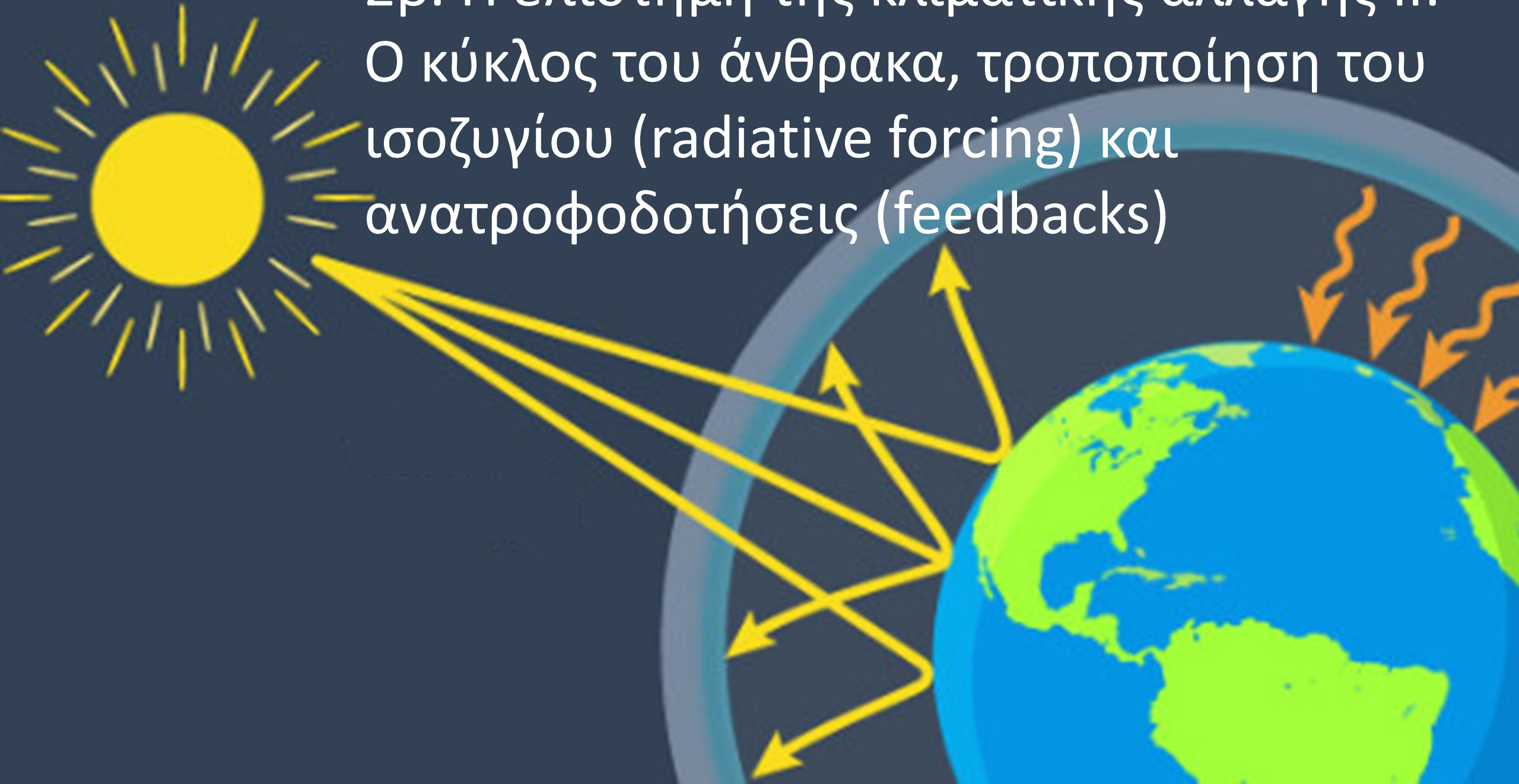
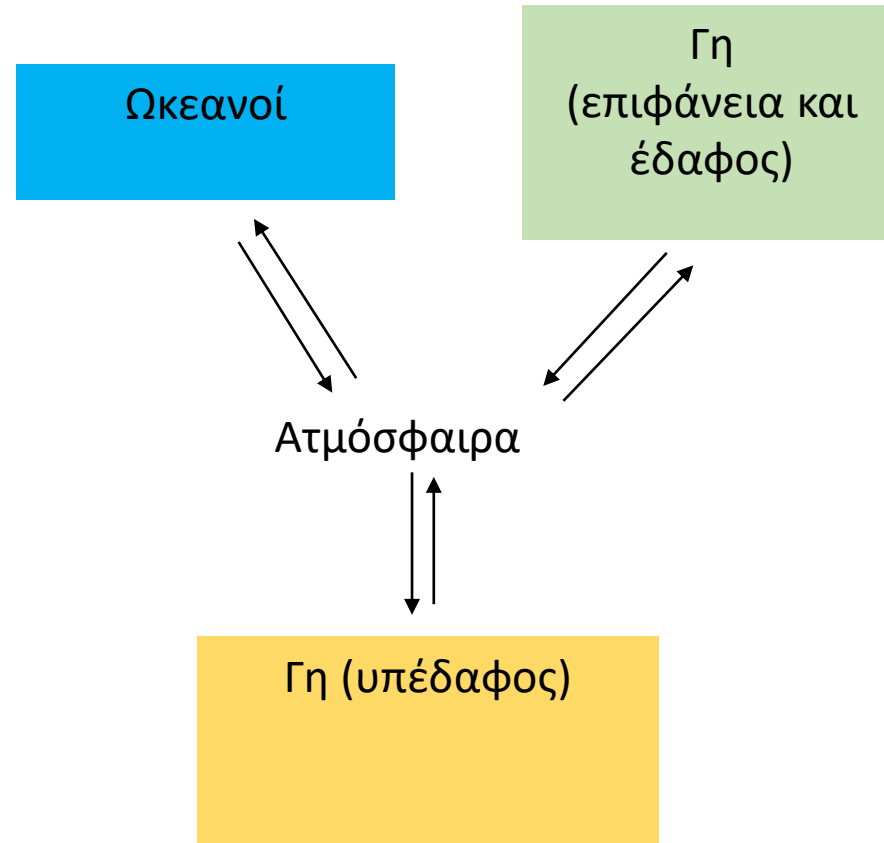


