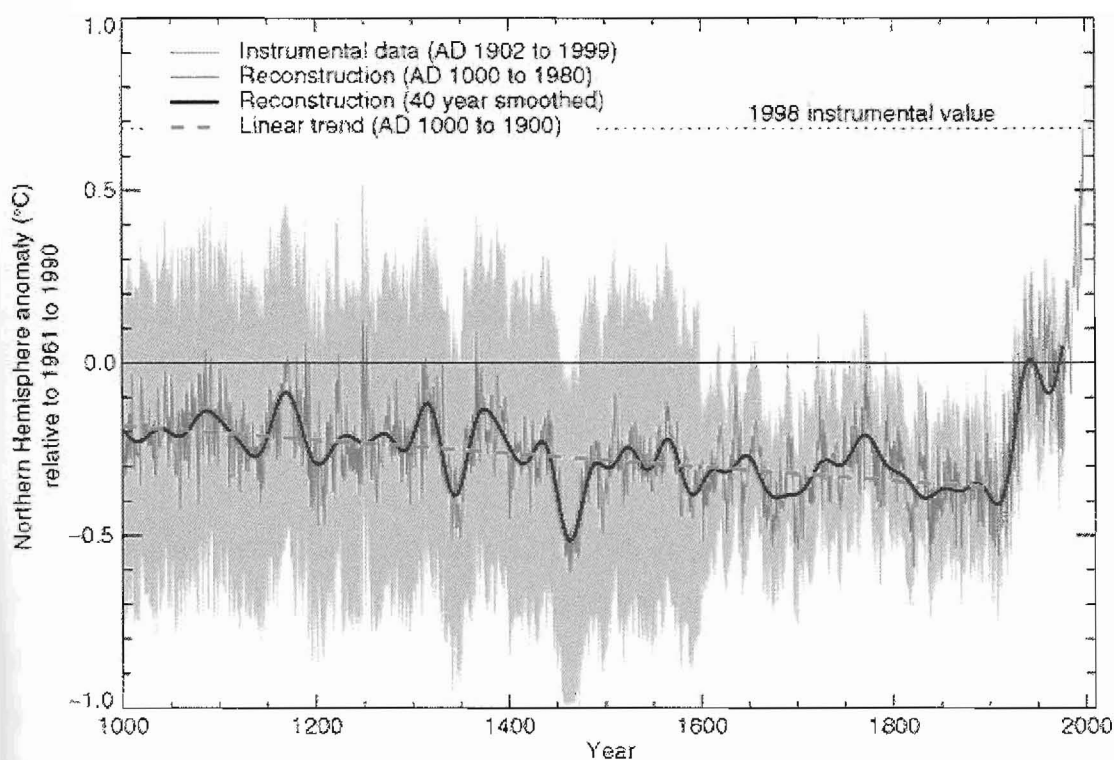
➤ **Μοραίνες ορεινών παγετώνων**

Η θέση των μοραίνων και των τιλλιτών που έμειναν ύστερα από υποχώρηση ορεινών παγετώνων δίνει πληροφορίες για την προς τα εμπρός κίνηση τους. Εξαιτίας της περίπλοκης ισορροπίας μεταξύ τοπικών αλλαγών στη τήξη και τη συσσώρευση του πάγου, και των αποτελεσμάτων στη τοπογραφία που επηρεάζουν τους παγετώνες αυτούς, είναι δύσκολο να αναπαραστηθούν οι περιοχικές αλλαγές του κλίματος με βάση την έκτασή τους. Έτσι οι παγετώδεις μοραίνες σε συνδυασμό με άλλες αποδείξεις παρέχουν αξιόπιστες πληροφορίες για περιοχικές μεταβολές θερμοκρασίας στο παρελθόν.

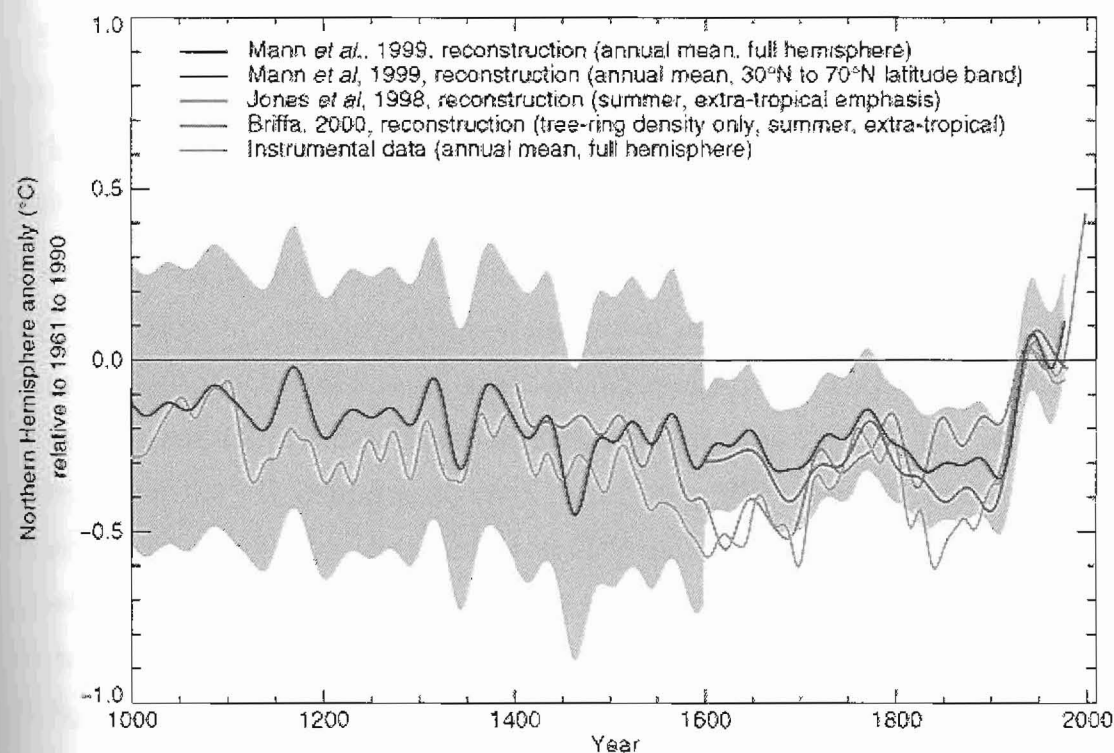
Πολλαπλή-‘rgoxy’ σύνθεση της πρόσφατης θερμοκρασιακής μεταβολής

Επιστήμονες που μέτρησαν ένα συνδυασμό χερσαίων (δακτύλιοι δέντρων, πυρήνες πάγου και ιστορικά τεκμήρια) και θαλάσσιων (κοράλλια) δεικτών, έφτιαξαν παγκόσμια μοντέλα ετήσιας επιφανειακής θερμοκρασίας για αρκετούς αιώνες πριν. Έτσι εκτίμησαν τις μέσες θερμοκρασίες του Β.Ημισφαιρίου το 1400 μ.Χ. Η εργασία αυτή επεκτάθηκε αργότερα έως το 1000 μ.Χ. (Σχ. 11). Στη σκιερή ζώνη του σχήματος φαίνονται οι αβεβαιότητες λόγω ‘αραιών’ δεδομένων. Με βάση αυτές κατέληξαν στο ότι η δεκαετία του 1990 ήταν η θερμότερη και το 1998 το θερμότερο έτος της τελευταίας δεκαετίας για το Β.Ημισφαίριο τουλάχιστον. Άλλοι κατέληξαν ότι οι μεσαιωνικές θερμοκρασίες δεν ήταν θερμότερες από αυτές στα μέσα του 20^{ου} αιώνα.

Οι ανεξάρτητες αναπαραστάσεις των πολλαπλών-‘rgoxy’ θερμοκρασιών του Β.Ημισφαιρίου συγκρίνονται στο Σχ. 12 μαζί με μια ανεξάρτητη εκτίμηση τους που βασίζεται σε δεδομένα πυκνότητας δακτυλίων δέντρων.



Σχήμα 11: Χιλιετής αναπαράσταση της θερμοκρασίας του Β.Ημισφαιρίου (NH), (μπλε) και δεδομένα από μετρήσεις οργάνων (κόκκινο) για την περίοδο 1000-1999. Επίσης, φαίνονται η πιο ομαλή καμπύλη των NH σειρών (μαύρο), η γραμμική τάση από το 1000 έως το 1850 (μωβ-διακεκομμένη) και τα δύο όρια των αποκλίσεων (γκρι περιοχή).



Σχήμα 12: Αναπαράσταση της θερμοκρασίας του Ν.Ημισφαιρίου βασισμένη σε δεδομένα δακτυλίων δέντρων σε σχέση με ετήσιες μέσες θερμοκρασίες για την περίοδο 1000-1999. Η πρόσφατη ετήσια μέση θερμοκρασία που καταγράφηκε το 1999 παρουσιάζεται για σύγκριση. Επίσης, έχουν εκτιμηθεί τα δύο όρια των αποκλίσεων (σκιαρή ζώνη). Η οριζόντια γραμμή δείχνει την περίοδο αναφοράς των μέσων τιμών από το 1961 έως το 1990.

Υπήρξε η 'Μικρή Παγετώδης Περίοδος' και η 'Μεσαιωνική Θερμή Περίοδος';

Οι όροι αυτοί έχουν χρησιμοποιηθεί για να περιγράψουν δύο παλιές κλιματικές εποχές στην Ευρώπη και σε γειτονικές περιοχές κατά τις περιόδους των 17^{ου}-19^{ου} και 11^{ου}-14^{ου} αιώνων, αντίστοιχα. Ο συγχρονισμός των περιόδων αυτών έχει προσφάτως αποδείξει ότι ποικίλλει γεωγραφικά ανά την υφήλιο.

Ορισμένοι επιστήμονες υποστηρίζουν ότι γενικά ο 15^{ος} και ο 19^{ος} αιώνας ήταν οι ψυχρότεροι αιώνες της χιλιετίας στο Β.Ημισφαίριο. Από την άλλη, εξετάζοντας για κάθε ημισφαίριο χωριστά, η 'Μικρή Παγετώδης Περίοδος' μπορεί να θεωρηθεί μόνο ως μία μέτρια ψύξη του Β.Ημισφαιρίου τη περίοδο αυτή κατά 1° C λιγότερο σε σχέση με τα τέλη του 20^{ου} αιώνα. Η Περίοδος αυτή φαίνεται να είναι πιο καθαρά εκφρασμένη στη περιοχή του Β.Ατλαντικού.

Η μέση ψύξη που παρατηρήθηκε στο Β.Ημισφαίριο τον 17^ο αιώνα έδειξε ψυχρές συνθήκες στην Ευρασία, ενώ οι ψυχρές συνθήκες του 19^{ου} αιώνα σχετίζονταν πιο πολύ με τις ψυχρές συνθήκες στη Β.Αμερική.

Όσον αφορά το Ν.Ημισφαίριο, έχει αποδειχθεί ότι οι θερινές θερμοκρασίες και οι μέσες ετήσιες συνθήκες έχουν σαφείς διαφορές από το Β.Ημισφαίριο. Η μόνη φανερή ομοιότητα είναι η πρωτοφανής θέρμανση στα τέλη του 20^{ου} αιώνα.

Από την άλλη πλευρά, η 'Μεσαιωνική Θερμή Περίοδος' φαίνεται να είναι λιγότερο διακριτή, πιο μέτρια σε γεωγραφικό μήκος και κατά κάποιο τρόπο διαφορετική στο συγχρονισμό στα δύο ημισφαίρια. Οι εκτιμήσεις της μέσης θερμοκρασίας του Β.Ημισφαιρίου δείχνουν ότι από τον 11^ο έως τον 14^ο αιώνα αυτές είναι 0.2° C θερμότερες από αυτές των 15^{ου} έως 19^{ου} αιώνα, αλλά αρκετά κάτω από αυτές στα μέσα του 20^{ου} αιώνα. Επίσης, δεν έχουν βρεθεί αποδείξεις για θέρμανση στους τροπικούς. Στη Κίνα κατά τον 12^ο και 14^ο αιώνα φαίνεται να επικρατούσε κρύο, ενώ οι περιορισμένες ενδείξεις από το Ν.Ημισφαίριο δε δείχνουν καμία απόδειξη για την Περίοδο αυτή.

Η Μεσαιωνική θέρμανση εμφανίζεται, κατά μεγάλο μέρος, να είναι περιορισμένη σε περιοχές του Β.Ατλαντικού και σε κοντινές περιοχές. Αυτό μπορεί να εμπλέκει το ρόλο της κλιματικής μεταβλητότητας που σχετίζεται με την ωκεάνια κυκλοφορία. Επιστήμονες προτείνουν θερμές μεσαιωνικές συνθήκες και ψυχρές συνθήκες τη περίοδο 17^ο-19^ο αιώνα σε περιοχές του τροπικού Β.Ατλαντικού ωκεανού. Μια άλλη καταγραφή, σε αντίθεση, δείχνει ψυχρές μεσαιωνικές και θερμές συνθήκες του ανώτερου ωκεανού τον 16^ο μέχρι τον 19^ο αιώνα. Έτσι, συμφωνούν ότι η 'Μεσαιωνική Θερμή περίοδος' και η 'Μικρή Παγετώδης Περίοδος' στη περιοχή του Ατλαντικού μπορεί να 'απεικονίζουν' σε μεγάλο βαθμό τις εκατονταετής-κλίμακας μεταβολές στη κυκλοφορία του Β.Ατλαντικού.

Ηφαιστειακές και ηλιακές επιδράσεις στις πρόσφατες καταγραφές

Πρόσφατες μελέτες που συγκρίνουν αναπαραστάσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας με τη φυσική (ηλιακή και ηφαιστειακή) ακτινοβολούμενη δύναμη, προτείνουν ότι ένας συνδυασμός από ηλιακές και ηφαιστειακές επιρροές έχουν επηρεάσει τις θερμοκρασίες (μεγάλης κλίμακας) σε παλαιότερους αιώνες. Διάφορες έρευνες δείχνουν ότι το συνδυαστικό αποτέλεσμα αυτών των επιρροών έχει συμβάλλει σε μικρό βαθμό στη θέρμανση του 20^{ου} αιώνα.

Συμπέρασμα

Μέχρι τη SAR έχουν γίνει σημαντικές πρόοδοι στις γνώσεις μας για τις μεταβολές της θερμοκρασίας κατά τη τελευταία χιλιετία. Είναι πιθανό ότι, γενικά, οι θερμοκρασίες ήταν σχετικά θερμές στο Β.Ημισφαίριο τους πρώτους αιώνες της χιλιετίας, αλλά είναι λιγότερο πιθανό να υπήρξε ταυτόχρονα και παγκοσμίως ένα διάστημα 'Μεσαιωνικής θέρμανσης', σε σχέση με τη πρόσφατη παγκόσμια θέρμανση στα τέλη του 20^{ου} αιώνα. Σαφής θέρμανση

φαίνεται να έχει περιοριστεί στην Ευρώπη και σε περιοχές γύρω από τον Β.Ατλαντικό ωκεανό. Συγκριτικά ψυχρότερες πλανητικές ή ανά ημισφαίριο συνθήκες έχουν εμφανιστεί κατά το 1400 μ.Χ. και διήρκησαν μέχρι τον 19^ο αιώνα, αλλά η μέγιστη ψύξη παρατηρείται σε διαφορετικές εποχές διαφορετικών περιοχών. Σε αντίθεση, η παγκόσμια ή η ανά ημισφαίριο θέρμανση του 20^{ου} αιώνα, είναι πιθανό να είναι η μεγαλύτερη της χιλιετίας, με τη δεκαετία του 1990 να είναι πιθανώς η θερμότερη δεκαετία και το 1998 το θερμότερο έτος στο Β.Ημισφαίριο. Ανεξάρτητες εκτιμήσεις της θερμοκρασίας τους 5 τελευταίους αιώνες από τα δεδομένα γεωτρήσεων επιβεβαιώνουν το συμπέρασμα ότι η θέρμανση στα τέλη του 20^{ου} αιώνα είναι ανώμαλη. Στο Ν.Ημισφαίριο, λόγω έλλειψης δεδομένων λιγότερα είναι γνωστά για τους μέσους ετήσιους όρους της θερμοκρασίας και για τις συνθήκες που επικρατούσαν στο μεγαλύτερο μέρος του πριν το 1861.

3.

Πόσο απότομη ήταν η μεταβολή του κλίματος στο μακρινό παρελθόν;

Γενικά

Οι επιστήμονες, για τις κλιματικές μεταβολές της τελευταίας μεσοπαγετώδους περιόδου, περίπου 120000 χρόνια πριν, κατέληξαν ότι:

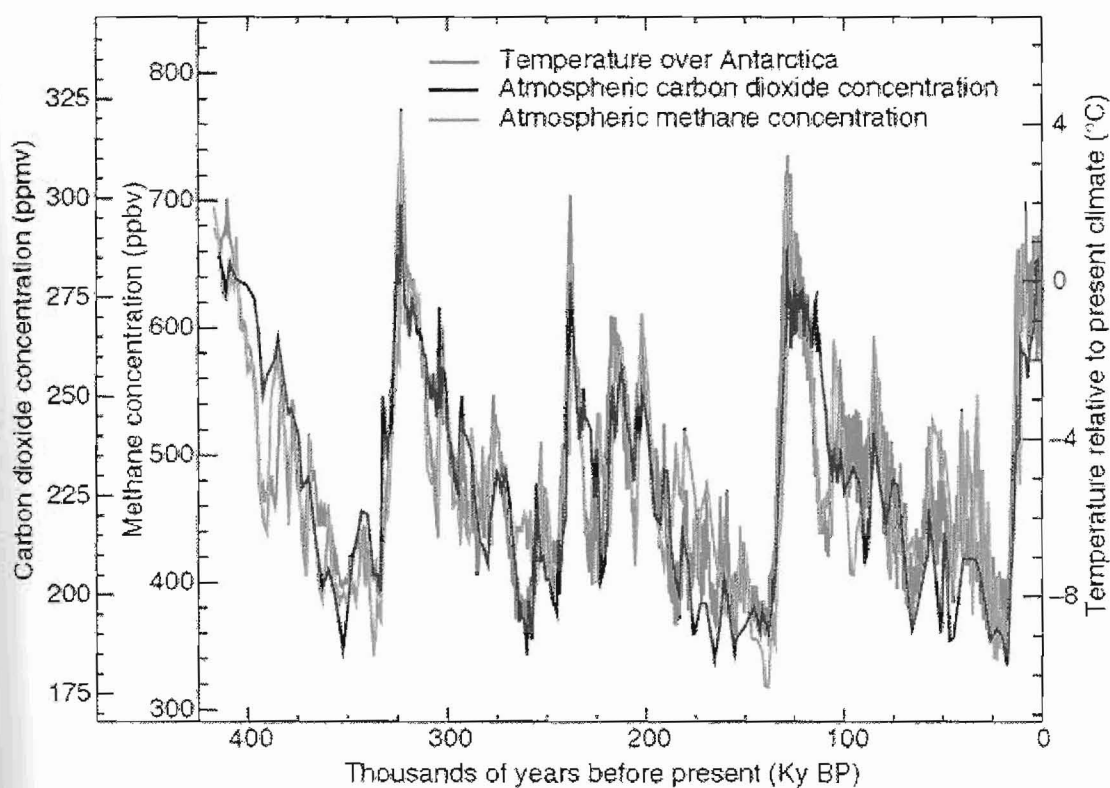
- μεγάλες και απότομες μεταβολές συνέβησαν στο κλίμα κατά τη τελευταία Παγετώδη περίοδο και κατά τη μετάβαση προς το Ολόκαινο,
- οι θερμοκρασίες ήταν λιγότερο μεταβλητές τη τελευταία περίοδο, και
- οι προτάσεις ότι οι απότομες αυτές μεταβολές μπορεί επίσης να έχουν συμβεί κατά τη τελευταία μεσοπαγετώδη, ζητούν επιβεβαίωση.

Αυτές οι μεταβολές είναι τώρα καλύτερα τεκμηριωμένες από πληροφορίες που προήλθαν από πυρήνες πάγου, ιζήματα βαθιάς θάλασσας και ηπειρωτικές καταγραφές.