2β. Η επιστήμη της κλιματικής αλλαγής II:
Ο κύκλος του άνθρακα, τροποποίηση του
ισοζυγίου (radiative forcing) και
ανατροφοδοτήσεις (feedbacks)



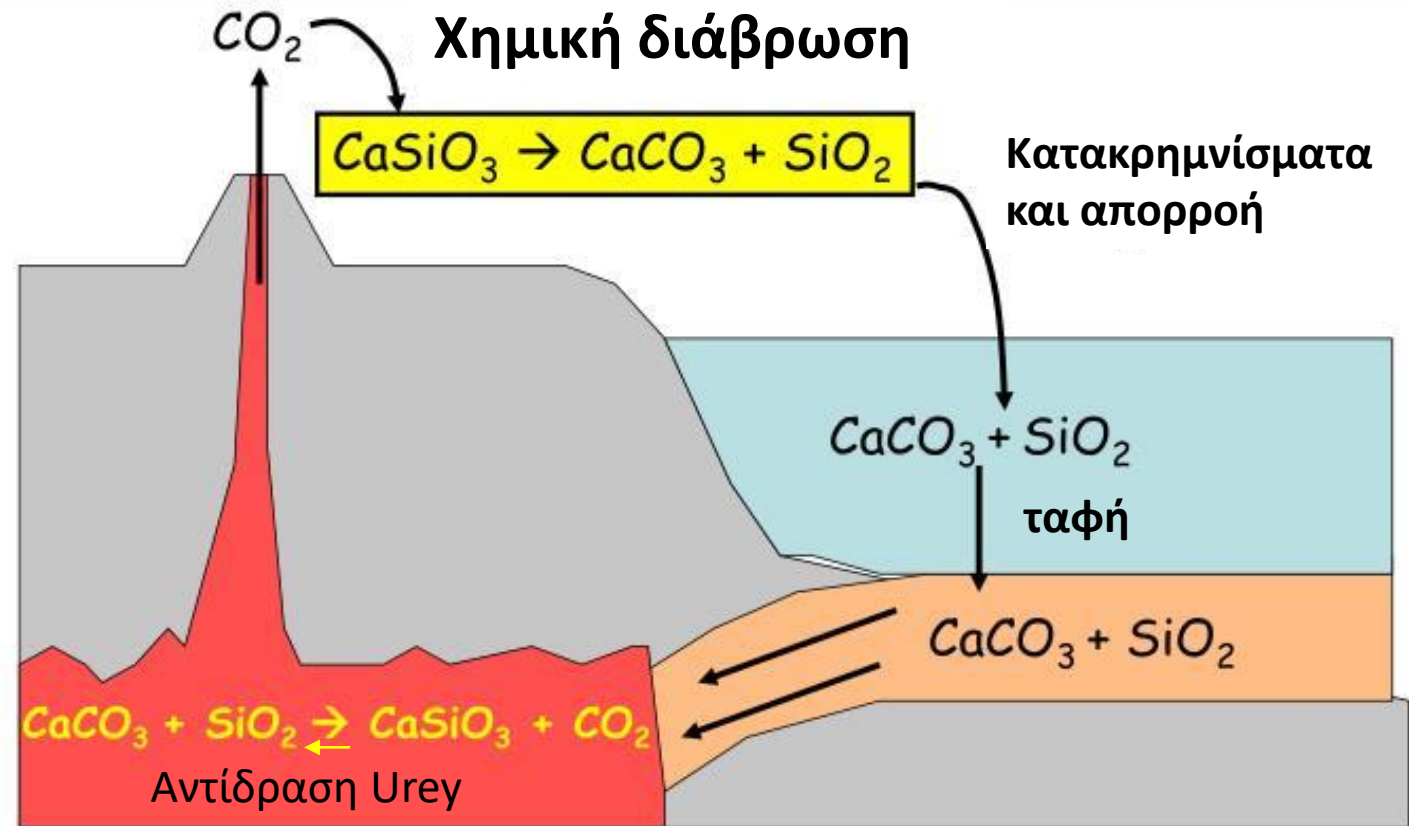
Η επιστήμη της κλιματικής αλλαγής II: Ο κύκλος του άνθρακα



Ο σταθεροποιητής της πυριτικής διάβρωσης

- Τα ηφαίστεια και άλλες πηγές εκλύουν διοξείδιο του άνθρακα που διαλυόμενο στο νερό (βροχή-απορροή) δίνει το λίγο όξινο ανθρακικό οξύ (H_2CO_3).
- Όταν αυτό επιδρά σε βράχους (πυριγενή πετρώματα) της μορφής CaSiO_3 , το διοξείδιο παράγει ασβεστόλιθο (CaCO_3) και διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2).
- Ο ασβεστόλιθος μετατοπίζεται σε βαθύτερα στρώματα του υπεδάφους όπου η υψηλότερες θερμοκρασίες (πύρωση) ευνοούν την αντίστροφη αντίδραση Urey που δημιουργεί διοξείδιο του άνθρακα και οξείδιο του ασβεστίου (μη εσβεσμένη άσβεστο).
- Η διάλυση του διοξειδίου του άνθρακα στο νερό και η δέσμευσή του σε πυριγενή πετρώματα για δημιουργία ασβεστόλιθου είναι ένας σταθεροποιητής στο αυξημένο διοξείδιο του άνθρακα όμως απαιτεί περιόδους εκατομμυρίων χρόνων.
- Η πυριτική διάβρωση ανταλλάσσει περίπου 0,1 GtC το έτος από την ατμόσφαιρα σε πετρώματα του υπεδάφους και έτσι εξισορροπεί τη δράση των ηφαιστειών.