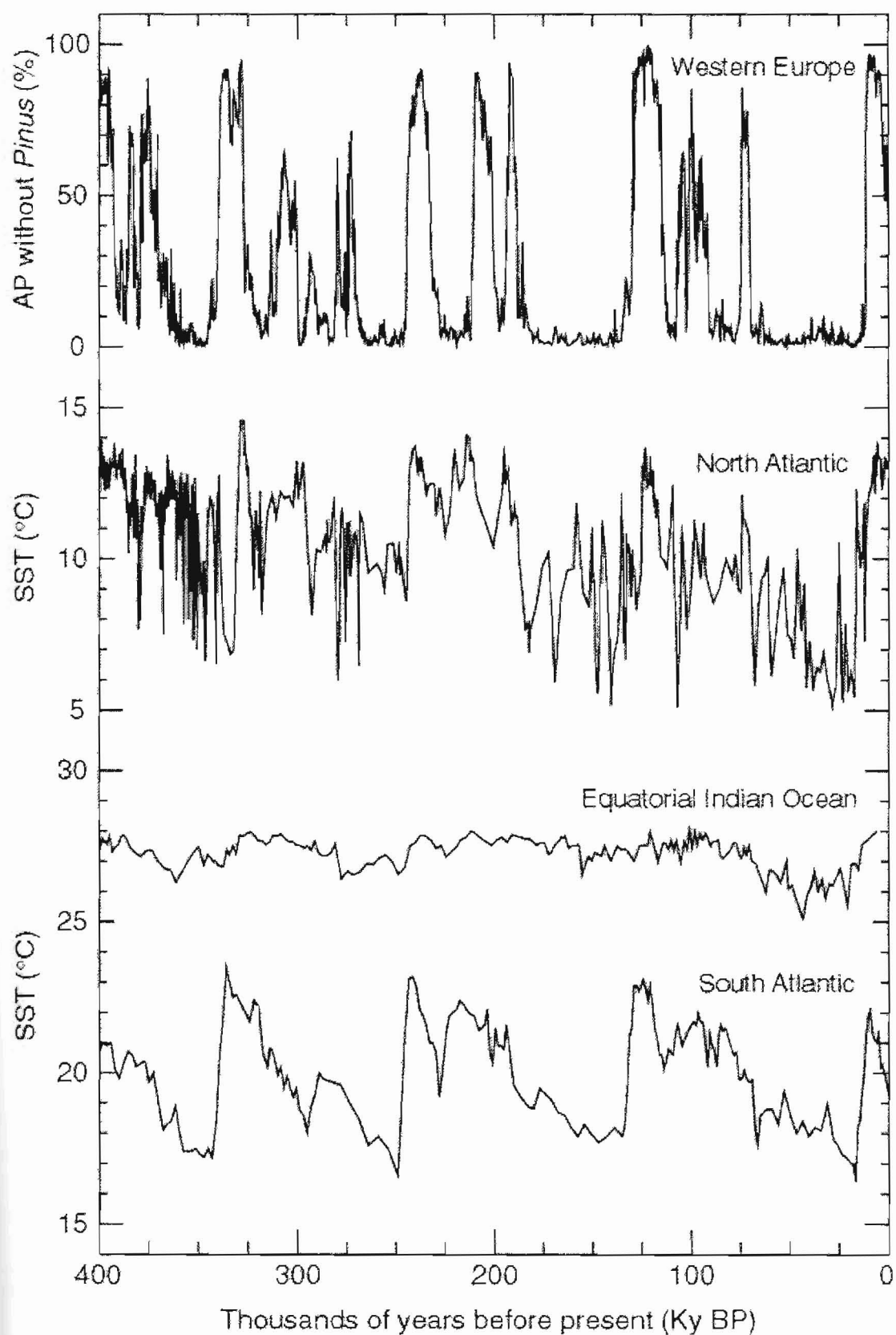
Αξίζει να αναφερθεί εν συντομία η πρόοδος που έγινε πάνω σε δύο απόψεις για τη σημασία της καταγραφής του παλαιοκλίματος για την κατανόηση του μελλοντικού κλίματος. Η πρώτη έχει να κάνει με τη σχέση μεταξύ σύγχρονων και παλιών 'γήινων' δεδομένων και επιφανειακών θαλάσσιων θερμοκρασιών (SSTs-Sea Surface Temperatures) περίπου κατά το τελευταίο Μέγιστο των Παγετώνων (20000 χρ. πριν). Νέα αποτελέσματα ερευνών συμφωνούν σε μια τροπική ψύξη περίπου των 3° C. Η δεύτερη αφορά καταγραφές θερμοκηπικών αερίων (CO₂ και CH₄), τα οποία έχουν τώρα 'επεκταθεί' σημαντικά λόγω της πρόσφατης ολοκλήρωσης της διάλυσης του πυρήνα πάγου Vostok στη κεντρική Ανατολική Ανταρκτική. Η ισχυρή σχέση των CO₂ και CH₄ και του Ανταρκτικού κλίματος, έχει επιβεβαιωθεί σημαντικά σε 4 κλιματικούς κύκλους, με διάρκεια περίπου 420000 χρόνια (Σχ. 13). Τα πρόσφατα ημερήσια επίπεδα των δύο αυτών αερίων είναι πρωτοφανή όλο

αυτό το διάστημα.

Επίσης, τώρα υπάρχει καλύτερη γνώση της μεταβλητότητας του κλίματος στους τελευταίους κλιματικούς κύκλους όπως έχει διευκρινιστεί από καταγραφές των παλαιοκλιματικών θερμοκρασιών 400000 χρόνων πριν (Σχ. 14). Το πλάτος της παγετώδους-μεσοπαγετώδους μεταβολής της θερμοκρασίας ήταν χαμηλότερο στις τροπικές και ισημερινές περιοχές (καμπύλη c) απ' ότι στα μέσα και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη (υπόλοιπες καμπύλες). Κατά τη διάρκεια παγετωδών περιόδων, το κλίμα του Β.Ατλαντικού και των γειτονικών περιοχών (καμπύλες a,b) ήταν πιο μεταβλητό απ' ότι στο Ν.Ημισφαίριο.



Σχήμα 13: Αποκλίσεις της θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων των CH₄ και CO₂ όπως μετρήθηκαν σε παγιδευμένο αέρα πυρήνων πάγου της Ανταρκτικής.

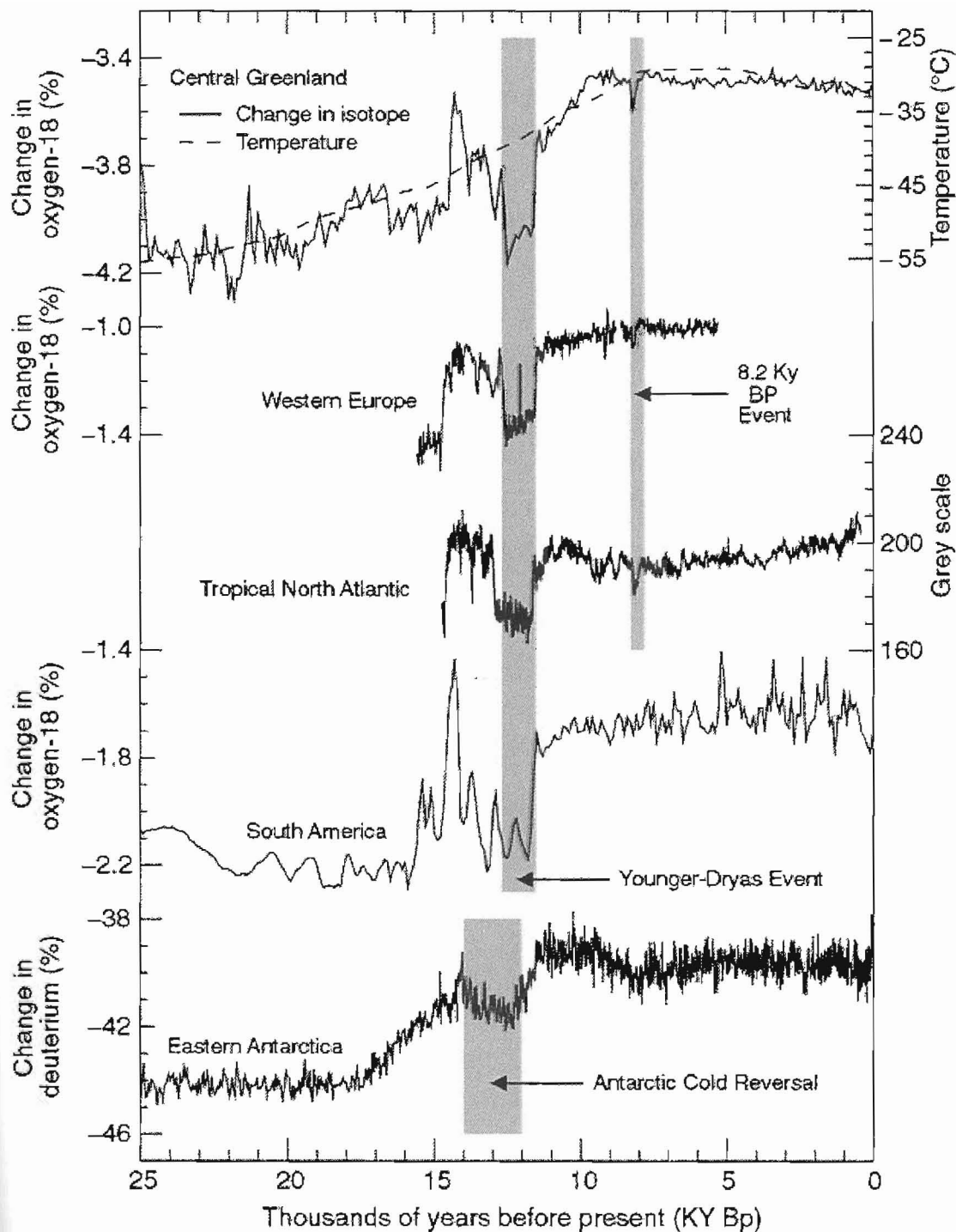


Σχήμα 14: Επεξήγηση της μεταβλητότητας της θερμοκρασίας από χρονοσειρές τα τελευταία 400.000 έτη. Οι άνω χρονοσειρές περιγράφουν το ποσοστό της γύρης. Όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό, τόσο πιο θερμό είναι το κλίμα.

Πόσο σταθερό ήταν το κλίμα στο Ολόκαινο;

Πυρήνες πάγου από την Κ.Γροιλανδία και καταγραφές ισοτόπων σε Ευρωπαϊκές λίμνες δείχνουν σχετικές θερμοκρασιακές μεταβολές στο Ολόκαινο με 50% υψηλότερο πλάτος στη Γροιλανδία από την Ευρώπη (Σχ. 15). Χαρακτηριστικά και στις δύο καταγραφές, πριν 8200 χρόνια περίπου, οι μέσες ετήσιες θερμοκρασίες 'έπεσαν' περίπου 2°C στη Κ.Ευρώπη. Περαιτέρω, οι απότομες κλιματικές μεταβολές στις χιλιετίες χρονοσειρές του Ολοκαίνου έχουν τεκμηριωθεί με βάση τα δεδομένα από καταγραφές της γύρης και του επιπέδου των λιμνών στην Ευρώπη, στη Β.Αφρική, στη Β.Αμερική και στην Αυστραλία. Το Άνω Ολόκαινο ήταν γενικά θερμότερο από τον 20^ο αιώνα, αλλά η περίοδος της μέγιστης θέρμανσης εξαρτάται από την περιοχή που εξετάζεται.

Δηλαδή, το Ολόκαινο δείχνει μεγάλης διάρκειας τάσεις καθώς και χιλιετούς-κλίμακας μεταβλητότητα, παρόλο που το πλάτος της μεταβλητότητας είναι μικρό σε σύγκριση με τα χαρακτηριστικά των Παγετωδών εποχών. Η χρονολόγηση της Ολοκαινικής μέγιστης θέρμανσης φαίνεται να διαφέρει ανά τον πλανήτη. Δηλαδή, μεταβάλλεται από το νότο προς το βορά, με τα νότια γεωγραφικά πλάτη να δείχνουν τη μέγιστη θέρμανση λίγες χιλιετίες πριν τις περιοχές του Β.Ημισφαιρίου. Τέλος, το Ολόκαινο φαίνεται να είναι η μεγαλύτερη θερμή 'σταθερή' περίοδος τα τελευταία 400000 χρόνια με προφανείς επιπτώσεις στην ανάπτυξη του πολιτισμού.



Σχήμα 15: Καταγραφές της κλιματικής μεταβλητότητας το Ολόκαινο και η τελευταία κλιματική μεταβολή (μαζί με το επεισόδιο στα 8200 π.Χ). Η σκιερές περιοχές δείχνουν το επεισόδιο αυτό, το Younger Dryas γεγονός και την Ανταρκτική Ψυχρή Αντιστροφή. Η γκρι κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε σε καταγραφή του Τροπικού Β.Ατλαντικού είναι ένα μέτρο της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας.

Πόσο γρήγορα μεταβλήθηκε το κλίμα κατά τη Παγετώδη Περίοδο;

Η πιο έντονη εκδήλωση της κλιματικής μεταβολής στις γεωλογικές καταγραφές είναι η μετάβαση από 'πλήρεις' παγετώδεις σε 'πλήρεις' μεσοπαγετώδεις συνθήκες. Στον πιο πρόσφατο κύκλο παγετώνων, επικρατούν συνθήκες πλήρους ανεπτυγμένου παγετώνα, από 25 έως 18 χιλιάδες χρόνια πριν. Θερμοκρασίες παρόμοιες με τις σημερινές υπήρχαν περίπου 10 χιλιάδες χρόνια πριν. Όμως, η θέρμανση δεν ήταν συνεχής. Η 'απόψυξη' έγινε σε δύο κύρια στάδια, με μία επιστροφή σε ψυχρές συνθήκες (Younger Dryas), ή τουλάχιστον μία παύση σε αυτήν.

Η καταγραφή του πυρήνα πάγου στην Κ.Γροιλανδία δείχνει τα επεισόδια μιας πολύ απότομης αλλαγής. Η επιστροφή στις ψυχρές συνθήκες, από την μεσοπαγετώδη θέρμανση που συνέβη 13000 έτη πριν, έγινε μέσα σε λίγες δεκαετίες ή και λιγότερο. Η φάση της θέρμανσης, που συνέβη 11500 χρόνια περίπου πριν, ήταν επίσης πολύ απότομη και οι θερμοκρασίες της περιοχής αυξήθηκαν κατά 7 °C ή περισσότερο μέσα σε λίγες δεκαετίες. Τεράστιες περιοχές της γης βίωσαν σχεδόν σύγχρονες μεταβολές για περιόδους 0-30 ετών.

Η έναρξη της, κατά την 'απόψυξη', θέρμανσης περίπου 14500 χρόνια πριν ήταν επίσης πολύ απότομη. Ταυτόχρονα, παρατηρήθηκαν μεγάλες αλλαγές στη βλάστηση στην Ευρώπη και στη Β.Αμερική και μία άνοδος του επιπέδου των Αφρικανικών λιμνών. Υπήρξε ακόμη μια σαφής θέρμανση του Β.Ατλαντικού και Β.Ειρηνικού ωκεανού. Στο τέλος των ψυχρών συνθηκών (Younger Dryas), συνέβη μια πολύ απότομη θέρμανση με ρυθμούς 10° C/50 έτη σε μεγάλο μέρος του Β.Ημισφαιρίου.

Οι μετρήσεις των ισοτόπων O₂ σε πυρήνες πάγου στη Γροιλανδία αποδεικνύουν ότι μια ακολουθία σειρών απότομης θέρμανσης και ψυχρής ταλάντωσης, που λέγονται Dansgaard-Oeschger γεγονότα, τονίζουν την τελευταία παγετώδη περίοδο (Σχ. 14). Σχετικές μεταβολές της θερμοκρασίας μπορεί να είναι υψηλές έως 16 °C. Επίσης, κάθε 7000-10000 χρόνια λάμβαναν χώρα και τα γεγονότα Heinrich, κατά τη ψύξη της επιφάνειας της θάλασσας με τη μορφή σύντομων, αλλά εξαιρετικά μεγάλων, 'εκροών' παγόβουνων από τα εκτεταμένα στρώματα πάγου στην Ευρώπη. Κάθε τάση

ψύξης έληξε με μια πολύ απότομη θέρμανση και μια τεράστια 'έκρηξη' παγόβουνων.

Αυτά τα απότομα κλιματικά γεγονότα της τελευταίας παγετώδους περιόδου, είναι καλύτερα τεκμηριωμένα για την Γροιλανδία και τον Β.Ατλαντικό, με ομαλά παρόμοια γεγονότα στην Ανταρκτική. Μεταβολές στις συγκεντρώσεις των ισοτόπων δείχνουν τις σχέσεις ανάμεσα στο κλίμα του Βορείου και του Ν.Ημισφαιρίου αυτή τη περίοδο.

Πόσο σταθερή ήταν η προηγούμενη Μεσοπαγετώδης Περίοδος;

Η εκτίμηση της σημερινής ημερήσιας μεταβλητότητας του κλίματος ωφελείται στη σύγκριση συνθηκών στις μεσοπαγετώδεις περιόδους. Η πιο πρόσφατη μεσοπαγετώδης περίοδος άρχισε περίπου 130000 χρόνια πριν και διήρκησε μέχρι 71000 χρόνια πριν.

Υψηλές χειμερινές θερμοκρασίες επικρατούσαν 3500 έως 4000 χρόνια πριν, μετά την 'απόψυξη', αλλά στη συνέχεια μειώθηκαν κατά περίπου 6-10° C, συνοδευόμενες από μια μείωση στις βροχοπτώσεις. Στην Ανταρκτική η τελευταία μεσοπαγετώδης περίοδος σημαδεύτηκε επίσης από μία σύντομη θερμή περίοδο, που ακολουθήθηκε από ένα ελαφρά ψυχρό διάστημα. Γενικά, η περίοδος αυτή φαίνεται να είναι, τουλάχιστον κατά το πρώτο μέρος της, θερμότερη από το πρόσφατο κλίμα κατά τουλάχιστον 2° C.

Συμπέρασμα

Πρόσφατα έχει αποδειχθεί ότι πολύ απότομες και μεγάλες μεταβολές, σχετικά με την κυκλοφορία του ωκεανού και της ατμόσφαιρας, συνέβησαν κατά τη διάρκεια της τελευταίας παγετώδους περιόδου και της τελευταίας 'απόψυξης', ειδικά στα υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη του Β.Ημισφαιρίου. Για τις θερμές φάσεις υπάρχουν ενδείξεις από παγκόσμια και σύγχρονα γεγονότα. Παρ'όλα αυτά, με το Μέγιστο θέρμανσης του Ολοκαίνου και το τελευταίο Παγετώδες Μέγιστο, αυτές οι μεταβολές φαίνεται να έχουν συμβεί ασύγχρονα μεταξύ του Β.Ημισφαιρίου και κατά ένα μέρος του Νοτίου. Στο Ολόκαινο, μικρότερες αλλά τοπικά μεγάλες κλιματικές μεταβολές συνέβησαν

σποραδικά. Παρόμοιες μεταβολές μπορεί να έγιναν και στη τελευταία μεσοπαγετώδη περίοδο.

Πως μεταβλήθηκε η βροχόπτωση και η ατμοσφαιρική υγρασία;

Γενικά

Οι αυξανόμενες παγκόσμιες επιφανειακές θερμοκρασίες είναι πολύ πιθανό να οδήγησαν στο να μεταβληθεί η βροχόπτωση και η επιφανειακή υγρασία, λόγω της μεταβολής της κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας, σε έναν πιο ενεργό υδρολογικό κύκλο, καθώς και σε αυξήσεις στη χωρητικότητα του νερού της ατμόσφαιρας. Η μέτρηση και η ανάλυση της βροχόπτωσης γίνονται με δυσκολία όταν συνοδεύονται από φυσικά φαινόμενα, όπως ο άνεμος, αλλά και από τη χρήση διαφορετικών οργάνων και τεχνικών. Οι τιμές των οργάνων είναι σημαντικά μικρότερες σε θερμότερα, με ασθενή άνεμο και ισχυρή βροχόπτωση κλίματα.

Μεταβολές σε βροχόπτωση και σχετικές μεταβολές

I. Ξηρά

Γενικά, οι βροχοπτώσεις στη ξηρά έχουν αυξηθεί, παγκοσμίως, περίπου 2% από την αρχή του 20^{ου} αιώνα. Δεδομένα από 20000 σταθμούς που συμβάλλουν στις μεταβολές από το 1900 φαίνονται στο Σχ. 16.

➤ Μέσα και Υψηλά γεωγραφικά πλάτη

Κατά τον 20^ο αιώνα, η ετήσια, κατά ζώνες, μέση βροχόπτωση αυξήθηκε κατά 7-12% για τις ζώνες 30° B-85° B και κατά 2% περίπου για τις 0° N-55° N (Σχ. 16(ii)).

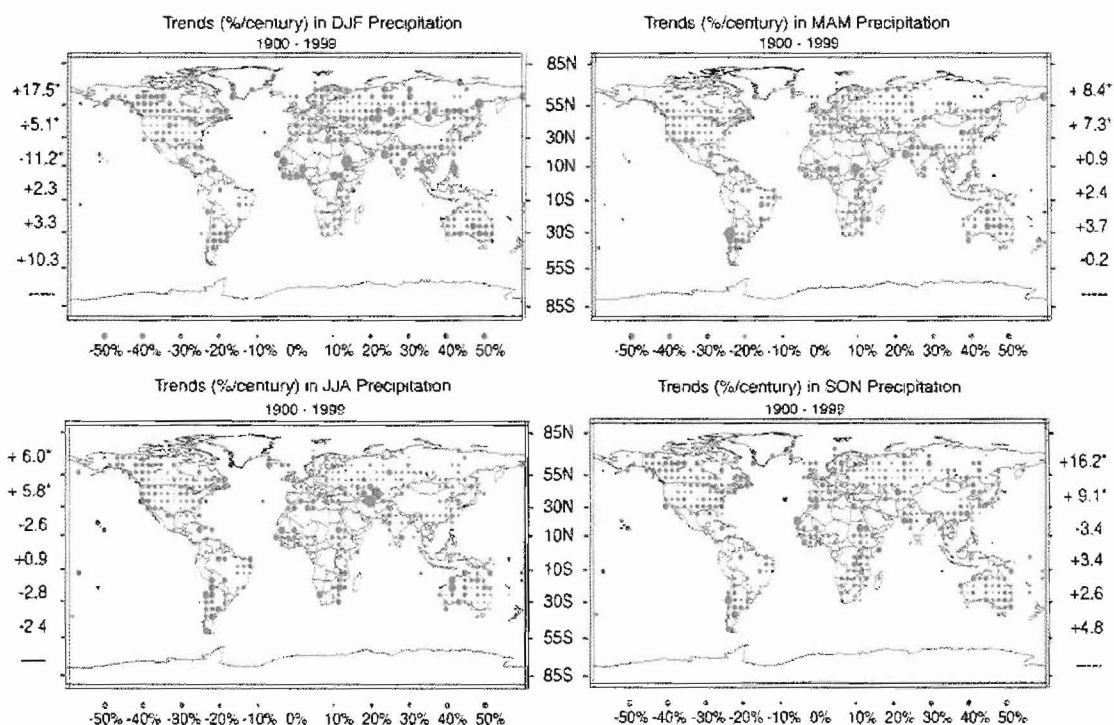
Το Σχ.16(i) δείχνει αυξανόμενη βροχόπτωση σε μέσα και υψηλά γεωγραφικά πλάτη του Β.Ημισφαιρίου, ειδικά το φθινόπωρο και το χειμώνα, αλλά οι αυξήσεις αυτές ποικίλλουν χωρικά και χρονικά. Για παράδειγμα, η βροχόπτωση στις ΗΠΑ έχει αυξηθεί κατά 5-10% από το 1900 (Σχ. 16(ii)), αλλά έχει διακοπές από πολυετείς ανωμαλίες, όπως τα έτη ξηρασίας της

δεκαετίας του 1930 και στις αρχές της δεκαετίας του 1950. Η αύξηση είναι πιο έντονη κατά τις θερμές περιόδους. Επίσης, έχουν σημειωθεί αυξήσεις στη βροχόπτωση στα τέλη του 20^{ου} αιώνα στη Β.Ευρώπη, με μια γενική μείωση νότια προς τη Μεσόγειο (Σχ. 16(i)). Οι ξηρές χειμερινές συνθήκες στη Β.Ευρώπη και τη Μεσόγειο, και οι υγρότερες από το κανονικό συνθήκες σε πολλά μέρη της Β.Ευρώπης και της Σκανδιναβίας συνδέονται με τις ισχυρά θετικές τιμές της NAO (Κύμανση Β.Ατλαντικού), με περισσότερες αντικυκλωνικές συνθήκες στη Ν.Ευρώπη και με ισχυρότερους ανέμους δυτικής συνιστώσας στη Β.Ευρώπη.