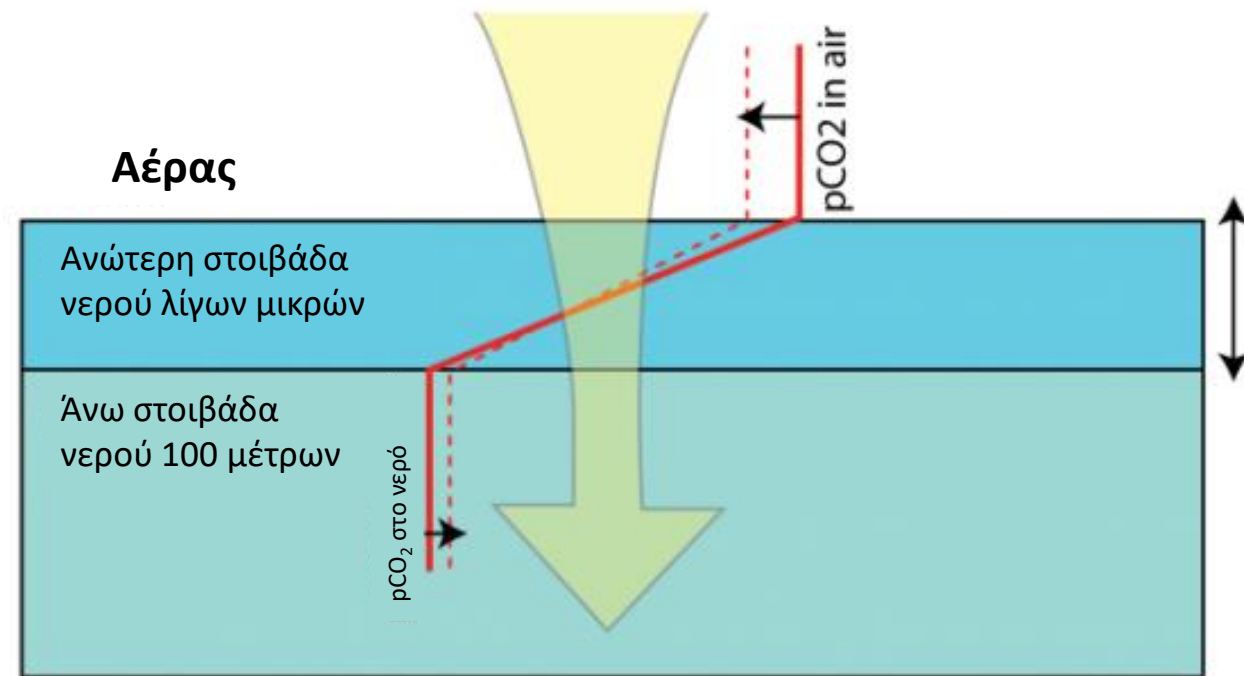
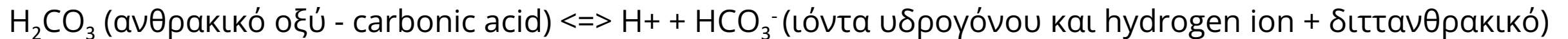
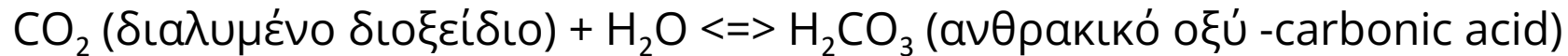
Ο Θερμοστάτης της Πυριτικής Διάβρωσης



Ο κύκλος είναι μακροπρόθεσμος στην κλίμακα των 0,5 – 1 εκατομμυρίων ετών.

Ανταλλαγή άνθρακα ωκεανός-ατμόσφαιρα

- Το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να διαλυθεί στο θαλασσινό νερό και μπορεί να απελευθερωθεί από το θαλασσινό νερό. Αυτή η μεταφορά διοξειδίου εμπρός και πίσω μεταξύ ενός υγρού και της ατμόσφαιρας είναι μια εξαιρετικά σημαντική διαδικασία στον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα, καθώς οι ωκεανοί είναι μια τεράστια δεξαμενή με δυνατότητα αποθήκευσης και απελευθέρωσης σημαντικών ποσοτήτων CO₂. Όταν το CO₂ από την ατμόσφαιρα έρχεται σε επαφή με το θαλασσινό νερό, μπορεί να διαλυθεί στο νερό όπου υφίσταται χημικές αντιδράσεις για να σχηματίσει μια σειρά προϊόντων, όπως περιγράφεται παρακάτω:



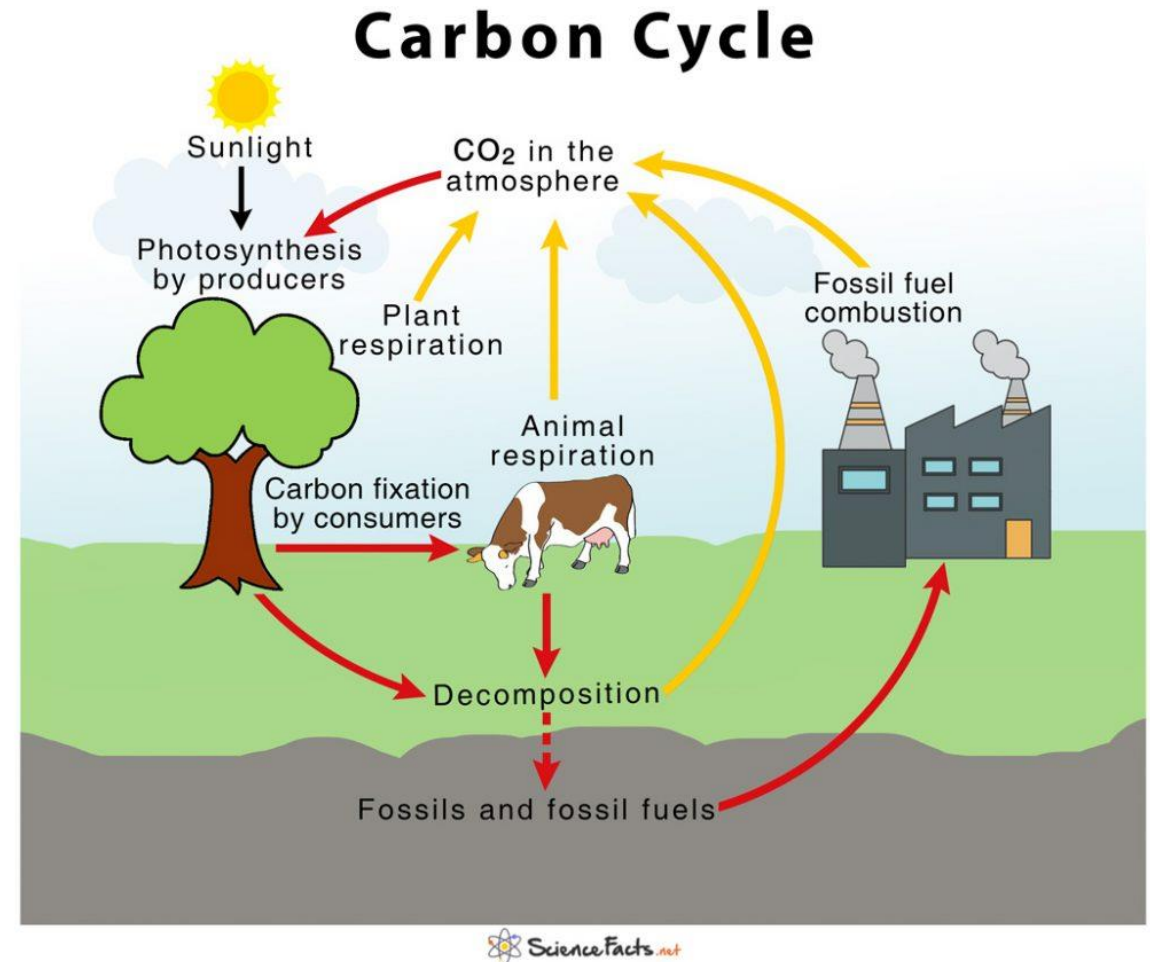
Ανάμεσα στην ατμόσφαιρα και την άνω στρώση των 100 μέτρων νερού ανταλλάσσονται 60 Gt άνθρακα.

Το σχήμα από την ιστοσελίδα της NASA:

<https://www.e-education.psu.edu/earth103/node/676>

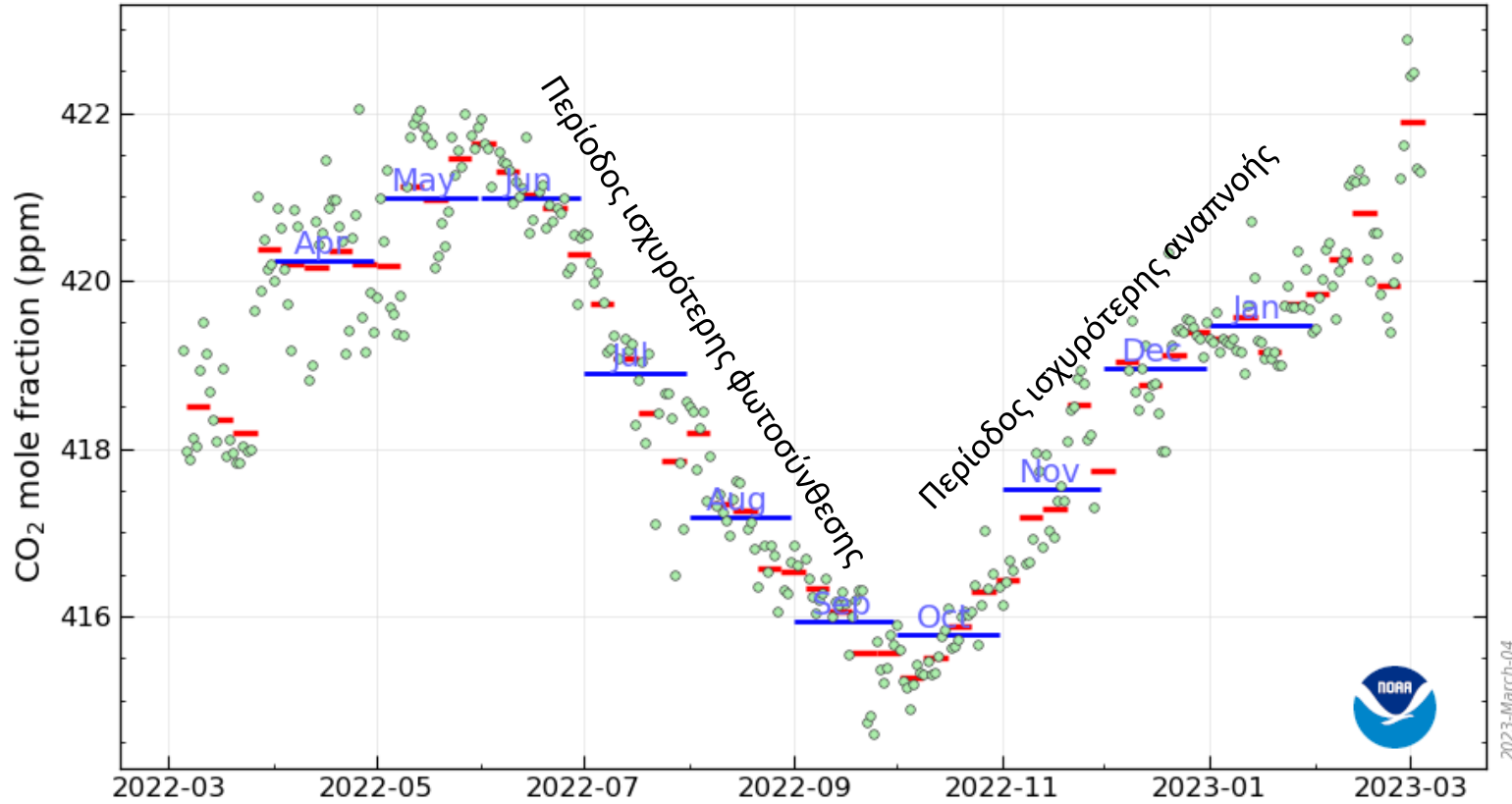
Ανταλλαγή άνθρακα Βιόσφαιρα-Ατμόσφαιρα

- Ο βιολογικός κύκλος του άνθρακα βασίζεται στη φωτοσύνθεση με την οποία οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί αφομοιώνουν το διοξείδιο του άνθρακα ή τα ανθρακικά άλατα από το περιβάλλον.
- Τα φυτά μετατρέπουν το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας σε ενώσεις με βάση τον άνθρακα (υδατάνθρακες) μέσω της φωτοσύνθεσης:
- $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{ηλιακη ακτινοβολια} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2$
- Τα βακτήρια, τα ζώα και οι άνθρωποι μετατρέπουν τους υδατάνθρακες σε διοξείδιο μέσω της αναπνοής για να παράξουν ενέργεια:
- $\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{ενεργεια}$
- Τα φυτά είναι επομένως πρωταρχικά υπεύθυνα για την παρουσία οξυγόνου της ατμόσφαιρας. Μόλις αφομοιωθεί ο άνθρακας από τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς, καθώς και από τα ζώα που τους τρώνε, απελευθερώνεται ξανά με τη μορφή διοξειδίου του άνθρακα καθώς αυτοί οι οργανισμοί αναπνέουν. Η απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα ή την υδρόσφαιρα ολοκληρώνει το βιολογικό μέρος του κύκλου του άνθρακα.
- Τα μονοπάτια του παγκόσμιου κύκλου του άνθρακα, ωστόσο, δεν είναι ποτέ πλήρως ισορροπημένα. Δηλαδή, ο άνθρακας δεν κινείται μέσα και έξω από όλα τα μέρη της βιόσφαιρας με ίσους ρυθμούς.