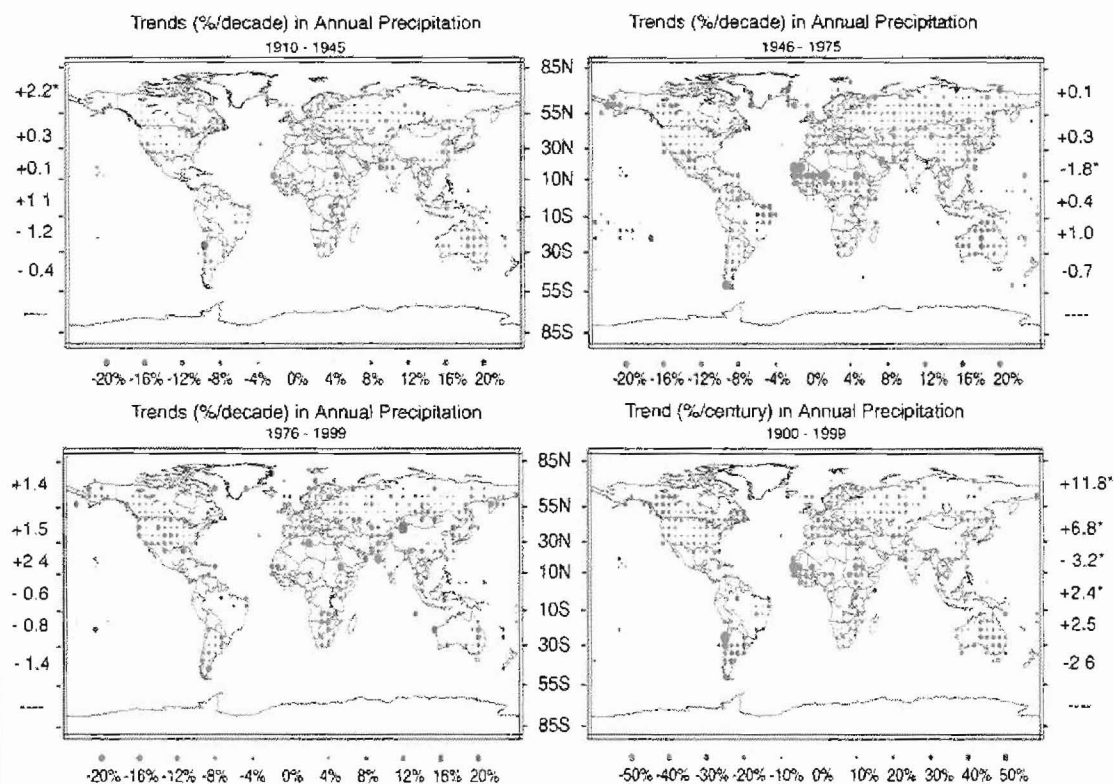
➤ Τροπικοί και υποτροπικοί

Η αύξηση βροχόπτωσης στα μέσα και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη έρχεται σε αντίθεση με τις μειώσεις στους βόρειους τροπικούς που ήταν κατά μεγάλο μέρος υπεύθυνες για τη δεκαετή μείωση της βροχόπτωσης στη ξηρά, σε παγκόσμιο επίπεδο, μεταξύ των μέσων των δεκαετιών 1980 έως 1990.

Δεδομένα streamflow από μεγάλους ποταμούς της ΝΑ Ν.Αμερικής για τη περίοδο 1901-1995 δείχνουν ότι οι streamflow έχουν αυξηθεί από τα μέσα της δεκαετίας του 1960 και συνοδεύτηκαν από μια μείωση στο γεωγραφικό μήκος του εποχιακού κύκλου των ποταμών. Το Σχ. 16(ii) δείχνει τις αυξήσεις στη βροχόπτωση από το 1900 κατά μήκος των ανατολικών παράκτιων περιοχών της Ν.Αμερικής, με λιγότερες αυξήσεις από το 1976.



Σχήμα 16 (i): Τάσεις από το 1900 έως το 1999 για τις τέσσερις εποχές. Οι τάσεις της βροχόπτωσης αντιπροσωπεύονται από το σύνολο των κύκλων. Οι πράσινοι κύκλοι δείχνουν την αύξηση ενώ οι καφέ τη μείωση των τάσεων.



Σχήμα 16 (ii): Όπως στο (i), χωρίς τις ετήσιες τάσεις για τις τρεις περιόδους των μεταβαλλόμενων ρυθμών της παγκόσμιας θερμοκρασίας.

II. Παλαιοξηρασία

‘Proxy’ παλαιοκλιματολογικές ενδείξεις (δακτύλιοι δέντρων, λιμναία ιζήματα, γύρη) έχουν χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί η μεταβλητότητα της ξηρασίας, καθώς και των τύπων βροχόπτωσης τους παλαιότερους αιώνες. Το μεγαλύτερο μέρος από πρόσφατες έρευνες έχουν δώσει έμφαση στη Β.Αμερική, όπου ο ρυθμός μεταβλητότητας της εποχιακής ξηρασίας που παρατηρήθηκε κατά τον 20^ο αιώνα, μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικός του μεγαλύτερου ρυθμού στο παρελθόν. Ορισμένοι επιστήμονες εξασφαλίζουν ενδείξεις από πολύ-δεκαετείς μεγάλες ξηρασίες στη δυτική Μεγάλη Λεκάνη της Β.Αμερικής τον 10^ο έως τον 14^ο αιώνα. Ακόμη, ο 20^{ος} ξεχωρίζει ως ο αιώνας με την εντονότερη ξηρασία των τελευταίων δεκαετιών. Άλλοι συμφωνούν ότι η πρόσφατη εαρινή υγρασία στη ΒΔ Αμερική είναι η μεγαλύτερη των τελευταίων 1000 ετών.

III. Ωκεανοί

Η ισχυρή χωρική μεταβλητότητα στη βροχόπτωση απαιτεί τη χρήση εκτιμήσεων που βασίζονται σε δορυφορικές παρατηρήσεις πολλών περιοχών. Έτσι τα δορυφορικά δεδομένα είναι απαραίτητα για τα συμπεράσματα των παγκόσμιων μεταβολών της βροχόπτωσης, καθώς οι ωκεανοί καλύπτουν το 70% της παγκόσμιας επιφάνειας. Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του ‘70 καμία καταγραφή είναι επαρκώς μεγάλη ώστε να επιτρέψει τις εκτιμήσεις των μεταβολών στους αιώνες. Οι πρώτες δορυφορικές μετρήσεις άρχισαν το 1987. Η περίοδος όμως από το 1987 είναι πολύ σύντομη για να καθορίσουμε τις δεκαετείς-κλίμακας αποκλίσεις.

Υδρατμοί

Πρόσφατες έρευνες τείνουν στο να επιβεβαιώσουν τις αυξήσεις της υγρασίας της κατώτερης τροπόσφαιρας που καταγράφονται στη SAR. Επιπλέον, νέες αναλύσεις δείχνουν ανοδικές τάσεις της υγρασίας κοντά στην επιφάνεια. Οι γνώσεις σχετικά με τις μεταβολές των υδρατμών στα ανώτερα επίπεδα της τροπόσφαιρας και στα κατώτερα επίπεδα της στρατόσφαιρας, είναι πολύ σημαντικές επειδή οι ισχυρές μετατροπές στη δύναμη ακτινοβολίας μπορεί να προκύψουν από τις μικρές απόλυτες μεταβολές τους σε αυτά τα

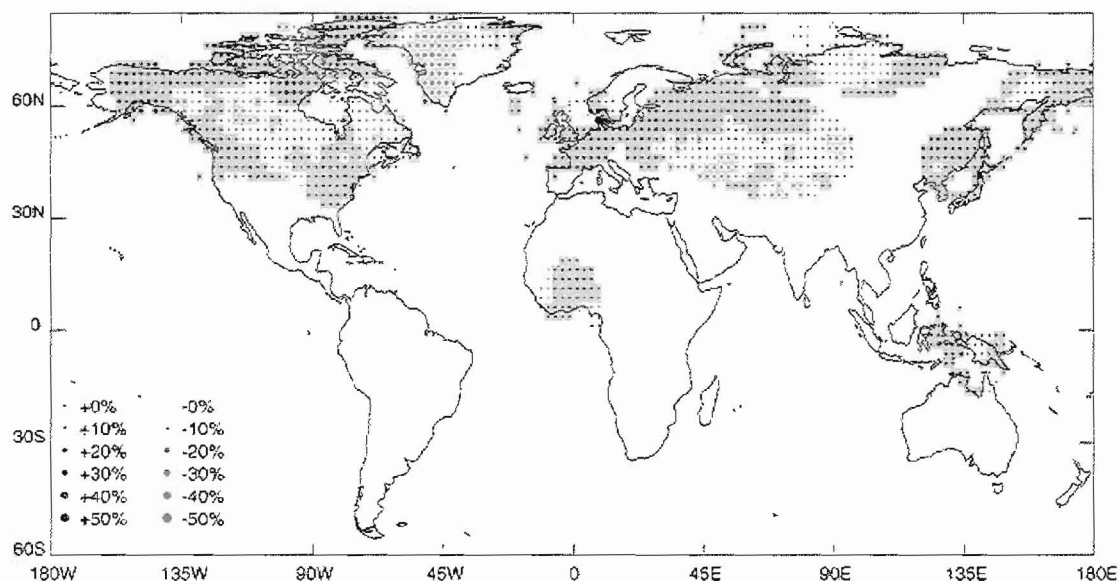
επίπεδα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τάση των υδρατμών και η ειδική υγρασία αυξάνουν μη-γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας.

➤ Υδρατμοί στην επιφάνεια

Η τάση των υδρατμών, το σημείο δρόσου ή η σχετική υγρασία στην επιφάνεια είναι τυπικά μετρήσιμα με τη χρήση υγρών και ξηρών θερμομέτρων σε οθόνες θερμομέτρων σε κλιματικούς σταθμούς. Γενικά, διαπιστώθηκαν μικρές αυξήσεις στην επιφανειακή τάση των υδρατμών στο μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης, από το 1961 έως το 1990. Οι ετήσιες τάσεις είναι 'αδύναμες'. Στατιστικά οι σημαντικές αλλαγές περιορίζονται σε αυξήσεις των περίπου 0.5-1.5 hPa (σχετικές έως μέσες τιμές των 12-15 hPa) στη νότια και ανατολική περιοχή της Μεσογείου (με τη μεγαλύτερη αύξηση το καλοκαίρι) και σε μειώσεις περίπου 0.5 hPa πάνω από περιοχές της Τουρκίας (κυρίως την άνοιξη).

Οι τάσεις της ειδικής υγρασίας στις ΗΠΑ ήταν εξαιρετικά θετικές για τη περίοδο 1961-1995, με τις μεγαλύτερες και στατιστικά πιο σημαντικές να καταγράφονται την άνοιξη και το καλοκαίρι. Νυχτερινές τέτοιες τάσεις ήταν γενικά εντονότερες απ' ό,τι την ημέρα. Η σχετική υγρασία έδειξε μικρότερες αυξήσεις, ειδικά το χειμώνα και την άνοιξη. Η ειδική υγρασία και οι περιορισμένες τάσεις του σημείου δρόσου είναι γενικά σύμφωνες με τις τάσεις της θερμοκρασίας. Αποδείχτηκε ότι ο ημιετήσιος κύκλος του σημείου δρόσου στη Β.Αμερική αλλάζει, έχοντας μια σχετική μείωση αργά το απόγευμα και μια μικρή αύξηση το καλοκαίρι.

Πρόσφατα, οι επιστήμονες εκτίμησαν τις γραμμικές τάσεις των ετήσιων και εποχιακών τιμών της επιφανειακής τάσης των υδρατμών πάνω από τη ξηρά, με τη χρήση υπολογισμένων μηνιαίων δεδομένων από κλιματικούς σταθμούς. Το Σχ.17 δείχνει τις τάσεις για τα 21 έτη από το 1975 μέχρι το 1995. Από το Ν.Ημισφαίριο έχουν αναλυθεί λίγα δεδομένα, ενώ στο Β.Ημισφαίριο έχουν γίνει ευρέως σημαντικές αυξήσεις στην ετήσια μέση τάση υδρατμών.

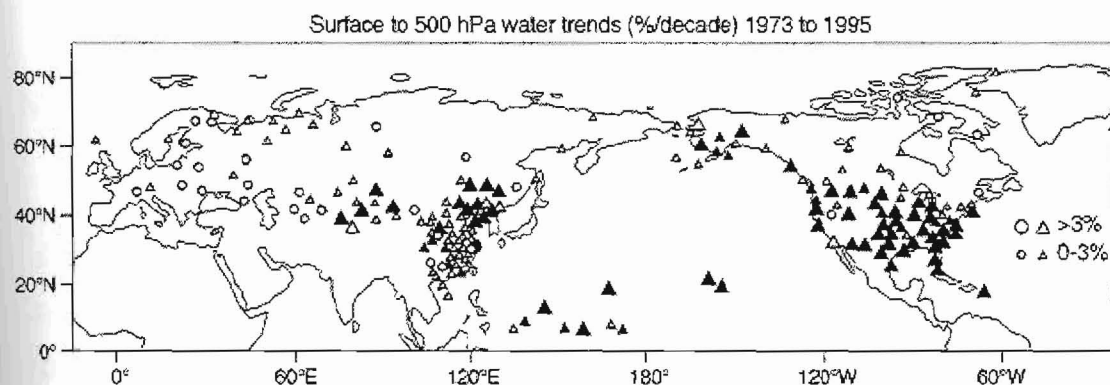


Σχήμα 17: Τάσεις της ετήσιας μέσης τάσης των υδρατμών στην επιφάνεια, από το 1975 έως το 1995, εκφρασμένες ως ποσοστό των 1975-1995 μέσων όρων. Οι περιοχές χωρίς κουκίδες δεν έχουν δώσει δεδομένα. Οι μπλε περιοχές δείχνουν σημαντικά ανοδικές τάσεις ενώ οι καφέ καθοδικές.

Υδρατμοί κατώτερης τροπόσφαιρας

Παρατηρήσεις από ραδιοκύματα:

Επιστήμονες ανέλυσαν το υετίσιμο νερό από την επιφάνεια έως τα 500 hPa στο Β.Ημισφαίριο εκτός από τον ΒΑ Καναδά. Στην Ευρασία, μόνο η Κίνα και τα νησιά του Ειρηνικού δείχνουν συνδεδεμένες τοπικές αυξήσεις. Το Σχ.18 γενικεύει τα αποτελέσματα. Άλλοι βρήκαν ότι τα δεδομένα ειδικής υγρασίας στα 1000, 700 και 300 hPa σε 4 σταθμούς του δυτικού τροπικού Ειρηνικού, τη περίοδο 1973-1993, έδωσαν αυξήσεις των 3-9%/δεκαετία, με μεγαλύτερες ποσοστιαίες αυξήσεις καθώς το ύψος αυξάνει πάνω από την επιφάνεια.



Σχήμα 18: Ετήσιες μέσες τάσεις από την επιφάνεια έως τα 500 hPa στο υετίσιμο νερό για την περίοδο 1973-1995. Οι θετικές τάσεις αντιπροσωπεύονται με τρίγωνα και οι αρνητικές με κύκλους. Τα δύο μεγέθη των συμβόλων δείχνουν τη σημασία της τάσης.

➤ Υδρατμοί ανώτερης τροπόσφαιρας και κατώτερης στρατόσφαιρας

Νέες αναλύσεις από καταγραφές μετεωρολογικών μπαλονιών και δορυφόρων δείχνουν ότι οι υδρατμοί της στρατόσφαιρας πάνω από τα 18 km δείχνουν μια αύξηση περίπου 1%/έτος για τη περίοδο 1981-2000, αλλά με μία επιβράδυνση της θετικής τάσης μετά το 1996. Δορυφορικές παρατηρήσεις της υγρασίας στην ανώτερη τροπόσφαιρα τη περίοδο 1980-1997, δείχνουν στατιστικά σημαντικές θετικές τάσεις του 0.1%/έτος για τη ζώνη 10° B-10° N.

Εξάτμιση

Ξηρά

Οι μετρήσεις της 'ολικής' εξάτμισης είναι ένας δείκτης της εξάτμισης από μία επιφάνεια με απεριόριστη προμήθεια νερού (δυναμική εξάτμιση). Η ερμηνεία αυτού του αποτελέσματος, περιλαμβάνοντας τη δυναμική ως μια μείωση της πραγματικής εξάτμισης στην επιφάνεια ξηράς, είναι αντιφατική με την αύξηση της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης που καταγράφηκαν σε αυτές τις περιοχές, και της γενικής επέκτασης του υδρολογικού κύκλου στις βόρειες εξωτροπικές περιοχές ξηράς. Γενικά η πραγματική εξάτμιση φαίνεται να έχει αυξηθεί κατά το β' μισό του 20^{ου} αιώνα πάνω από τις ξηρές περιοχές των ΗΠΑ και τη Ρωσία. Μόνο πάνω από περιοχές πυκνού δάσους της Ρωσίας και τις βόρειες ΗΠΑ μειώθηκε. Η αύξηση στη πραγματική εξάτμιση σχετίζεται με τη μεγαλύτερη διαθεσιμότητα της υγρασίας στην επιφάνεια, λόγω της αύξησης της βροχόπτωσης και των υψηλότερων θερμοκρασιών.

Νέφη

➤ Ξηρά

Διάφορες μελέτες δείχνουν αυξήσεις στη νεφοκάλυψη τον 20^ο αιώνα στο μεγαλύτερο μέρος των ΗΠΑ και της πρώην Σοβιετικής Ένωσης, που σχετίζονται αρνητικά με τις μεταβολές στον ημι-ημερήσιο ρυθμό της θερμοκρασίας του επιφανειακού αέρα. Άλλες έρευνες δείχνουν ότι η χαμηλού-επιπέδου νεφοκάλυψη στην πρώην Σοβιετική Ένωση μειώθηκε σημαντικά κατά τη περίοδο 1936-1990, καθώς και ότι υπήρχαν αυξανόμενες τάσεις κατά

τη περίοδο 1910-1995 στη νεφοκάλυψη της Β.Ευρώπης. Μια νέα ανάλυση αποκαλύπτει μία δραματική αύξηση (15-20%) στο ποσοστό των νεφών το καλοκαίρι και την άνοιξη στο Νότιο Πόλο τις τελευταίες 4 δεκαετίες. Αυτό φαίνεται να σχετίζεται με την παρατηρούμενη καθυστέρηση στη 'κατάρρευση' του εαρινού πολικού στροβίλου και με τις ελαττώσεις των θερμοκρασιών στη στρατόσφαιρα.

➤ Ωκεανοί

Η SAR παρουσίασε τις αναλύσεις των ενδο-δεκαετιών μεταβολών στη θαλάσσια νεφοκάλυψη. Μία αύξηση του 3% καταγράφηκε στα νέφη cumulonimbus για τη περίοδο 1952-1981. Επίσης, οι μεταβολές στα μέσα και χαμηλά νέφη είναι σύμφωνες με άλλες κλιματικές μεταβολές. Για παράδειγμα:

- μια μακράς-περιόδου ανοδική τάση στα altostratus και nimbostratus κατά μήκος των, μέσου γεωγραφικού πλάτους, Β.Ειρηνικού και Β.Ατλαντικού ωκεανών,
- μεταβολές στη συχνότητα των τύπων χαμηλών νεφών κατά μήκος του Ειρηνικού και του Ινδικού ωκεανού, και
- οι ενδοετήσιες μεταβολές στα θερινής περιόδου νέφη κατά μήκος του Β.Ειρηνικού.

Επίσης, αποδείχτηκε μία αύξηση περίπου 2% στην ολική νεφοκάλυψη και μία αύξηση περίπου 4% στη κάλυψη χαμηλών νεφών, βασισμένες σε αναλύσεις από καταγραφές πλοίων μεταξύ 1952-1995. Ακόμη, οι τάσεις είναι τόσο μεγάλες ή μεγαλύτερες στους τροπικούς και στο Ν.Ημισφαίριο όσο και στο Βόρειο. Το γεγονός αυτό υποστηρίζει την αύξηση του ποσού των ανθρωπογενών αεροζόλ.

➤ Παγκοσμίως

Χρησιμοποιώντας δεδομένα από το 1983 έως το 1994, μια παγκοσμίως αυξανόμενη τάση στη μηνιαία νέφωση αντιστράφηκε στα τέλη της δεκαετίας '80 και τις αρχές της '90. Τώρα φαίνεται να υπάρχει μια γενική τάση μείωσης του ολικού ποσού των νεφών πάνω από ξηρά και θάλασσα τη περίοδο αυτή.

Μια εκτίμηση για την κάλυψη cirrus στα τέλη της '90 ποικίλλει από 0-0.2% της επιφάνειας της γης.

Συμπέρασμα

Από τη SAR, η βροχόπτωση στην ξηρά συνεχίζει να αυξάνεται στα μέσα και μεγάλα πλάτη του Β.Ημισφαιρίου. Όπου τα δεδομένα είναι διαθέσιμα, οι μεταβολές στην ετήσια κυκλοφορία του αέρα σχετίζονται με τις μεταβολές στην ολική βροχόπτωση. Πάνω από περιοχές ξηράς του Ν.Ημισφαιρίου, μη σαφείς αλλαγές στην ολική βροχόπτωση είναι προφανείς από τη SAR. Οι μεταβολές της βροχόπτωσης στα μέσα και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, πάνω από τη ξηρά έχουν ένα ισχυρό συσχετισμό με τις μακράς-περιόδου μεταβολές στο ολικό ποσό των νεφών. Οι μεταβολές των υδρατμών έχουν αναλυθεί για επιλεκτικές περιοχές του Β.Ημισφαιρίου και δείχνουν ένα τύπο επιφανειακών και τροποσφαιρικών υδρατμών που αυξάνει κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Περιορισμένα δεδομένα από τη στρατόσφαιρα δείχνουν επίσης αυξήσεις στους υδρατμούς. Πάνω από τη ξηρά παρατηρείται μια αύξηση στη νεφοκάλυψη των λίγων %. Μεταβολές στο ποσοστό και τον τύπο των ωκεάνιων νεφών δείχνουν συστηματικές αυξήσεις λίγων % από τη δεκαετία του 1950.

Μεταβάλλονται οι Ατμοσφαιρικές και οι Ωκεάνιες κυκλοφορίες;

Γενικά

Οι μεταβολές ή οι διακυμάνσεις στην ατμοσφαιρική και ωκεάνια κυκλοφορία είναι σημαντικά στοιχεία του κλίματος. Αυτές είναι το κύριο αίτιο των μεταβολών των στοιχείων του κλίματος σε τοπική κλίμακα, και μερικές φορές μεσολαβούν παράλληλα μεταβολές στην επιφάνεια της ξηράς. Η El Nino-Νότια Κύμανση (ENSO) και η Κύμανση του Β.Ατλαντικού ωκεανού (NAO) είναι τέτοια παραδείγματα.

El Nino-Νότια Κύμανση και Τροπική/Εξωτροπική Αλληλεπίδραση

Η ENSO είναι ο κύριος τρόπος της κλιματικής μεταβλητότητας, παγκοσμίως, σε μια περίοδο 2-7 ετών. Το El Nino καθορίζεται από τις ανωμαλίες θερμοκρασίας στην επιφάνεια της θάλασσας (SST) στον ανατολικό τροπικό Ειρηνικό ωκεανό, ενώ ο Δείκτης Νότιας Κύμανσης (SOI) είναι ένα μέτρο ανταπόκρισης της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας στη περιοχή του Ειρηνικού – Ινδικού ωκεανού. Αυτό το τμήμα προσδιορίζει τη μεταβλητότητα της ENSO τους τελευταίους αιώνες.

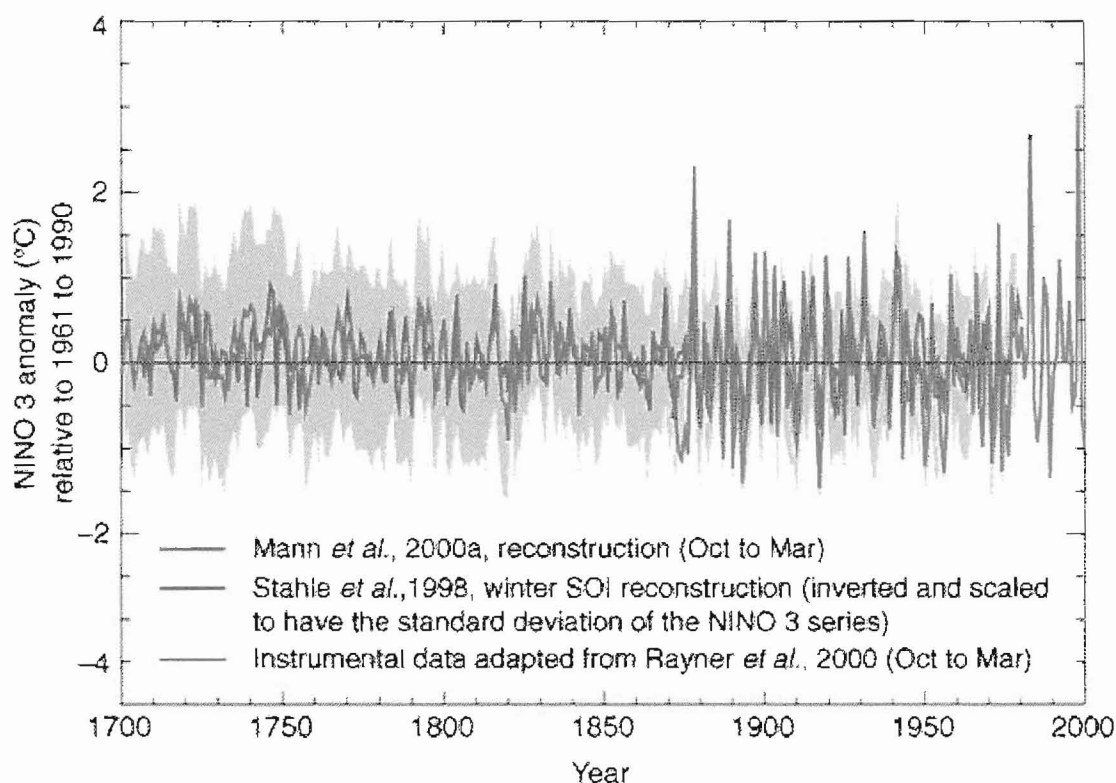
Αναπαραστάσεις της συμπεριφοράς της ENSO έχουν προσφάτως επιχειρηθεί για τους τελευταίους αιώνες, με μία χειμερινής περιόδου αναπαράσταση του SOI βασισμένη σε υψηλά ευαίσθητους στην ENSO δείκτες δακτυλίων δέντρων. Μία αναπαράσταση του Nino 3 (SST ανωμαλίες στον τροπικό Ειρηνικό από 5° Β-5° Ν, 150° Δ-90° Δ) δείκτη ψυχρής περιόδου (Οκτώβριος-Μάρτιος) έχει γίνει επίσης. Το Σχ.19 συγκρίνει τη συμπεριφορά των δύο αυτών σειρών με πρόσφατη ENSO συμπεριφορά.

Καταγραφές οργάνων έχουν εξεταστεί για να εντοπίσουν τις πιθανές μεταβολές της ENSO τα τελευταία 120 έτη. Τρεις νέες αναπαραστάσεις της SST στον ανατολικό ισημερινό Ειρηνικό ωκεανό φαίνονται στο Σχ.20. Υπήρχε

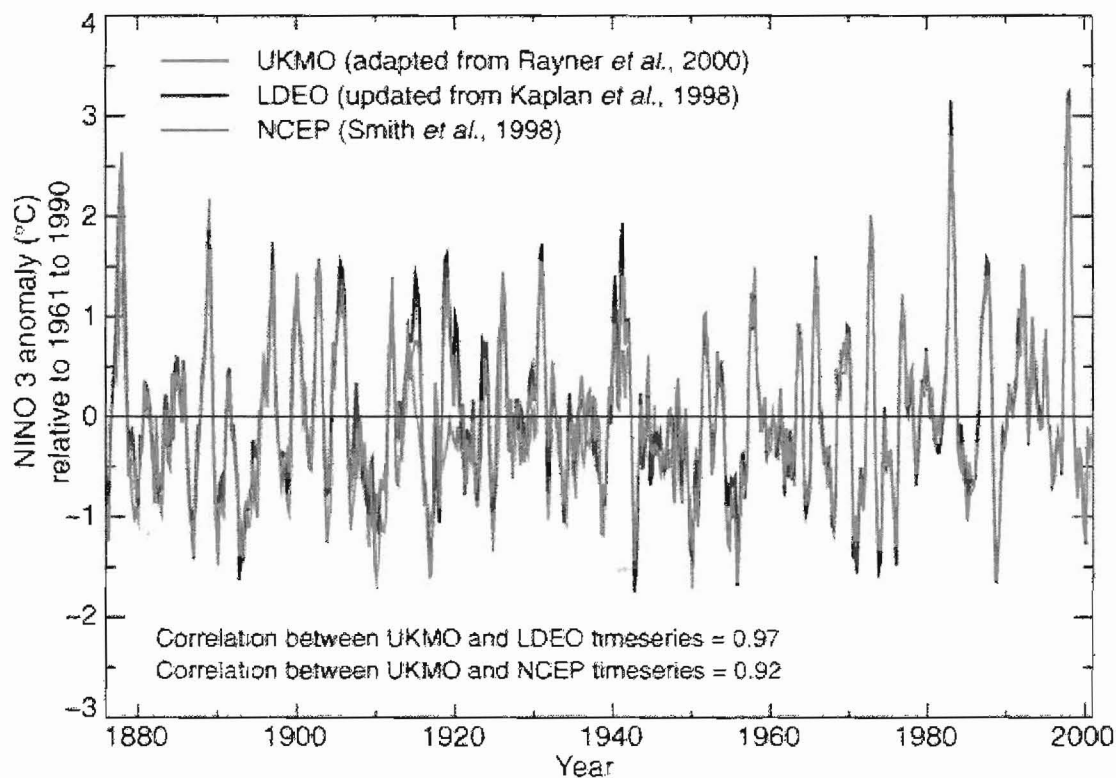
μια προφανής ‘μετατόπιση’ στη θερμοκρασία του τροπικού Ειρηνικού γύρω στο 1976 προς θερμότερες συνθήκες, που φάνηκε να συνεχίζεται μέχρι τουλάχιστον το 1998. Τη περίοδο αυτή, τα ENSO γεγονότα ήταν πιο συχνά, έντονα ή μόνιμα.

Κάποιες πρόσφατες μελέτες έχουν εντοπίσει μεταβολές στην ενδοετήσια μεταβλητότητα της ENSO τον τελευταίο αιώνα, εν μέρει σχετικά με μια παρατηρούμενη μείωση της μεταβλητότητας μεταξύ 1920-1960.

Η δεκαετία ‘90 έχει λάβει αξιοσημείωτης προσοχής, καθώς η πρόσφατη συμπεριφορά της ENSO φαίνεται ασυνήθιστη με αυτή των προηγούμενων δεκαετιών. Μια μεγάλη περίοδος χαμηλού SOI από το 1990 έως το 1995 βρέθηκε να είναι στατιστικά πιο σπάνια, σύμφωνα με διάφορες έρευνες. Αυτή συνέβη κατά τη διάρκεια διάφορων ασθενών έως ‘μέτριων’ El Nino γεγονότων που συνέβησαν χωρίς να μεσολαβήσουν La Nina γεγονότα. Κατά πόσο η παγκόσμια θέρμανση επηρεάζεται από το El Nino, είναι ένα ερώτημα-‘κλειδί’, καθώς το El Nino επηρεάζει τη παγκόσμια θερμοκρασία από μόνο του.



Σχήμα 19: Αναπαραστάσεις από το 1700 των ENSO δεικτών. Φαίνονται ο ψυχρής περιόδου (Οκτ.-Μαρτ.) μέσος NINO 3 δείκτης και ο χειμερινός SOI δείκτης για το Ν.Ημισφαίριο. Οι SOI σειρές έχουν αντιστραφεί ώστε να σχετίζονται θετικά με τις NINO 3 σειρές. Ένας NINO 3 δείκτης, για το 1871-2000 φαίνεται για σύγκριση, με τα δύο όρια των αποκλίσεων (γκρι περιοχή).



Σχήμα 20: Μεταβολές των EL NINO- LA NINA για το 1876 έως 2000 όπως μετρήθηκαν από θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας για την περιοχή 5° B- 5° N, 150 - 90° Δ.

Δεκαετής έως Ενδοδεκαετής Ειρηνική Κύμανση και Βόρεια Ειρηνική Κύμανση

Πρόσφατα, οι χωρικοί τύποι της ENSO έχουν προσδιοριστεί. Η χαμηλής συχνότητας SST μεταβλητότητα είναι λιγότερο περιορισμένη στον κεντρικό και ανατολικό Ειρηνικό ωκεανό, και σχετικά πιο χαρακτηριστική πάνω από τους εξωτροπικούς, ειδικά στο ΒΔ Ειρηνικό και έχει παρόμοιες νυχτερινές θερμοκρασίες αέρα στη θάλασσα. Η αντίστοιχη Πίεση Θαλάσσιου Επιπέδου (SLP) είναι πιο ισχυρή πάνω από το Β.Ειρηνικό ωκεανό.

Βρέθηκε ότι η Δεκαετής Ειρηνική Κύμανση (PDO) με χαμηλής συχνότητας μεταβολές στον κύριο SST τύπο Β.Ειρηνικού, μπορεί να σχετίζεται με τα ίδια Ειρηνικού-εύρους χαρακτηριστικά και να είναι παράλληλη με την επικρατούσα

SLP μεταβλητότητα τύπου Β.Ειρηνικού. Η σχέση είναι ότι ψυχρότερες από τις κατά μέσο όρο SSTs, συμβαίνουν στις περιόδους χαμηλότερης από τη κατά μέσο όρο SLP, πάνω από το Β.Ειρηνικό ωκεανό. Πρόσφατα η Ενδοδεκαετής Ειρηνική Κύμανση (IPO), έχει περιγραφεί, και περιέχει χαμηλής συχνότητας μεταβολές στο κλίμα πάνω από το Β.Ειρηνικό.

Η IPO δείχνει 3 μεγάλες φάσεις αυτό τον αιώνα:

- μία θετική το 1922-1946
- μία θετική το 1978-1998(τουλάχιστον),
- με μια αρνητική φάση τη περίοδο 1947-1976.

Η IPO είναι μια σημαντική πηγή δεκαετούς κλιματικής μεταβολής παντού στο Ν.Ειρηνικό ωκεανό και ρυθμίζει την ENSO κλιματική μεταβλητότητα σε αυτή τη περιοχή. Παρομοίως, η PDO (και πιθανώς η IPO) μπορεί να παίζει ένα ρόλο-‘κλειδί’ στη ρύθμιση της ENSO κατά μήκος της Β.Αμερικής σε ενδοδεκαετείς χρονοκλίμακες.

Ένας απλός και σημαντικός δείκτης κλιματικής μεταβλητότητας στο Β.Ειρηνικό ωκεανό είναι η μέση SLP, κατά μέσο όρο πάνω από το μεγαλύτερο μέρος του εξωτροπικού Β.Ειρηνικού ωκεανού. Μια γενική μείωση στη SLP μετά το 1976 περίπου, έχει γίνει προφανής ειδικά κατά το μισό του χειμώνα (Νοέμβριος έως Μάρτιος) των περισσότερων από αυτά τα έτη. Αυτό χαρακτηρίζεται από το, ‘βαθύτερο’ από το κανονικό, χαμηλό βαρομετρικό των Αλεούτιων νήσων, συνοδευόμενο από ισχυρότερους από το κανονικό ανέμους δυτικής συνιστώσας κατά μήκος του κεντρικού Β.Ειρηνικού ωκεανού. Το σύστημα επαυξάνει νότια έως νοτιοδυτικά κατά μήκος της δυτικής ακτής της Β.Αμερικής. Συνεπώς, υπάρχουν αυξήσεις στη θερμοκρασία του επιφανειακού αέρα και στη SST στο μεγαλύτερο μέρος της δυτικής Β.Αμερικής και του ανατολικού Β.Ειρηνικού ωκεανού, αντίστοιχα, κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες, ειδικά το χειμώνα. Ενώ, υπάρχουν μειώσεις στη SST ή μόνο μέτρια θέρμανση σε μέρη του κεντρικού εξωτροπικού Β.Ειρηνικού ωκεανού. Έρευνες έχουν προτείνει ότι, στα μέσα της δεκαετίας 1970, οι μεταβολές στην ατμοσφαιρική και ωκεάνια κυκλοφορία μπορεί να επηρεάζουν μία ή περισσότερες μεταβολές χαμηλής συχνότητας στο Β.Ειρηνικό ωκεανό (η μία είναι η PDO).

Μουσσώνες

Οι μεταβολές στη συμπεριφορά του θερινού μουσσώνα της Β.Αφρικής είχαν τονιστεί στην IPCC (1990). Έχουν παρατηρηθεί πολυ-δεκαετίες και δεκαετίες μεταβολές του Ινδικού μουσσώνα, αλλά η σύνδεση τους με το El Nino δεν είναι σαφής. Όμως, παρά τα πρόσφατα ισχυρά El Nino επεισόδια, η αντίστροφη σχέση μεταξύ της ENSO και του Ινδικού μουσσώνα ('ασθενής' μουσσώνας προκύπτει από ένα ENSO γεγονός) έχει διακοπεί τις τελευταίες δυο δεκαετίες. Οι επιστήμονες προτείνουν ότι οι συνεχώς αυξανόμενες επιφανειακές θερμοκρασίες στην Ευρασία το χειμώνα και την άνοιξη ευνοούν μία θερμική βαροβαθμίδα ξηράς-θάλασσας (που επαυξάνει) και συμβάλλει σε ισχυρότερους μουσσώνες. Μεταβολές έχουν συμβεί επίσης στις σχέσεις με τα πρόδρομα φαινόμενα του Ινδικού μουσσώνα. Μία πιθανότητα είναι ότι η θέρμανση πάνω από τον Ινδικό ωκεανό μπορεί να είχε αυξήσει την υγρασία και τη βροχόπτωση για μια δοσμένη κατάσταση της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας.

Έχει γίνει γνωστό ότι η θέση του υποτροπικού Υψηλού του δυτικού Β.Ειρηνικού ωκεανού, για κάποιο χρονικό διάστημα, επηρεάζει τον μουσσώνα της Ανατ.Ασίας.

Το Β.Ημισφαίριο (εκτός του Β.Ειρηνικού ωκεανού)

Η κυκλοφορία της ατμόσφαιρας στο Β.Ημισφαίριο έχει δείξει ανώμαλη συμπεριφορά τις τελευταίες δεκαετίες. Ειδικά, οι κυριότεροι τύποι της ατμοσφαιρικής μεταβλητότητας τείνουν να είναι ισχυρώς biased το χειμερινό μισό του έτους.

Ο κυριότερος τύπος της μεταβλητότητας της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας είναι η γνωστή Κύμανση του Β.Ατλαντικού (NAO), και ο χειμερινός περιόδους δείκτης της φαίνεται στο Σχ. 21. Θετικές τιμές της NAO δίνουν ισχυρότερους από το μέσο όρο, ανέμους δυτικής συνιστώσας στα μέσα γεωγραφικά πλάτη του Ατλαντικού ωκεανού. Δείχνουν χαμηλές SLP ανωμαλίες στη περιοχή της Ισλανδίας και στο μεγαλύτερο μέρος της Αρκτικής και υψηλές κατά μήκος του υποτροπικού Ατλαντικού και στη Ν.Ευρώπη. Η θετική, δυτικά επαυξανούσα, φάση της NAO σχετίζεται με ισχυρούς χειμώνες στην Ευρώπη, στη Σιβηρία

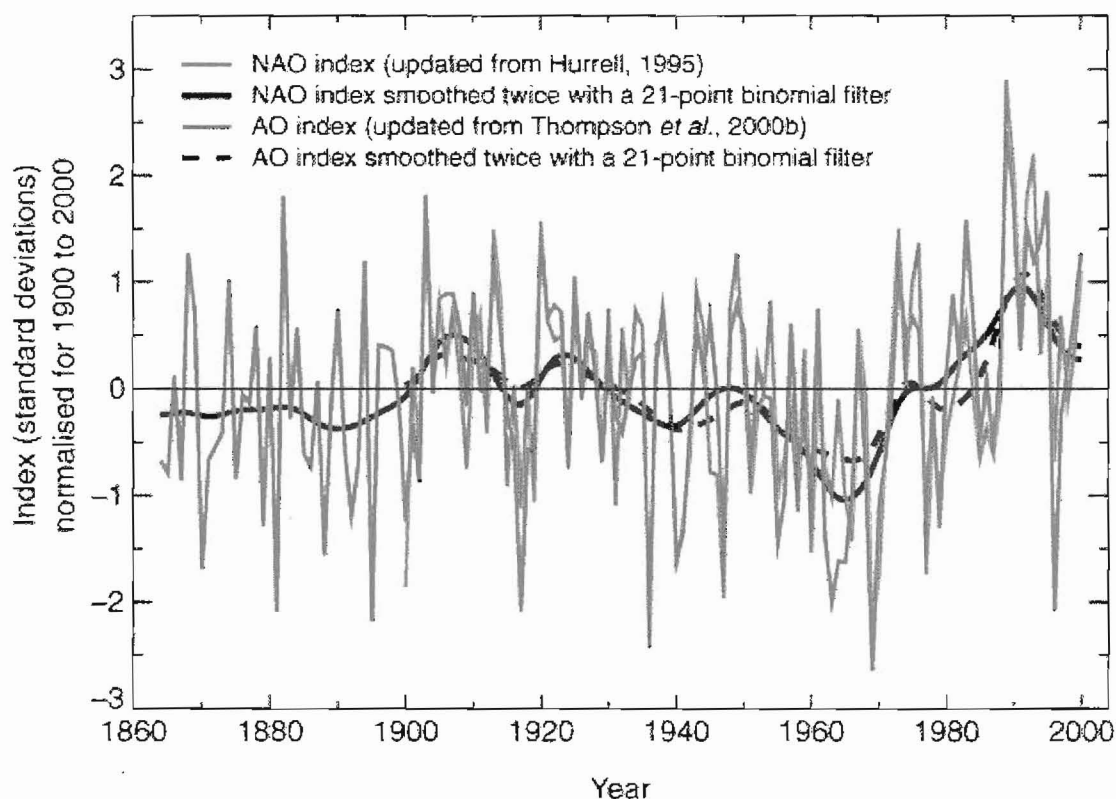
και την ανατολική Ασία, καθώς και με υγρές συνθήκες από την Ισλανδία έως τη Σκανδιναβία και υγρούς χειμώνες στη Ν.Ευρώπη.

Επίσης, αποδείχτηκε ότι η πρόσφατη ανοδική τάση της ΝΑΟ εξηγεί το μεγαλύτερο μέρος από την τοπική χειμερινή επιφανειακή θέρμανση στη Β.Ευρώπη και στην Ασία (βόρεια των 40° Β) τα τελευταία 30 έτη, καθώς και τη ψύξη στο ΒΔ Ατλαντικό ωκεανό.

Οι μεταβολές της κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας στον Ατλαντικό ωκεανό συνδέονται επίσης με τη 'πτώση' της πίεσης που παρατηρείται στον Αρκτικό ωκεανό τα τελευταία έτη. Άλλα χαρακτηριστικά σχετικά με τις μεταβολές αυτές, περιλαμβάνουν την ενίσχυση των υποπολικών ανέμων δυτικής συνιστώσας από την επιφάνεια του Β.Ατλαντικού ωκεανού και άνω (το χειμώνα μέχρι την κατώτερη στρατόσφαιρα) και τις έντονες τοπικές μεταβολές στους τύπους της βροχόπτωσης.

Η ΝΑΟ θεωρείται έντονα από κάποιους ως η τοπική έκφραση ενός συμμετρικού, κατά ζώνες, τρόπου μεταβλητότητας για κάθε ημισφαίριο χωριστά. Ο τρόπος αυτός χαρακτηρίζεται από μία παλινδρόμηση της ατμοσφαιρικής μάζας μεταξύ του πολικού καλύμματος και των μέσων γεωγραφικών πλατών στις λεκάνες του Ατλαντικού και του Ειρηνικού ωκεανού. Αυτός ο τρόπος έχει ονομαστεί Αρκτική Κύμανση (ΑΟ) (Σχ. 21). Οι χρονοσειρές των ΝΑΟ και ΑΟ είναι αρκετά παρόμοιες: ο συσχετισμός των μηνιαίων ανωμαλιών των σειρών δεδομένων SLP από τους σταθμούς της ΝΑΟ και της ΑΟ είναι περίπου 0.7, ενώ εποχιακές αποκλίσεις που φαίνονται στο Σχ. 21 έχουν υψηλότερους συσχετισμούς. Οι ΝΑΟ και ΑΟ μπορεί να εξεταστούν ως εκδηλώσεις του ίδιου βασικού φαινομένου.

Διάφορες μελέτες έχουν επεξεργασθεί τις πρόσφατες θετικές τιμές της ΝΑΟ. Η πρόσφατη ένταση της θετικής φάσης της ΝΑΟ φαίνεται ασυνήθιστη από αυτές τις αναπαραστάσεις, αλλά, όπως και στο Σχ.19, αυτές μπορεί να υποτιμήσουν τη μεταβλητότητα. Μια παρατεταμένη θετική φάση που συνέβη στις αρχές του 20^{ου} αιώνα (Σχ.19), ειδικά έντονη τον Ιανουάριο, συγκρίσιμη σε διάρκεια με την πρόσφατη θετική φάση. Τέλος, αποδείχτηκε ότι η δεκαετής (6-10 έτη) μεταβλητότητα έχει γίνει πιο έντονη το τελευταίο μισό του 20^{ου} αιώνα.



Σχήμα 21: Δείκτες της NAO (Κύμανση Β.Ατλαντικού) από Δεκέμβρη έως Μάρτιο, για τα έτη 1864-2000, και δείκτες της AO (Αρκτική Κύμανση), για το 1900-2000.

Το Νότιο Ημισφαίριο

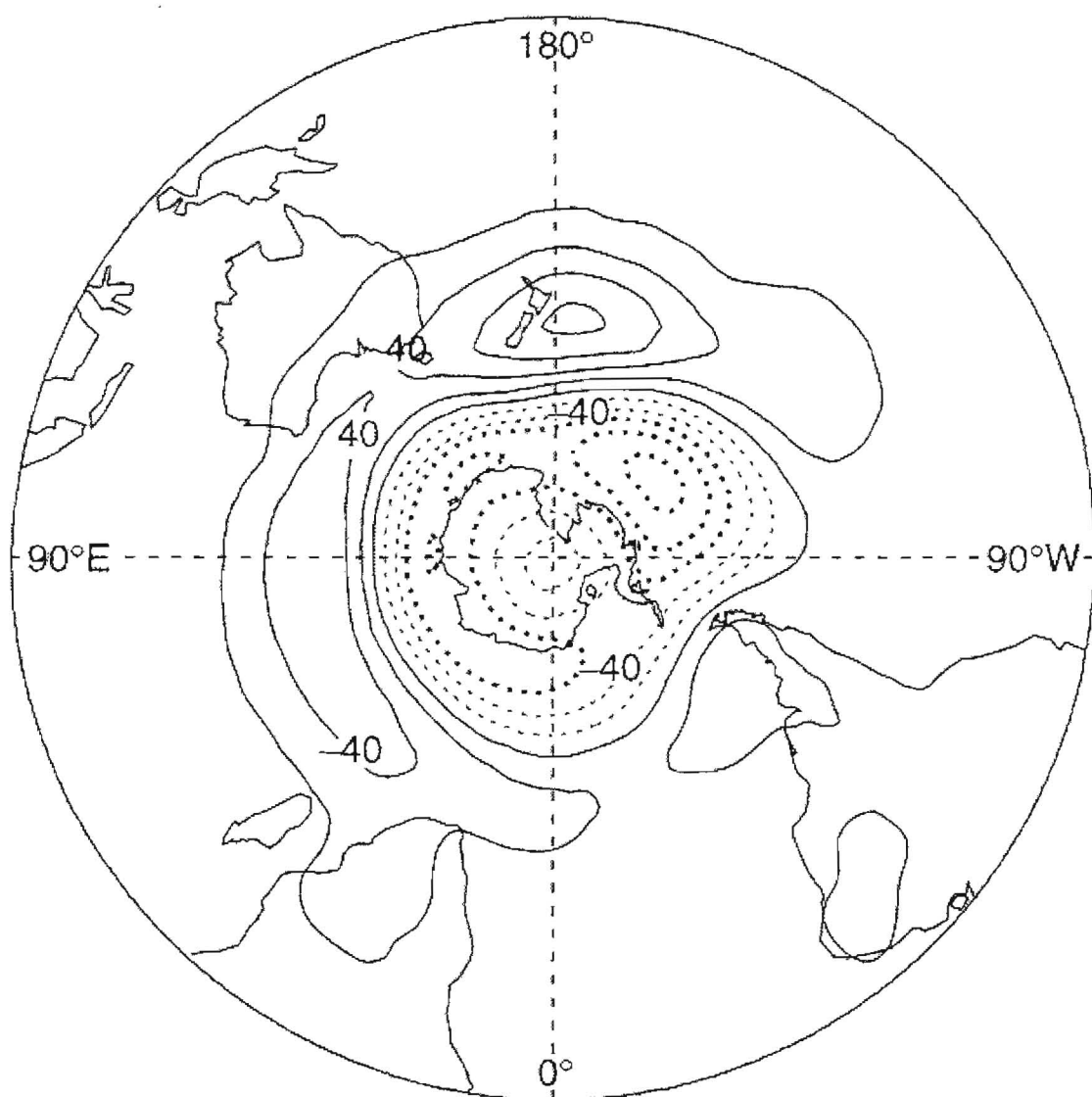
Έχει δοθεί μεγάλη έμφαση στην ανάλυση της δεκαετούς μεταβλητότητας στο Ν.Ημισφαίριο. Εδώ, τα SLP δεδομένα για τη περίοδο 1950-1994 δείχνουν δύο κύριους τρόπους στους ετήσιους μέσους όρους τιμών. Ο πρώτος, αναμφίβολα αναπαριστά την Νότια Κύμανση και επηρεάζει την τάση προς πιο συχνές και έντονες αρνητικές φάσεις τις τελευταίες δεκαετίες. Ο δεύτερος, αναπαριστά ανωμαλίες παντού στις περιοχές μέσου γεωγραφικού πλάτους κατά μήκος του Ινδικού και του δυτικού Ειρηνικού ωκεανού, οι οποίες έρχονται σε αντίθεση με ανωμαλίες οπουδήποτε αλλού.

Ο κυριότερος τρόπος μεταβλητότητας στην εξωτροπική κυκλοφορία του Ν.Ημισφαιρίου σε ενδοετήσιες έως πολύ-δεκαετείς χρονοκλίμακες είναι μία, κατά ζώνες, επιμήκης Β-Ν διπολική δομή στον Ειρηνικό, που εκτείνεται από τους υποτροπικούς ως τις ακτές της Ανταρκτικής. Σχετίζεται έντονα με τη μεταβλητότητα της ENSO.

Η μεταβλητότητα της ENSO εμπλέκεται επίσης στη διαμόρφωση του 'Τρόπου, Υψηλών Γεωγραφικών Πλάτων' (HLM). Ο HLM τώρα λέγεται και

Ανταρκτική Κύμανση (AAO). Η AAO είναι μια ζωνική κύμανση πίεσης μεταξύ των μέσων και μεγάλων γεωγραφικών πλατών του Ν.Ημισφαιρίου, συγκεντρωμένη στις 55-60° N. Προσφάτως, έχει ερευνηθεί σε μεγαλύτερο βαθμό (Σχ.22) και φαίνεται να έχει επεκταθεί στη κατώτερη στρατόσφαιρα μεταξύ της Ανταρκτικής και των υποτροπικών γεωγραφικών πλατών του Ν.Ημισφαιρίου. Η AAO φαίνεται να παραμένει σε όλο το έτος αλλά μπορεί να είναι πιο ενεργή από τα μέσα του Οκτώβρη έως τα μέσα του Δεκέμβρη όταν εκτείνεται στη στρατόσφαιρα.

Άλλη έρευνα προσδιόρισε την πιθανή ύπαρξη ενός Ανταρκτικού Περιπολικού Κύματος (ACW), ένα πολυετές κλιματικό 'σήμα' του Νότιου Ωκεανού, με ποικίλες και πιθανώς συνδεόμενες SST και SLP ανωμαλίες που συμβαίνουν γύρω από αυτόν.



Σχήμα 22: Η Ανταρκτική Κύμανση (AAO) .

Συμπέρασμα

Η ενδοετήσια μεταβλητότητα της ENSO έχει διακυμανθεί σημαντικά κατά τον τελευταίο αιώνα με αξιολόγα φθίνουσα μεταβλητότητα τη περίοδο 1920-1960, σε σύγκριση με συνεχόμενες περιόδους. Η ανάλυση των SST τύπων δείχνει ότι ο τύπος της παγκόσμιας θέρμανσης μπορεί να έχει αυξήσει τις προηγούμενες θερμοκρασίες της περιοχής πιο πολύ επηρεασμένες από την ENSO.

Τα σχετικά με την ENSO χαρακτηριστικά που λειτουργούν σε δεκαετίες έως πολύ-δεκαετίες χρονοκλίμακες, όπως η PDO και η IPO, έχουν προσδιοριστεί. Φαίνεται να είναι μέρος ενός συνεχούς φάσματος της μεταβλητότητας της ENSO που έχει αλλάξει τους SST τύπους καθώς οι κλίμακες χρόνου 'μεγαλώνουν' και μπορεί να έχουν διακριτά αποτελέσματα στο τοπικό κλίμα γύρω από τη λεκάνη του Ειρηνικού. Μέχρι το 1900, τα γεγονότα El Nino (La Nina) είναι πιο επικρατή κατά τις θετικές (αρνητικές) φάσεις της IPO.

Στο Β.Ημισφαίριο, οι έντονες μεταβολές στις χειμερινές ατμοσφαιρικές και ωκεάνιες κυκλοφορίες στον Β.Ειρηνικό ωκεανό την δεκαετία '70 (Κύμανση Β.Ειρηνικού ωκεανού) έχουν παραλληλιστεί με τις χειμερινής περιόδου μεταβολές στη κυκλοφορία στο Β.Ατλαντικό, καταγεγραμμένες από τη NAO. Στο Ν.Ημισφαίριο, ένα χαρακτηριστικό όπως η NAO, ο HLM ή η AAO φαίνεται να έχουν κινηθεί επίσης σε μια αυξανόμενη από τα δυτικά φάση των μέσων γεωγραφικών πλατών.

6.

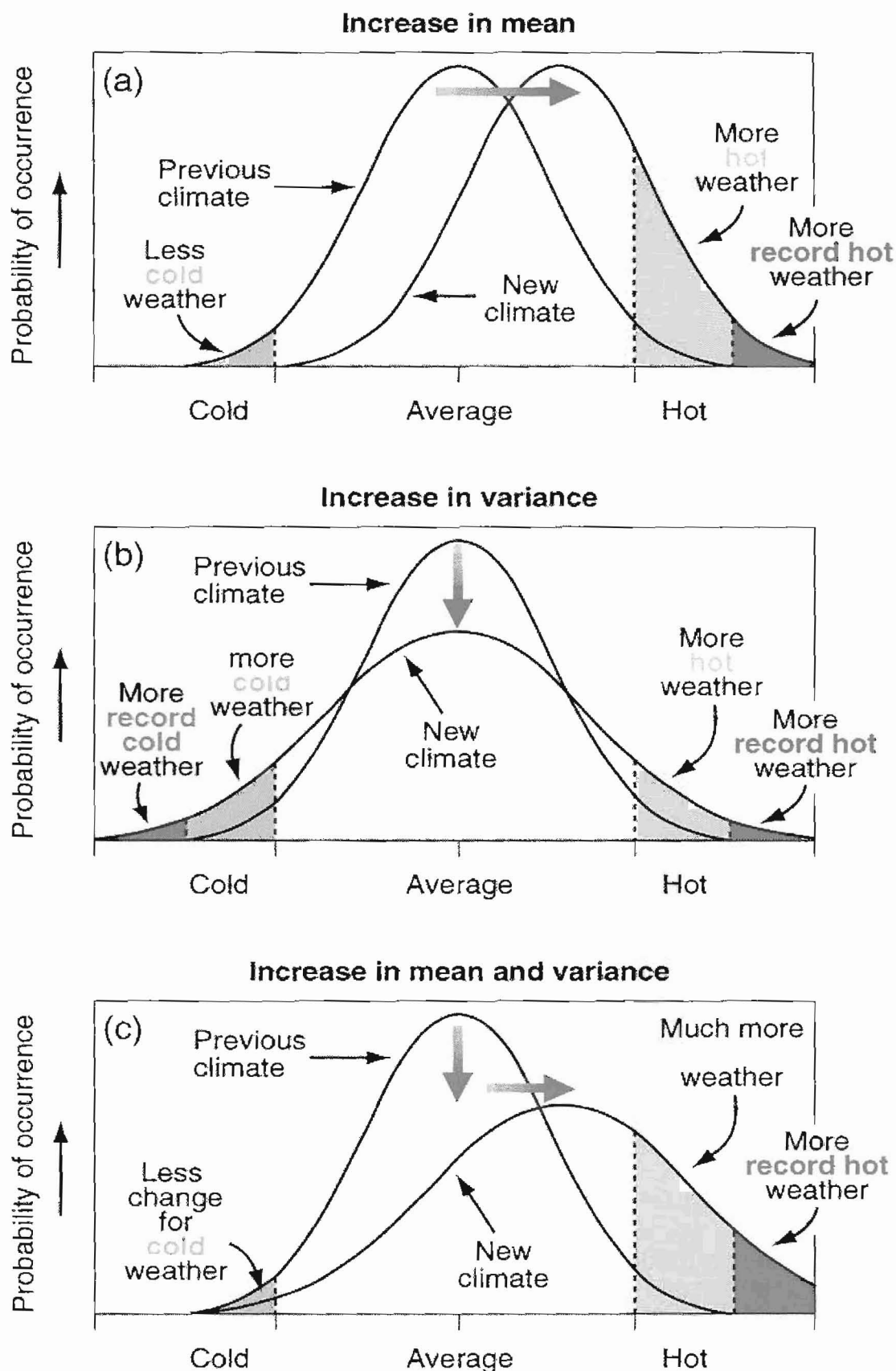
Έχει μεταβληθεί η κλιματική μεταβλητότητα, ή τα ακραία κλιματικά φαινόμενα;

Γενικά

Οι μεταβολές στη κλιματική μεταβλητότητα, στα ακραία κλιματικά φαινόμενα και σε κλιματικά γεγονότα εξετάζονται προσεκτικά τα τελευταία έτη. Η κατανόηση των μεταβολών αυτών είναι δύσκολη λόγω διάφορων αλληλεπιδράσεων (ποικίλης στατιστικής κατανομής) μεταξύ των μεταβολών στις μέσες τιμές και στη μεταβλητότητα. Για παράδειγμα, η κατανομή των θερμοκρασιών συχνά δείχνει μια κανονική κατανομή όπου η αστάθειά της δηλώνει τις μεταβολές των μέσων όρων ή της μεταβλητότητας. Σε μια τέτοια κατανομή, μία αύξηση του μέσου όρου 'οδηγεί' σε νέες καταγραφόμενες υψηλές θερμοκρασίες (Σχ. 23a), αλλά μία αλλαγή δε δηλώνει καμία μεταβολή της μεταβλητότητας. Για παράδειγμα, στο Σχ.23a, η διακύμανση μεταξύ των υψηλότερων και των χαμηλότερων θερμοκρασιών, δεν αλλάζει. Μία αύξηση της μεταβλητότητας, χωρίς μεταβολή των μέσων, δείχνει μία αύξηση της πιθανότητας των θερμών και ψυχρών ακραίων φαινομένων, καθώς και των απόλυτων τιμών τους (Σχ. 23b). Αυξήσεις στις μέσες τιμές και στη μεταβλητότητα είναι επίσης πιθανές (Σχ. 23c), και επηρεάζουν (στο παράδειγμα αυτό) τη πιθανότητα των θερμών και των ψυχρών ακραίων φαινομένων. Τα θερμά γεγονότα, με πιο ακραίες υψηλές θερμοκρασίες, είναι πιο συχνά, ενώ λιγότερα είναι τα ψυχρά γεγονότα.

Συνεπώς, ακόμη και όταν οι μεταβολές των ακραίων φαινομένων είναι δυνατό να τεκμηριωθούν, είναι συχνά αβέβαιο αν οι μεταβολές έγιναν από αλλαγή των μέσων τιμών, της μεταβλητότητας, ή και των δύο.

Η κατάσταση είναι πιο δύσκολη για μεταβολές που δεν έχουν προσεγγιστεί από κανονικές κατανομές, όπως η βροχόπτωση, ειδικά για τα ξηρά κλίματα. Για παράδειγμα, οι μεταβολές της μέσης ολικής βροχόπτωσης μπορεί να



Σχήμα 23: Το σχήμα δείχνει το αποτέλεσμα των ακραίων θερμοκρασιών όταν (a) η μέση θερμοκρασία αυξάνεται (b) η μεταβλητότητα αυξάνεται και (c) και οι δύο αυξάνονται για μία κανονική κατανομή της θερμοκρασίας.

συνοδεύονται από άλλες, όπως η συχνότητα της βροχόπτωσης ή ο τύπος της κατανομής.

Το τμήμα αυτό θεωρεί τις μεταβολές στη μεταβλητότητα και τα ακραία καιρικά φαινόμενα ταυτόχρονα για δύο μεταβλητές, τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση.

Υπάρχουν αποδείξεις για τις μεταβολές στη μεταβλητότητα ή στα ακραία φαινόμενα;

Τα θέματα σχετικά με τη μέτρηση και τον προσδιορισμό των μεταβολών των ακραίων καιρικών φαινομένων έχουν προσφάτως αναθεωρηθεί πλήρως. Τα φαινόμενα αυτά είναι μία άποψη-‘κλειδί’ για την κλιματική μεταβολή. Αυξήσεις ή μειώσεις στη συχνότητα πολλών ακραίων φαινομένων μπορεί να είναι εκπληκτικά μεγάλες για τις μέτριες μέσες μεταβολές του κλίματος, και είναι συχνά οι πιο ‘ευαίσθητες’ απόψεις κλιματικής μεταβολής για το οικοσύστημα και τη κοινωνία.

➤ Θερμοκρασία

Γνωρίζοντας τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να οριστούν τα ακραία κλιματικά γεγονότα και η μεταβλητότητα, θα πρέπει να δοθεί μεγάλη μέριμνα για τα γενικά αποτελέσματα. Οι τρόποι αυτοί είναι:

- οι ακραίες ημερήσιες θερμοκρασίες,
- οι εκτενείς περιοχές με ασυνήθιστες θερμοκρασίες,
- η σημασία των κυμάτων θερμότητας,
- οι αύρες και οι παγετοί (αριθμός),
- οι μεταβολές στην ενδοετήσια μεταβλητότητα θερμοκρασιών μεγάλων περιοχών κτλ.

Εδώ έχουν προσδιοριστεί οι ενδείξεις για τις μεταβολές των ακραίων θερμοκρασιών ή της μεταβλητότητας, αρχικά, βασισμένες σε παγκόσμιες και έπειτα σε πιο λεπτομερείς, τοπικές αναλύσεις.

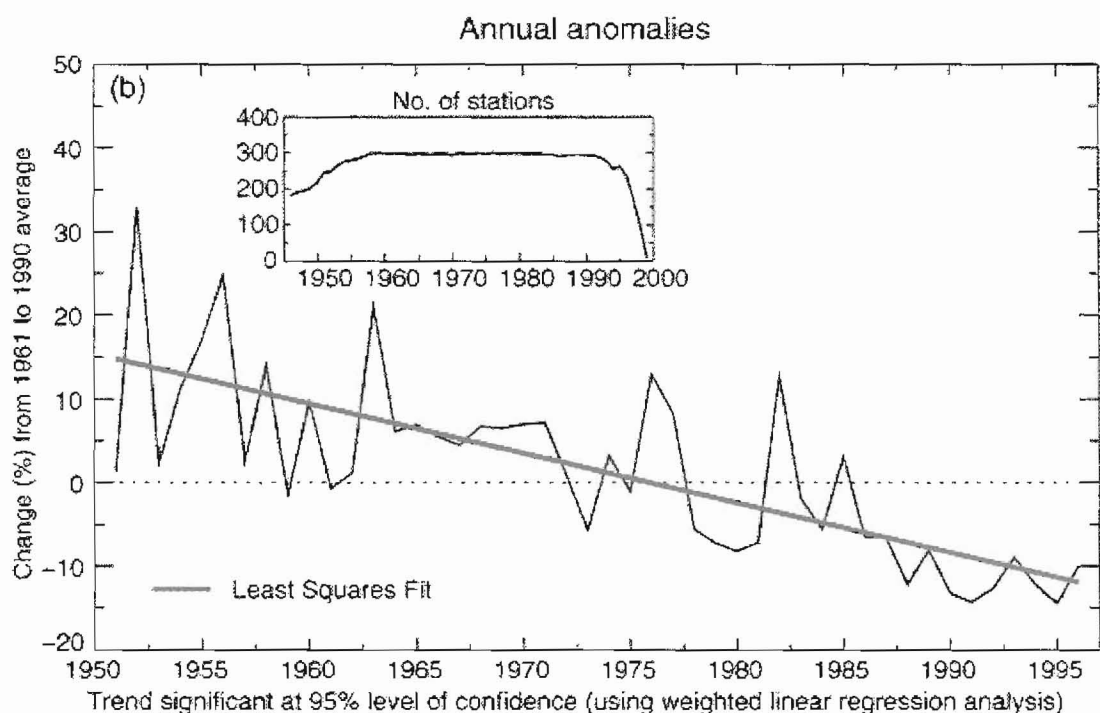
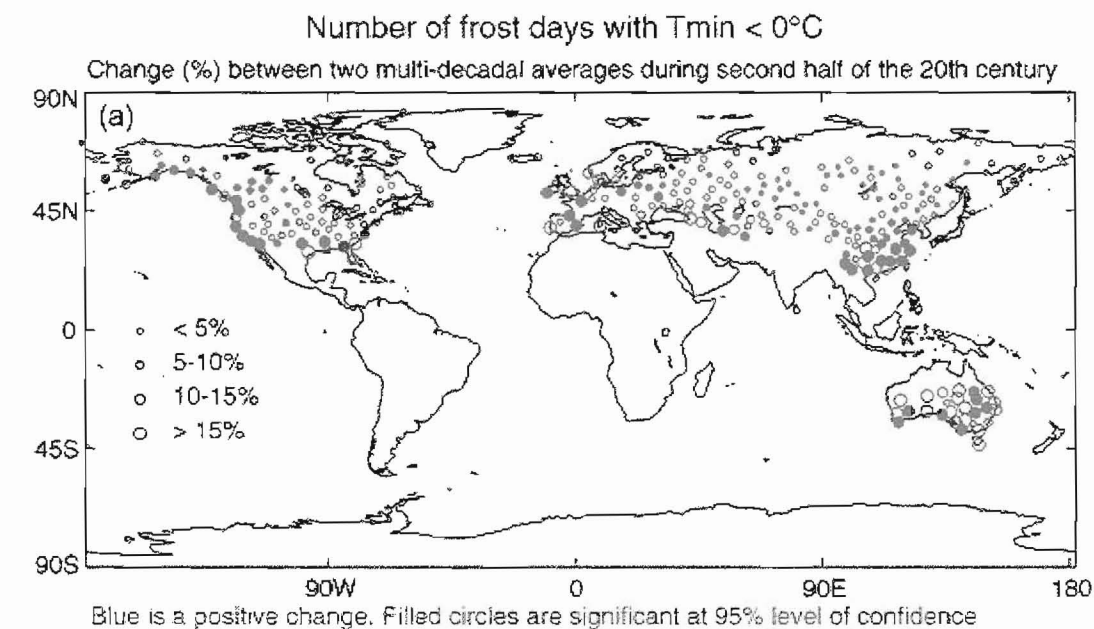
Έχουν γίνει συγκρίσεις της ενδοετήσιας μεταβλητότητας ή των εποχιακών θερμοκρασιακών ανωμαλιών τη περίοδο 1954-1973 μέχρι τη περίοδο 1974-1993 σχεδόν παγκοσμίως. Βρέθηκε μία μικρή αύξηση της μεταβλητότητας γενικά με μία μεγάλη αύξηση στην κεντρική Β.Αμερική. Άλλες έρευνες βρήκαν μία μείωση σε άλλες απόψεις της μεταβλητότητας για μεγαλύτερες περιόδους. Επίσης, αναλύθηκαν παγκόσμια δεδομένα και δε βρέθηκε καμία μεταβολή. Αλλά, από το 1951 η άνοδος στις παγκόσμιες μέσες θερμοκρασίες μπορεί να αποδοθεί σε μία αύξηση (μείωση) στις περιοχές με πολύ ανώτερες (χαμηλότερες) από το κανονικό θερμοκρασίες. Αναλύθηκε ακόμη η μεταβολή στο σύνολο των θερμοκρασιών αυτών. Έτσι, βρέθηκε μια μικρή γενική μεταβολή, εκτός από έναν φθίνων αριθμό των θερμοκρασιών αυτών κατά τις δεκαετίες '60 και '70. Οι ερευνητές εξέτασαν τις, 5° γ.πλάτος $\times$ 5° γ.μήκος, μηνιαίες ανωμαλίες της θερμοκρασίας για πολλά μέρη του πλανήτη και βρήκαν μία γενική μείωση της ενδοετήσιας μεταβλητότητας τα τελευταία 50-100 έτη. Επίσης, εξέτασαν τις ημερήσιες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες των ΗΠΑ, της Κίνας και της πρώην Σοβιετικής Ένωσης και βρήκαν μια γενική 'πτώση' της μηνιαίας μεταβλητότητας της θερμοκρασίας. Σύμφωνα με τις καταγραφές, η μεταβλητότητα μειώθηκε μέρα παρά μέρα κατά τον 20^ο αιώνα στο Β.Ημισφαίριο, ειδικά στις ΗΠΑ και την Κίνα. Αναλύοντας έναν ομοιογενή δείκτη ημερήσιας θερμοκρασίας για τέσσερις σταθμούς στη Β.Ευρώπη, έχει βρεθεί μία προοδευτική μείωση, περίπου 7%, της ενδοημερήσιας μεταβλητότητας (όλες τις εποχές) μεταξύ του 1880 και του 1998. Επίσης, βρέθηκε μία γενική μείωση της χωρικής μεταβλητότητας στις μετρήσεις της κατώτερης τροπόσφαιρας τη περίοδο 1979-1996 και στις θερμοκρασίες του αέρα κοντά στην επιφάνεια, όπως καταγράφηκαν από δορυφόρους.

Συνεπώς, υπάρχουν λίγες ενδείξεις τώρα για να προτείνουμε ότι η ενδοετήσια μεταβλητότητα των παγκόσμιων θερμοκρασιών έχει αυξηθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Αλλά, υπάρχουν λίγες για να προτείνουμε ότι η μεταβλητότητα των ενδοετήσιων θερμοκρασιών έχει πραγματικά μειωθεί ευρέως.

Έχουν γίνει πολλές νέες τοπικές έρευνες σχετικά με τις μεταβολές γεγονότων ακραίων θερμοκρασιών κατά τον 20^ο αιώνα. Για το μεγαλύτερο μέρος των περιοχών των μέσων και μεγάλων γεωγραφικών πλατών του Β.Ημισφαιρίου, κατά το β' μισό του 20^{ου} αιώνα, βρέθηκε μία σημαντική αύξηση (5 έως >15%) της διάρκειας της εποχής σε πολλές περιοχές. Επίσης, βρέθηκε μία μείωση στον αριθμό των ημερών ολικού παγετού (πλήθος ημερών με $T_{min} \leq 0^{\circ} C$) στη βόρεια και κεντρική Ευρώπη. Έτσι, μερικοί σταθμοί μετρούν τώρα 50 λιγότερες ημέρες ολικού παγετού ανά έτος, σε σύγκριση με τις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Έχει βρεθεί μια σημαντική μείωση του αριθμού των ημερών χωρίς παγετό για τις κεντρικές ΗΠΑ (περίπου 7/έτος). Αποδείχτηκε ότι οι ημέρες ολικού παγετού μειώνονται στο μεγαλύτερο μέρος του πλανήτη (Σχ. 24). Όμως, άλλες έρευνες δείχνουν ότι η μέγιστη θέρμανση τον 20^ο αιώνα έγινε κατά τη ψυχρή περίοδο των μέσων και μεγάλων γεωγραφικών πλατών, σύμφωνα με τη μείωση των ακραίων χαμηλών θερμοκρασιών. Ακόμη, απέδειξαν μια στατιστικά σημαντική μείωση της διαφοράς μεταξύ των ετήσιων μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών στο β' μισό του 20^{ου} αιώνα.

Οι αναλύσεις στις τάσεις σύντομων επεισοδίων (λίγων ημερών) του ακραίου θερμού και ψυχρού καιρού στις ΗΠΑ, τον 20^ο αιώνα, δεν έδειξαν σημαντικές μεταβολές στη συχνότητα ή την έντασή τους. Επίσης, βρέθηκαν ενδείξεις για μια αύξηση στη συχνότητα των επεισοδίων καύσωνα, αλλά αρκετές περιοχές έχουν αντίθετες τάσεις (Σχ. 24c). Η ακραία θέρμανση των ΗΠΑ για διάφορα έτη της δεκαετίας '30 κυριαρχεί των χρονοσειρών των επεισοδίων καύσωνα στη περιοχή αυτή. Από την άλλη πλευρά, οι τάσεις στη συχνότητα των ακραίων προφανών θερμοκρασιών είναι σημαντικά μεγάλες για την περίοδο 1949-1995 κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού στο μεγαλύτερο μέρος των ΗΠΑ. Οι θερμές υγρές νύχτες ήταν διπλάσιες σε αριθμό τη περίοδο αυτή σε μερικές περιοχές. Οι τάσεις στις νυχτερινές θερμοκρασίες των ΗΠΑ, παρ' όλα αυτά, πιθανώς να σχετίζονται, εν μέρει, με την αύξηση της αστικοποίησης.

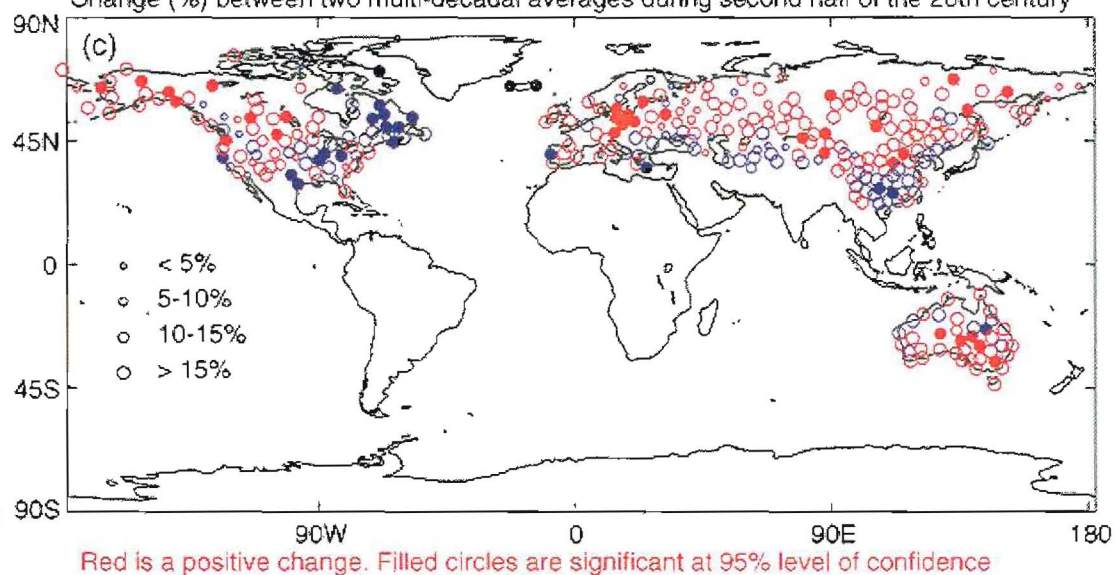
Κατά τη διάρκεια του 1997/98 El Nino γεγονός, οι καταγραφές της παγκόσμιας θερμοκρασίας ήταν ελλιπείς για 16 συνεχείς μήνες από το Μάιο του 1997 έως τον Αύγουστο του 1998. Αυτό χαρακτηρίζεται ως ένα ασυνήθιστο γεγονός και μια τέτοια μηνιαία 'σειρά' είναι πρωτοφανής για τις παρατηρούμενες καταγραφές.



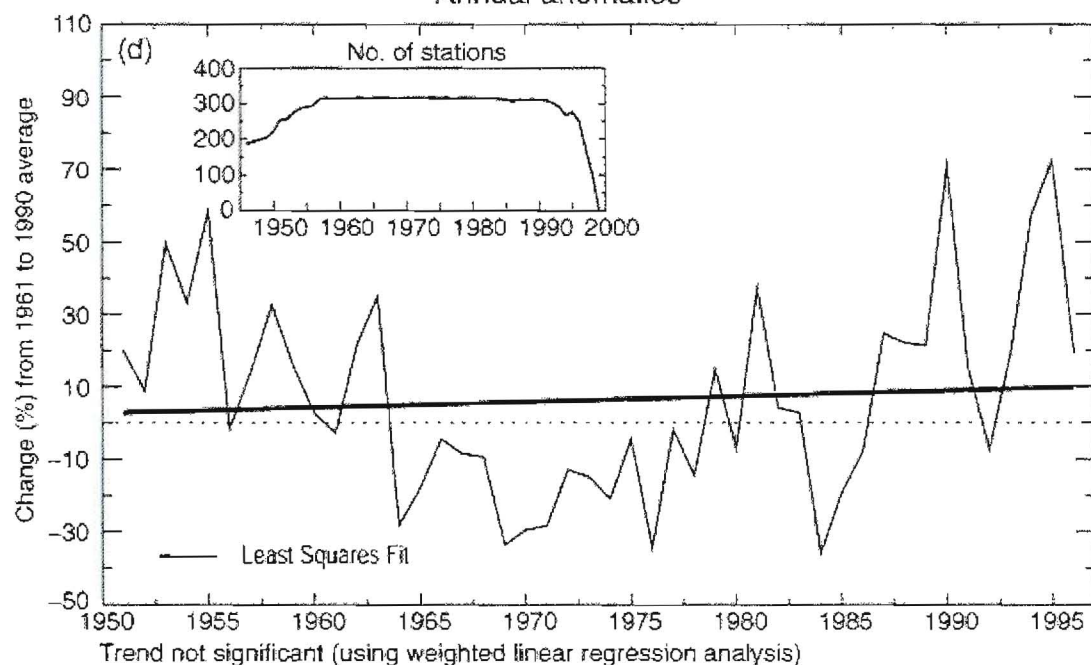
Σχήμα 24: Μεταβολές στον αριθμό των ημερών ολικού παγετού (a,b) και στη διάρκεια των κυμάτων θερμότητας (c,d). Το σχήμα (a) δείχνει τις ποσοστιαίες μεταβολές του ολικού αριθμού των ημερών με την ελάχιστη θερμοκρασία κάτω του $0^{\circ}C$. Οι κόκκινοι κύκλοι δηλώνουν αρνητικές μεταβολές και οι μπλε τις θετικές. Το σχήμα (c) δείχνει τις ποσοστιαίες μεταβολές του μέγιστου αριθμού συνεχών ημερών με μέγιστη θερμοκρασία άνω των $5^{\circ}C$ την περίοδο 1961-1990. Οι κόκκινοι κύκλοι δηλώνουν θετικές μεταβολές και οι μπλε τις αρνητικές. Τα (b) και (d) δείχνουν τις μέσες ετήσιες τιμές ως ποσοστιαίες διαφορές των 1961- 1990 μέσων τιμών.

Heat Wave Duration Index

Change (%) between two multi-decadal averages during second half of the 20th century



Annual anomalies



Σχήμα 24: (Συνέχεια)

➤ Βροχόπτωση

Αρκετά δεδομένα έχουν αναλυθεί για να επιβεβαιώσουν μερικές από τις βασικές ιδιότητες των αλλαγών της ακραίας βροχόπτωσης. Μια ομάδα ερευνητών ανέπτυξε ένα απλό μοντέλο της συχνότητας της ημερήσιας βροχόπτωσης βασισμένη στη 'γάμμα' κατανομή. Εφάρμοσαν το μοντέλο αυτό σε μία πληθώρα περιοχών ανά τον κόσμο (40% της παγκόσμιας ξηράς) κατά την εποχή της έντονης βροχόπτωσης. Η περίοδος ανάλυσής τους ποίκιλε από περιοχή σε περιοχή. Σε ένα μοντέλο, η μέση ολική βροχόπτωση είναι επίσης ανάλογη με τις παραμέτρους μορφής και κλίμακας της 'γάμμα' κατανομής, καθώς και με τη πιθανότητα βροχόπτωσης σε κάθε δοσμένη μέρα. Η παράμετρος μορφής τείνει να είναι σχετικά σταθερή κατά μήκος ενός ευρέος ρυθμού βροχομετρικού συστήματος, σε αντίθεση με τη παράμετρο κλίμακας. Είναι πιθανό να διευκρινιστούν οι σχέσεις μεταξύ των μεταβολών της μέσης ολικής βροχόπτωσης, τη πιθανότητα βροχόπτωσης, και τις μεταβολές στην έντονη βροχόπτωση (Σχ. 25). Χωρίς τη μεταβολή στη συχνότητα βροχόπτωσης, μια 10% μεταβολή της μέσης ολικής βροχόπτωσης ενισχύεται με μια μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή στους ρυθμούς έντονης βροχής, σε σύγκριση με την μεταβολή της μέσης τιμής. Για πολλές περιοχές φαίνεται ότι οι μεταβολές στη συχνότητα ή την πιθανότητα των επεισοδίων βροχόπτωσης είναι είτε αρκετά μικρές, είτε καλά εκφρασμένες στους υψηλούς ρυθμούς της, απ' ό,τι μια αύξηση της μέσης ολικής βροχόπτωσης που επηρεάζει δυσανάλογα τους αυξανόμενους ρυθμούς έντονης βροχόπτωσης (Σχ. 26).

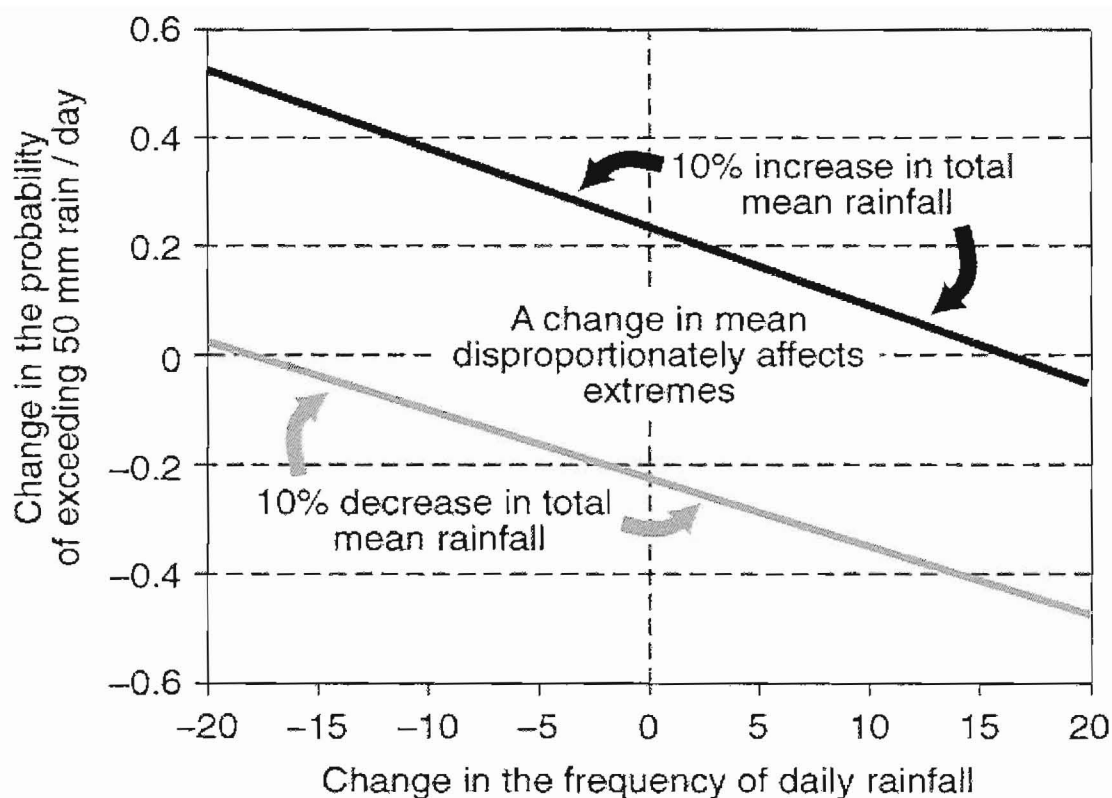
Κατά τον 20^ο αιώνα, γνωρίζοντας τους τύπους μεταβολής της μέσης ολικής βροχόπτωσης, προβλέπεται γενικά για τις περιοχές με αυξανόμενη μέση ολική βροχόπτωση, ότι η ποσοστιαία αύξηση των ρυθμών της θα έπρεπε να είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Τοπικές αναλύσεις

- της ετήσιας βροχόπτωσης στις ΗΠΑ, στον Καναδά, στην Ιαπωνία
- της χειμερινής βροχόπτωσης στην Αγγλία, και
- της περιόδου βροχόπτωσης στη Νορβηγία, στην Ν.Αφρική, στη Βραζιλία και την πρώην Σοβιετικής Ένωσης

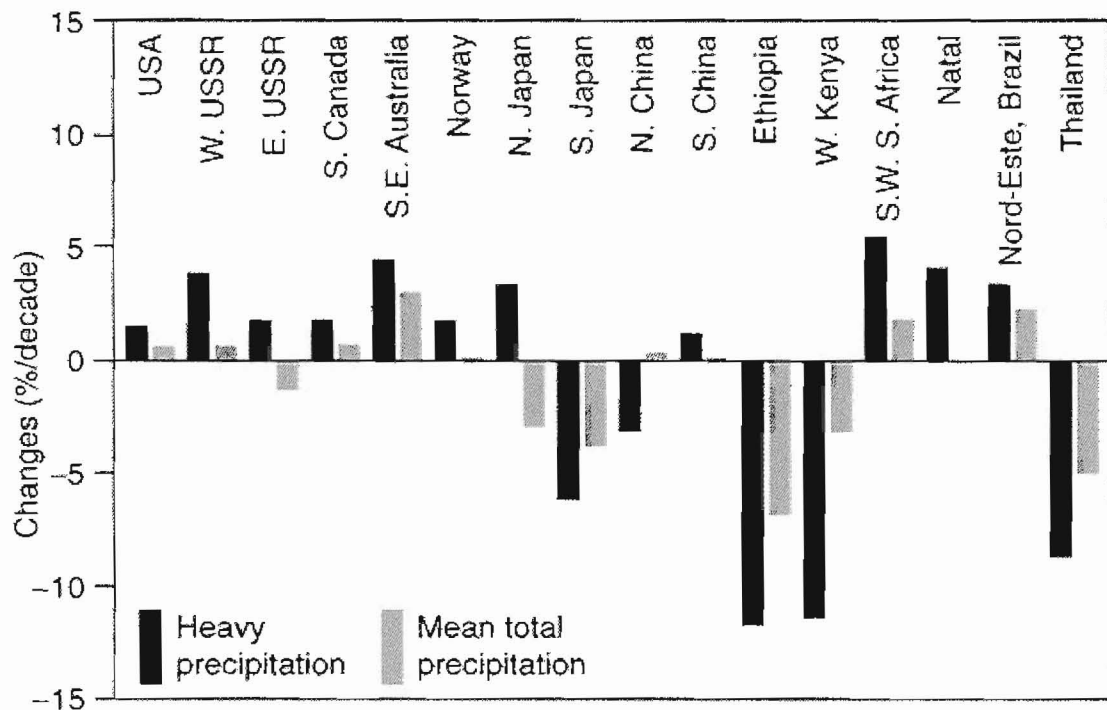
επιβεβαιώνουν το χαρακτηριστικό της αύξησης των έντονων και ακραίων γεγονότων.

Από τότε που η βροχόπτωση άρχισε να αυξάνεται σε μεγάλα τμήματα περιοχών ξηράς των μέσων και μεγάλων γεωγραφικών πλατών, κατά το β' μισό του 20^{ου} αιώνα, τίθεται το ερώτημα για το πόσο επηρεάζεται η περιοχή αυτή από τις αυξήσεις στους ρυθμούς της έντονης και ακραίας βροχόπτωσης. Μία ανάλυση προτείνει μια γενική αύξηση στη περιοχή που επηρεάζεται από την έντονη ημερήσια βροχόπτωση. Το Σχ. 27 δείχνει ότι τμήματα των μέσων και μεγάλων γεωγραφικών πλατών έχουν τοπικά στατιστικά σημαντικές αυξήσεις στην αναλογία της μέσης ετήσιας ολικής βροχόπτωσης και στην ετήσια μέγιστη, συνεχή για 5 ημέρες, βροχόπτωση. Τοπικές αναλύσεις σε Ρωσία, ΗΠΑ και οπουδήποτε αλλού επιβεβαιώνουν τη τάση αυτή. Παρόλο που οι τάσεις είναι ομοιόμορφες, περίπου το 10% από τις αναλύσεις των σταθμών δείχνουν στατιστικά σημαντικές αυξήσεις στο επίπεδο του 5%. Αυτό ισοδυναμεί με μία περίπου 4% αύξηση της ετήσιας μέγιστης (5-ημέρες συνεχή) ολικής βροχόπτωσης (Σχ. 27b). Ο αριθμός των σταθμών που κατέγραψαν μία τοπικά σημαντική αύξηση της αναλογίας της ολικής ετήσιας βροχόπτωσης, υπερτερεί αυτών με τις σημαντικά καθοδικές τάσεις, κατά άνω του 3 προς 1 (Σχ. 27c). Υπάρχει μια 1% αύξηση στην αναλογία των ημερήσιων επεισοδίων βροχόπτωσης που συμβαίνει στις ανώτερα 5 ποσοστιαίες μονάδες (Σχ. 27d). Γενικά είναι πιθανό να έχει συμβεί μια 2-4% αύξηση στον αριθμό επεισοδίων έντονης βροχόπτωσης κατά μέσο όρο, κατά μήκος των μέσων και μεγάλων γεωγραφικών πλατών.

Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η επιρροή των υψηλότερων θερμοκρασιών και των αυξανόμενων υδρατμών στην ατμόσφαιρα δεν είναι ανεξάρτητα γεγονότα, και πιθανώς να σχετίζονται με τις αυξήσεις στα επεισόδια έντονης και ακραίας βροχόπτωσης.



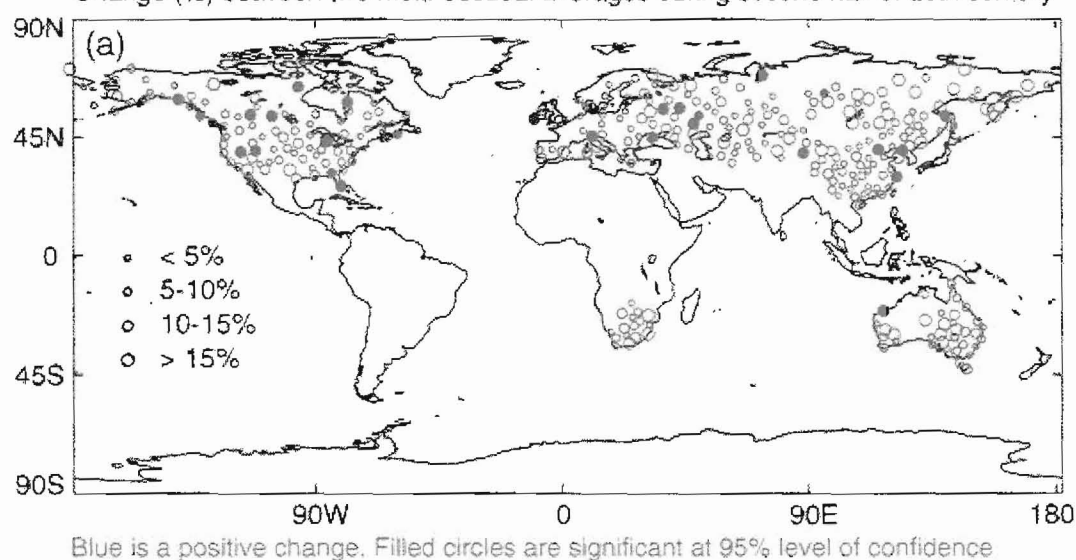
Σχήμα 25: Ένα παράδειγμα της ευαισθησίας της συχνότητας της έντονης ημερήσιας βροχόπτωσης με τη μετατόπιση στη μέση ολική βροχόπτωση.



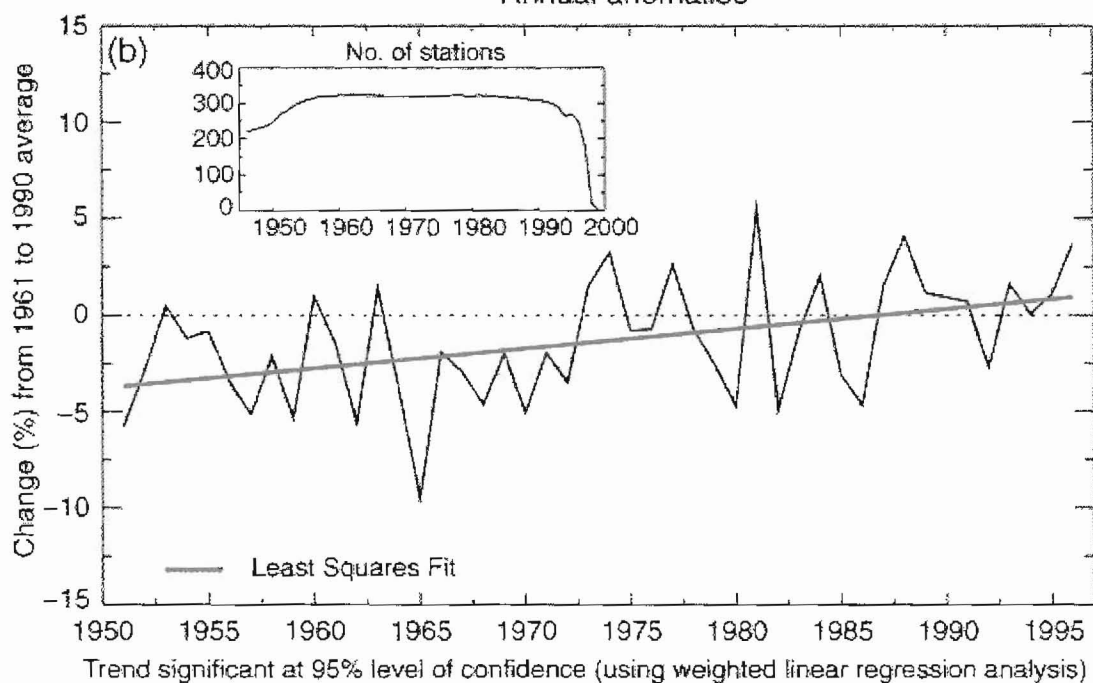
Σχήμα 26: Γραμμικές τάσεις (%/δεκαετία) της έντονης βροχόπτωσης και της ολικής βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου για διάφορες περιοχές του πλανήτη. Παρατηρείται ότι τα μεγέθη των μεταβολών των συχνοτήτων έντονης βροχόπτωσης είναι πάντα υψηλότερα από τις μεταβολές της μέσης βροχόπτωσης.

Max. 5 day precipitation total

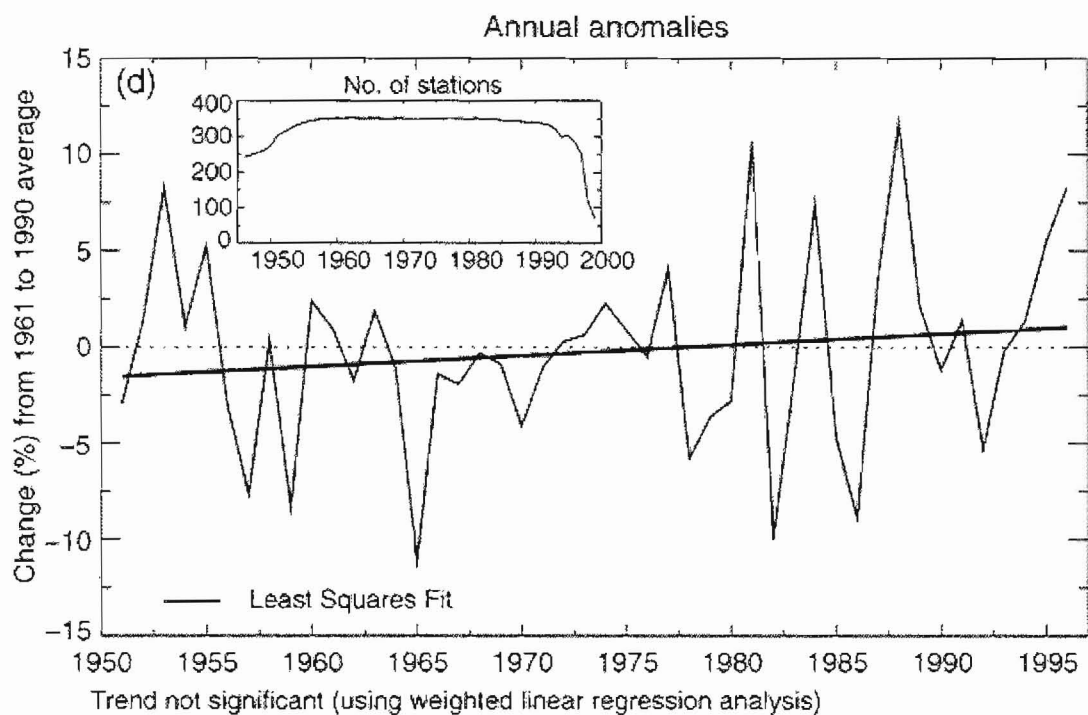
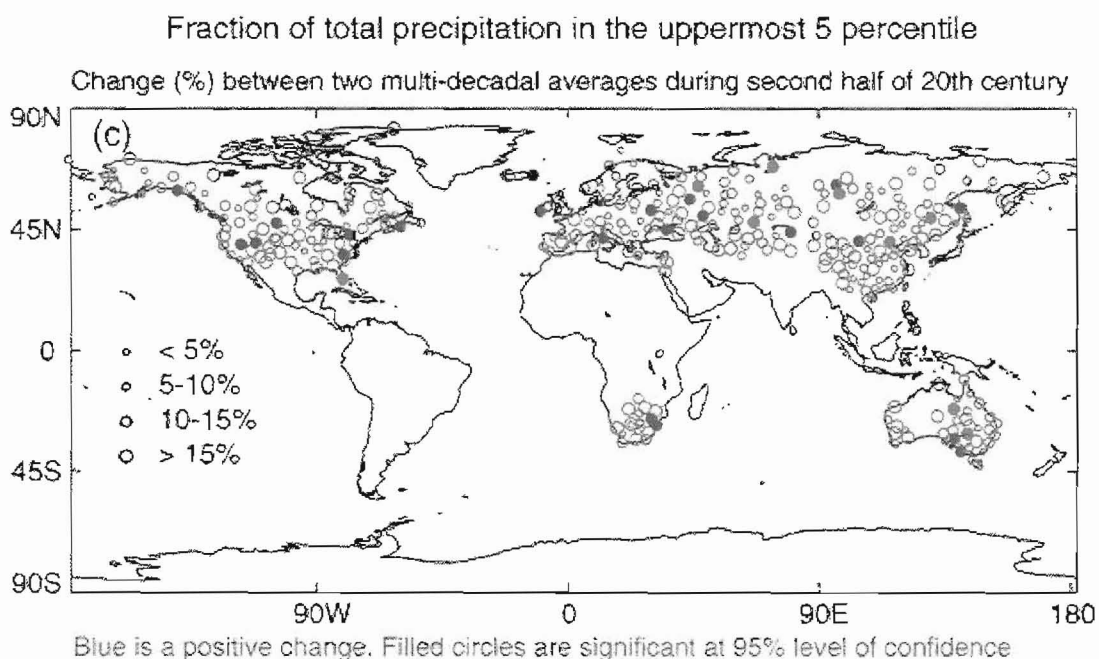
Change (%) between two multi-decadal averages during second half of 20th century



Annual anomalies



Σχήμα 27: Μεταβολές στην ολική μέγιστη ημερήσια 5-ημερών βροχόπτωση (a,b) και στην αναλογία της ετήσιας βροχόπτωσης που εμφανίζονται τις ημέρες όπου το 95% της ημερήσιας βροχόπτωσης καθορίζεται την περίοδο 1961-1990 (c,d). Τα σχήματα (a) και (c) δείχνουν τις ποσοστιαίες μεταβολές των παραπάνω ποσοτήτων μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου μισού της περιόδου 1946-1999. Και στα δύο οι κόκκινοι κύκλοι δηλώνουν τις αρνητικές μεταβολές και οι μπλε, τις θετικές. Τα σχήματα (b) και (d) δείχνουν τις μέσες ετήσιες τιμές των ποσοτήτων ως ποσοστιαίες διαφορές από τις μέσες τιμές της περιόδου 1961-1990.



Σχήμα 27: (Συνέχεια)

Υπάρχουν ενδείξεις για μεταβολές στα ακραία καιρικά φαινόμενα ή στα κλιματικά γεγονότα?

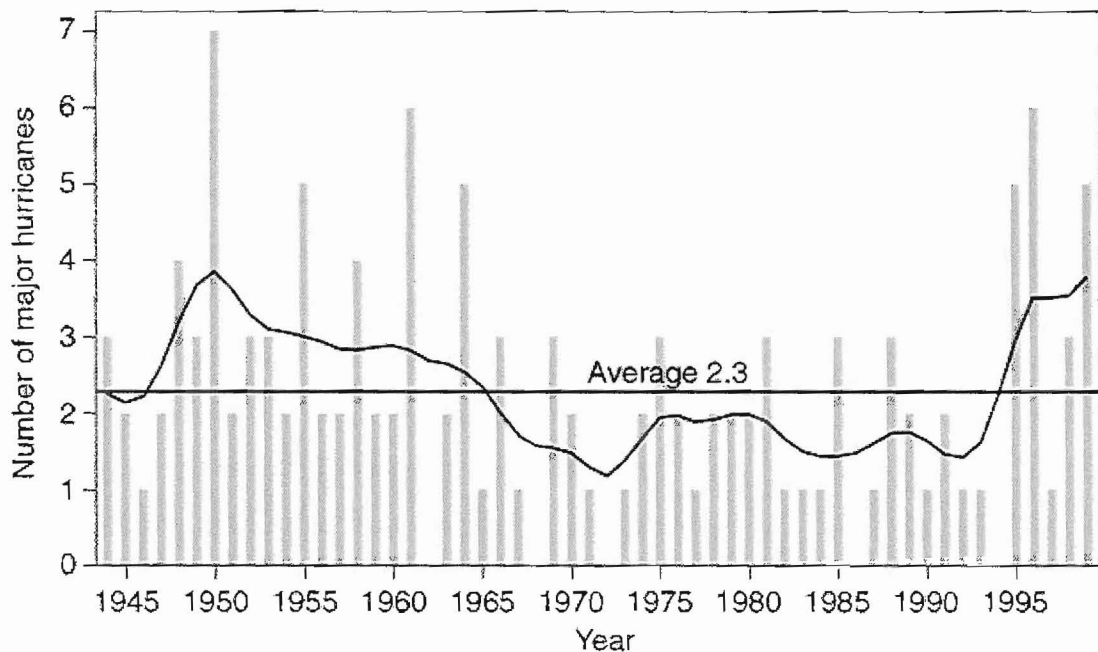
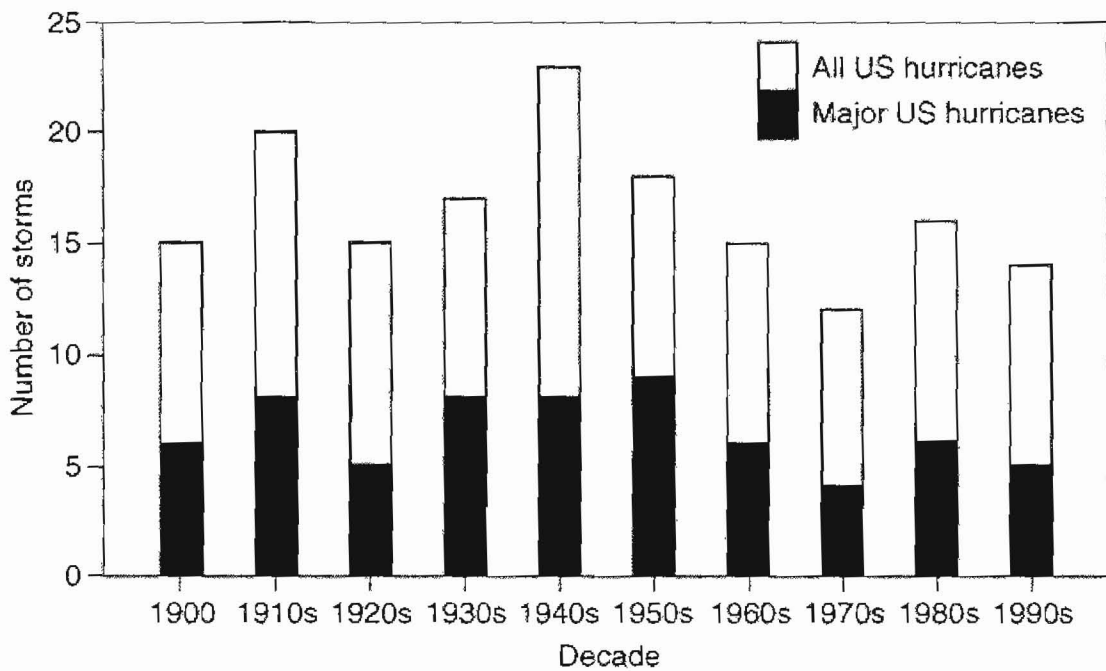
Σε αυτό το τμήμα προσδιορίζονται οι μεταβολές στην ένταση και στη συχνότητα των διάφορων καιρικών φαινομένων. Μία σημαντική άποψη της μεταβολής σχετίζεται με τις αλλαγές στις κατηγορίες των καταιγίδων. Οι έντονες καταιγίδες είναι σπάνιες και η ανάλυση καταγραφής μεγάλου μήκους καταιγίδων σε μεγάλες περιοχές απαιτεί τον προσδιορισμό των μεταβολών. Μέχρι στιγμής ο συνδυασμός των δεδομένων δεν είναι δυνατός.

➤ Τροπικοί κυκλώνες

Εδώ, λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές στους τροπικούς κυκλώνες κατά μήκος των διάφορων ωκεάνιων λεκανών και αυτών που επηρεάζουν τις γειτονικές ηπείρους. Ο ΒΑ υποτροπικός Ειρηνικός ωκεανός δέχθηκε μια σημαντική ανοδική τάση στη συχνότητα των τροπικών κυκλώνων, αλλά επιπλέον δεδομένα από εκείνη τη περίοδο δε δείχνουν καμιά ουσιώδη τάση. Δεν υπάρχει καμία αξιόλογη μεταβλητότητα στον ολικό αριθμό των τροπικών έντονων καταιγίδων που παρατηρήθηκαν στο Β.Ινδικό, στο ΝΔ Ινδικό και τον ΝΔ Ειρηνικό ωκεανό ανατολικά των 160° Α. Για τον ΒΑ Ειρηνικό ωκεανό, βρέθηκε ότι η συχνότητα των τυφώνων και το σύνολο των τροπικών καταιγίδων και τυφώνων έχει μεταβληθεί από το 1980 περίπου. Καμία ανάλυση δεν έχει γίνει για τη συχνότητα των ισχυρών τυφώνων (με ανέμους ταχύτητας > 50 m/s) εξαιτίας μιας υπερεκτίμησης της έντασης τέτοιων καταιγίδων στα τέλη των δεκαετιών '50 και '60.

Έχει γίνει μια εκτενής ανάλυση της λεκάνης του Β.Ατλαντικού και ολόκληρης της λεκάνης το 1994. Επίσης, έγιναν μελέτες για τις τροπικές καταιγίδες και τους τυφώνες στα περιθώρια των ΗΠΑ το 1899. Η καταγραφή της συχνότητας και της έντασης των τυφώνων στα περιθώρια αυτά είναι πολύ αξιόπιστη λόγω της διαθεσιμότητας των μετρήσεων της κεντρικής πίεσης εκεί. Και τα δύο δεδομένα συνεχίζουν να δείχνουν σημαντική ενδοδεκαετή μεταβλητότητα, αλλά με όχι αρκετά σημαντική τάση (Σχ. 28).

Ενεργά έτη εμφανίστηκαν από τα τέλη της δεκαετίας '40 έως τα μέσα της '60, 'μη ενεργά' από την '70 έως τις αρχές της '90, και μετά υπήρξε μια μετατόπιση σε ενεργές συνθήκες από το 1995 μέχρι το 1999. Ταυτόχρονα με αυτές τις μεταβολές στη συχνότητα, υπήρξαν περίοδοι με αξιοσημείωτη ένταση στους τροπικούς κυκλώνες του Β.Ατλαντικού ωκεανού (μέσα δεκαετίας '40-'60 και 1995-1999) και ασθενή ένταση (1970-αρχές 1990). Υπάρχει μια στενή συσχέτιση μεταξύ της έντασης των τυφώνων του Β.Ατλαντικού και αυτών στα περιθώρια των ΗΠΑ (Σχ. 28).



Σχήμα 28: Άνω: δεκαετίες αποκλίσεις σε τυφώνες στα περιθώρια των ΗΠΑ.

Κάτω: Ενδοετήσια μεταβλητότητα στον αριθμό των ισχυρών τυφώνων και η μακράς περιόδου μέση τιμή κατά μήκος του Β.Ατλαντικού ωκεανού.

➤ Εξωτροπικοί κυκλώνες

Οι κυκλώνες αυτοί είναι συστήματα χαμηλής πίεσης που εμφανίζονται στα μέσα γεωγραφικά πλάτη και στα δύο ημισφαίρια. Η δυναμική τους που

προκαλεί ολικές καταστροφές κυρίως ως χειμερινές καταιγίδες, είναι καλά τεκμηριωμένη, με το κύριο ενδιαφέρον να βρίσκεται στους ανέμους. Στη θέση των άμεσων καταγραφών των ανέμων που έχουν έλλειψη οργάνωσης, μεθοδολογίας και έκθεσης, οι βασισμένες σε κλίσεις των SLP τιμές είναι περισσότερο σχετικές για εμφανείς μακροχρόνιες μεταβολές. Πάνω από τους ωκεανούς οι επιπρόσθετες μετρήσεις των υψών των κυμάτων και της παλίνρροιας παρέχουν επιπλέον τρόπους έμμεσων μεταβολών της έντασης και της συχνότητας των εξωτροπικών καταιγίδων. Δεν έχουν επιτευχθεί παγκόσμιες αναλύσεις των μεταβολών αυτών, αλλά έχουν γίνει διάφορες μελέτες μεγάλης κλίμακας. Μελέτες αρκετών επιστημόνων έχουν δείξει μία αύξηση των έντονων φαινομένων των ανέμων γύρω και προς τη Βόρεια Θάλασσα. Η ομάδα WASA ερεύνησε τις μεταβολές στο θαλάσσιο επίπεδο που είναι σχετικές με τη καταιγίδα στο ΝΑ τμήμα της Βόρειας Θάλασσας. Δεν βρήκαν μια μακροπρόθεσμη τάση τα τελευταία 100 έτη, αλλά μια αύξηση καταιγίδων το 1960, που σχετίζεται με την αύξηση του γεωστροφικού ανέμου. Αυτή η αύξηση σχετίζεται με μεταβολές της Κύμανσης Β.Ατλαντικού (ΝΑΟ) (Σχ. 21). Μερικές αναλύσεις επικεντρώθηκαν σε ημισφαιρικές μεταβολές της κυκλωνικής δραστηριότητας. Έχει βρεθεί μια σημαντική αύξηση της έντασης των εξωτροπικών καταιγίδων κυρίως τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Οι ωριαίες τιμές του επιπέδου του νερού παρέχουν μοναδικές καταγραφές των τροπικών και εξωτροπικών καταιγίδων. Οι επιστήμονες ανέλυσαν 100ετείς καταγραφές κατά μήκος του Ειρηνικού ωκεανού και των ΗΠΑ. Υπολογίστηκαν διαφορετικές μετρήσεις της έντασης της καταιγίδας, αλλά δεν βρέθηκαν μακροχρόνιες τάσεις. Από την άλλη πλευρά, βρέθηκε ότι η αύξηση του επιπέδου της θάλασσας την τελευταία δεκαετία έντεινε τη διάβρωση της παραλίας και την πλημμύρα από πρόσφατες καταιγίδες, οι οποίες έναν αιώνα πριν θα προκαλούσαν λιγότερη καταστροφή.

Άλλο 'proxy' δεδομένο για την ένταση των κυμάτων είναι το ύψος των κυμάτων. Διάφορες μελέτες αναφέρουν αυξανόμενο ύψος τις τελευταίες τρεις δεκαετίες στο Β.Ατλαντικό ωκεανό (περίπου 2.5 cm/έτος) και τα παράλια, παρόλο που οι μακροχρόνιες τάσεις δεν είναι εμφανείς.

Φαίνεται ότι πρόσφατη μελέτη δείχνει αυξήσεις της δραστηριότητας των εξωτροπικών κυκλώνων κατά τη διάρκεια του β' μισού του 20^{ου} αι. στο

Β.Ημισφαίριο και μειωμένη δραστηριότητα στο Ν.Ημισφαίριο. Παρ' όλα αυτά, οι μηχανισμοί που περιλήφθηκαν δεν είναι εμφανείς και δεν είναι σίγουρο αν οι τάσεις είναι πολυδεκαετείς διακυμάνσεις, ή μέρος μιας μακροχρόνιας τάσης. Επιπλέον, η δραστηριότητα του κυκλώνα στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη του Ν.Ημισφαιρίου που μειώνεται με τη πάροδο του χρόνου, δεν είναι σχετική με την αύξηση στη θετική φάση της Ανταρκτικής Κύμανσης τα τελευταία 15 έτη. Ένα πιο βασικό ερώτημα είναι εάν περιμένουμε περισσότερους ή λιγότερους εξωτροπικούς κυκλώνες με μεγαλύτερη θέρμανση. Κάποιοι επισημαίνουν ότι οι αυξήσεις της υγρασίας καθώς αυξάνεται η θέρμανση επαυξάνουν τους κυκλώνες αυτούς. Άλλοι δηλώνουν ότι οι κυκλώνες μεταφέρουν ενέργεια πιο επαρκώς σε μια υγρή ατμόσφαιρα, άρα απαιτούνται λιγότεροι σε αριθμό.

➤ Ξηρασία και υγρή περίοδος

Στη SAR, προτάθηκε ότι θα συμβεί μια αύξηση του υδρολογικού κύκλου προτάθηκε ότι θα συμβεί, όπως και η παγκόσμια θερμάνση. Η μέτρηση μιας τέτοιας αύξησης χρησιμοποιείται για να εξετάσει τον λόγο που η συχνότητα των ξηρών και υγρών περιόδων αυξάνεται. Οι μακροχρόνιες παγκόσμιες τάσεις από το 1900 έως το 1995 είναι μικρές για σημαντικά στατιστικά στοιχεία ξηρών και υγρών περιοχών. Παρ' όλα αυτά, κατά τη διάρκεια των τελευταίων 2-3 δεκαετιών, υπήρξαν μερικές παγκόσμιες αυξήσεις σε συνδυασμό με τις έντονα ξηρές και υγρές περιοχές. Αυτές προήλθαν από αυξήσεις είτε σε ξηρές περιοχές, π.χ. πάνω από την Ανατ.Ασία και Ν.Αφρική, είτε σε υγρές, π.χ. πάνω από ΗΠΑ και Ευρώπη. Οι περισσότερες αυξήσεις εμφανίστηκαν μετά το 1970. Μελέτες έδειξαν ότι στο μεγαλύτερο μέρος των μέσων και μεγάλων γεωγραφικών πλατών υπήρξε μια στατιστικά σημαντική αύξηση με βροχόπτωση κατά το β' μισό του 20^{ου} αιώνα.

Οι πρόσφατες μεταβολές σε περιοχές έντονης ξηρασίας ή υγρών περιόδων είναι στενά συνδεδεμένες με την μετατόπιση της ENSO προς θερμότερα γεγονότα στα τέλη της δεκαετίας '70 και συμπίπτουν με τη καταγραφή παγκόσμιων υψηλών θερμοκρασιών.

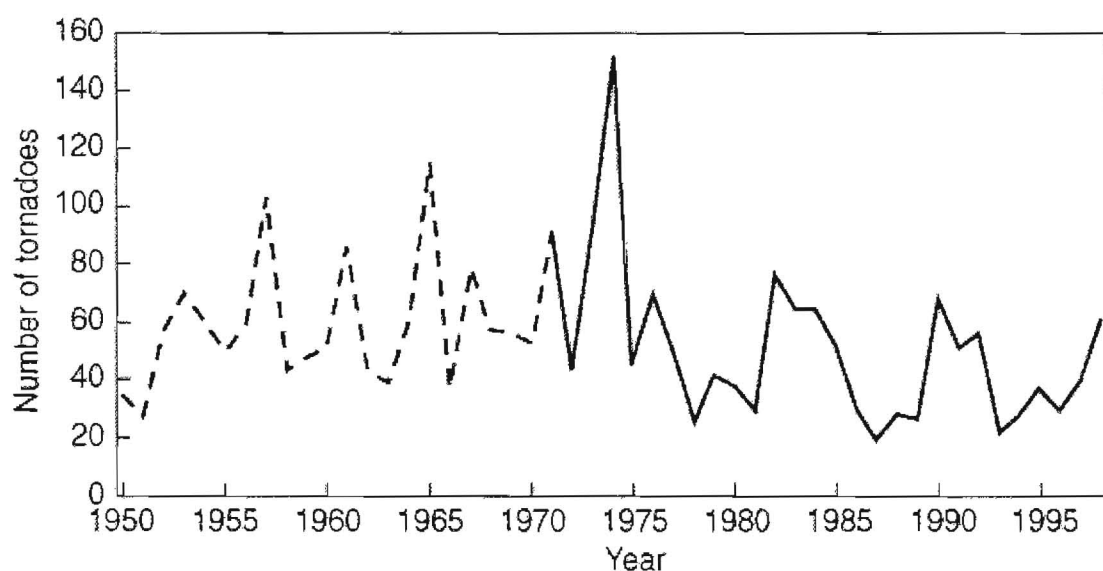
➤ **Ανεμοστρόβιλοι, χαλάζι και άλλα έντονα τοπικά καιρικά φαινόμενα**

Τα μικρής κλίμακας έντονα καιρικά φαινόμενα (SCSWP) χαρακτηρίζονται, αρχικά, από εν μέρει χρονικά και χωρικά γεγονότα. Αυτά τα γεγονότα έχουν τοπικές και χωρικές επιδράσεις, συχνά με σημαντική καταστροφή και μερικές φορές με απώλειες ζωής. Οι ανεμοστρόβιλοι και οι καταιγίδες είναι φαινόμενα που σχετίζονται με τις αστραπές, το χαλάζι και τον άνεμο. 'Υπό το φως' της ισχυρής μεταβλητότητας των SCSWP, η πυκνότητα των επιφανειακών μετεωρολογικών παρατηρήσεων από σταθμούς είναι πολύ δύσκολη ώστε να μετρηθούν όλα αυτά τα γεγονότα. Τα στατιστικά των σχετικών σπάνιων γεγονότων δεν είναι σταθερά σε μονούς σταθμούς. Οι παρατηρούμενες πρακτικές μπορούν να είναι υποκειμενικές και να αλλάζουν με τον καιρό, και τα κύρια σημεία των πρακτικών αυτών δεν είναι διαθέσιμα στους παρατηρητές. Γι' αυτούς τους λόγους, επιβλέποντας την εμφάνιση των τοπικών μέγιστων και ελάχιστων σε ομαλές SCSWP σειρές, καθώς επίσης ελέγχοντας τις τάσεις του ίδιου τύπου για διαφορετικά αλλά σχετικά SCSWP (π.χ. καταιγίδες, χαλάζι) είναι σημαντικός ο έλεγχος αντιφάσεων. Εξαιτίας της έμφυτης δυσκολίας στη χρήση τέτοιων δεδομένων, έχουν υπάρξει σχετικά μεγάλης κλίμακας αναλύσεις των αλλαγών και μεταβολών σ' αυτά τα γεγονότα. Επιπλέον, μερικές χωρικές αναλύσεις έχουν ολοκληρωθεί από τη SAR.

Χωρικές αναλύσεις και πιο πρόσφατες παγκόσμιες αναλύσεις δείχνουν ότι υπάρχει μια σημαντική ενδοετήσια συσχέτιση μεταξύ χαλαζιού και κεραυνών, καθώς και των μέσων ελάχιστων θερμοκρασιών και των θερμοκρασιών υγρών θερμομέτρων. Χρησιμοποιώντας ζετή δεδομένα, βρέθηκε μια στατιστικά σημαντική σχέση μεταξύ της συχνότητας των κεραυνών και των θερμοκρασιών υγρών θερμομέτρων. Αποδείχτηκε ότι με αύξηση 1° C στην παγκόσμια θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου, υπάρχει μια αύξηση 40% στη δραστηριότητα των κεραυνών με μεγαλύτερες αυξήσεις πάνω από τις περιοχές του Β.Ημισφαιρίου (56%). Δυστυχώς, υπάρχουν λίγα δεδομένα που αναλύθηκαν για τους κεραυνούς και σχετικά φαινόμενα όπως χαλάζι ή καταιγίδες, για τον υπολογισμό πολύ-δεκαετιών, παγκόσμιων και ανά ημισφαίριο τάσεων.

Μία χωρική ανάλυση προσδιορίζει τις προσωρινές κυμάνσεις και τάσεις των εμφανίσεων χαλαζιού και καταιγίδας κατά τη 100ετή περίοδο, από το 1896 έως το 1995, προερχόμενες από προσεκτικές καταγραφές 67 σταθμών, οι οποίοι είναι κατανεμημένοι κατά μήκος των ΗΠΑ. Γενικά, η συχνότητα της χαλαζόπτωσης δείχνει μια γενική μείωση στις ΗΠΑ τον τελευταίο αιώνα. Έτσι, παρ' όλη την αύξηση της ελάχιστης θερμοκρασίας άνω του 1° C από το 1990 και την αύξηση των υδρατμών της τροπόσφαιρας στη περιοχή αυτή από το 1973 (όταν οι καταγραφές θεωρούνται αξιόπιστες), δεν βρέθηκε καμία συστηματική αύξηση των ημερών χαλαζιού ή καταιγίδων.

Από το 1920, ο αριθμός των ανεμοστρόβιλων που καταγράφονται ετησίως στις ΗΠΑ έχει αυξηθεί. Περιορίζοντας την ανάλυση σε πολύ ισχυρούς και βίαιους ανεμοστρόβιλους, καταλήγουμε σε πολύ διαφορετικές εκτιμήσεις (Σχ. 29). Έτσι, γίνεται φανερή μια μικρή μακροχρόνια μεταβολή, παρόλο που μερικά έτη όπως το 1974 δείχνουν έναν μεγάλο αριθμό ανεμοστρόβιλων. Η σειρά δεδομένων των 'σημαντικών' ημερών με ανεμοστρόβιλους δείχνει μια αργή αύξηση του αριθμού των ημερών με ισχυρούς ανεμοστρόβιλους από τις αρχές της δεκαετίας '20 μέχρι την '60, συνοδευόμενη από μείωση εκείνη τη περίοδο.



Σχήμα 29: Ο ετήσιος αριθμός των πολύ ισχυρών και βίαιων (F3-F5) ανεμοστρόβιλων που καταγράφηκε στις ΗΠΑ, με εκτιμώμενες ταχύτητες ανέμου περίπου 70 έως 164 m/s.

Συμπέρασμα

Βασισμένη σε νέες αναλύσεις από τη SAR, είναι πιθανό να υπήρξε μια ευρέως αύξηση των ισχυρά και έντονα επεισόδια βροχόπτωσης σε περιοχές όπου η ολική βροχόπτωση έχει αυξηθεί, π.χ. στα μέσα και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη του Β.Ημισφαιρίου. Οι αυξήσεις των μέσων όρων συχνά έχουν βρεθεί να ενισχύουν την ολική βροχόπτωση. Σε μερικές περιοχές, οι αυξήσεις στην ισχυρή βροχόπτωση έχουν προσδιοριστεί όπου η ολική βροχόπτωση έχει μειωθεί ή υπάρξει συνεχής, όπως στην Ανατ.Ασία. Αυτό έχει αποδοθεί σε μια μείωση στη συχνότητα της βροχόπτωσης. Λιγότερες περιοχές έχουν προσδιοριστεί, όπου οι μειώσεις στην ολική ετήσια βροχόπτωση σχετίζονται με μειώσεις στους υψηλότερους ρυθμούς βροχόπτωσης, αλλά μερικές έχουν βρεθεί. Η μεταβλητότητα της θερμοκρασίας έχει μειωθεί σε ενδο-εποχιακή και ημερήσια χρονοκλίμακα σύμφωνα με περιορισμένες τοπικές μελέτες. Νέες καταγραφές υψηλών νυχτερινών ελάχιστων θερμοκρασιών επιμηκύνουν την περίοδο ολικού παγετού σε πολλές περιοχές μέσων και μεγάλων γεωγραφικών πλατών. Η αύξηση των παγκόσμιων θερμοκρασιών ήταν κυρίως το αποτέλεσμα της σημαντικής μείωσης στη συχνότητα των, κάτω από το κανονικό, εποχιακών μέσων θερμοκρασιών σχεδόν σε όλο το πλανήτη, με μια αντίστοιχη μικρή αύξηση στη συχνότητα των άνω του κανονικού θερμοκρασιών. Υπάρχει μια μικρή ένδειξη των μακροχρόνιων μεταβολών της έντασης και της συχνότητας των τροπικών καταιγίδων, αλλά οι ενδοδεκαετείς μεταβολές είναι σαφείς. Εξαιτίας των ελλιπών δεδομένων και των σχετικά λίγων αναλύσεων, είναι αβέβαιο αν υπάρχει κάποια μεγάλης κλίμακας αύξηση της συχνότητας και της έντασης του εξωτροπικού κυκλώνα στο Β.Ημισφαίριο. Αν και συχνά, κάποιες ισχυρές πολύ-δεκαετείς μεταβολές και πρόσφατες αυξήσεις έχουν προσδιοριστεί σε μερικές περιοχές. Περιορισμένες ενδείξεις δείχνουν μια μείωση στη συχνότητα των κυκλώνων του Ν.Ημισφαιρίου από τις αρχές της δεκαετίας '70, αλλά υπήρχε μια 'παύση' στις αναλύσεις και στα δεδομένα. Πρόσφατες αναλύσεις των μεταβολών στα έντονα τοπικά καιρικά φαινόμενα (ανεμοστρόβιλοι, ημέρες καταιγίδων, κεραυνοί και χαλάζι) επιλεγμένων περιοχών, παρέχουν μη αξιόλογες ενδείξεις για συστηματικές μακροχρόνιες μεταβολές.