Ετήσια περιοδικότητα και μακροχρόνιες τάσεις της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα

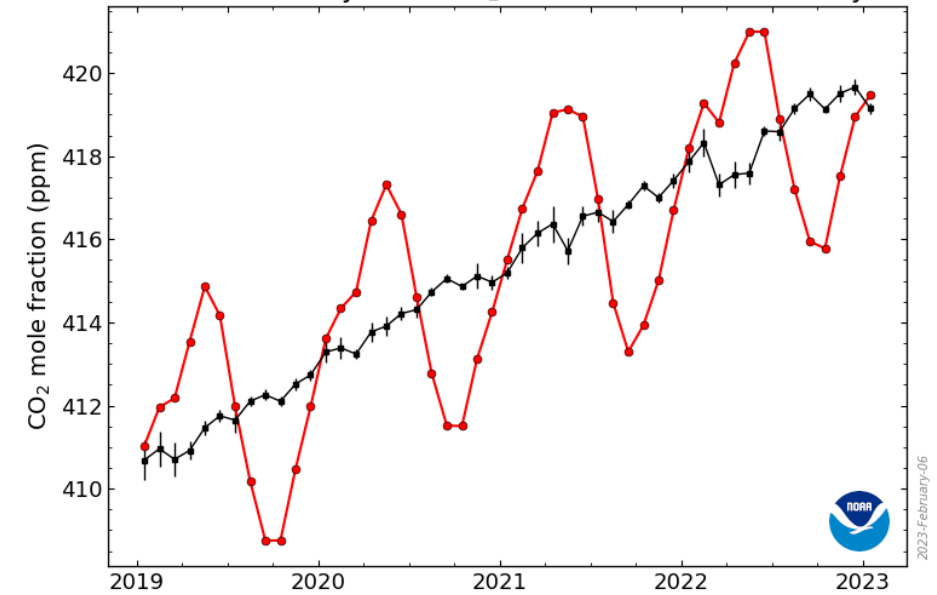
One year of CO₂ daily and weekly means at Mauna Loa



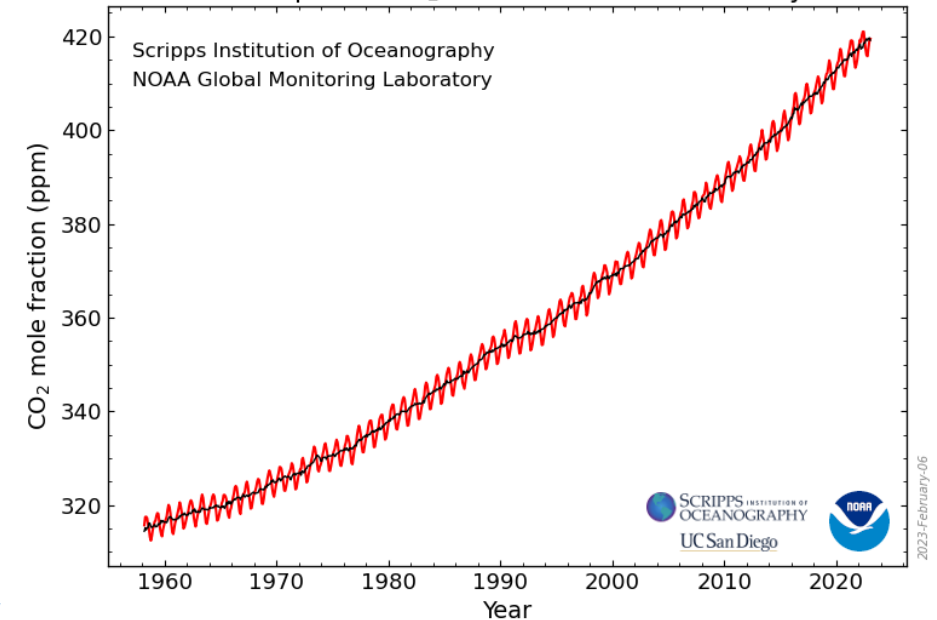
Μέσα σε ένα χρόνο, η φωτοσύνθεση αποσύρει τόσο διοξείδιο του άνθρακα όσο αποθέτει η αναπνοή (περίπου 110 GtC). Συνεπώς η μέση συγκέντρωση πρέπει να παραμένει η ίδια.

Από την ιστοσελίδα της National Oceanic and Atmospheric Administration: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>

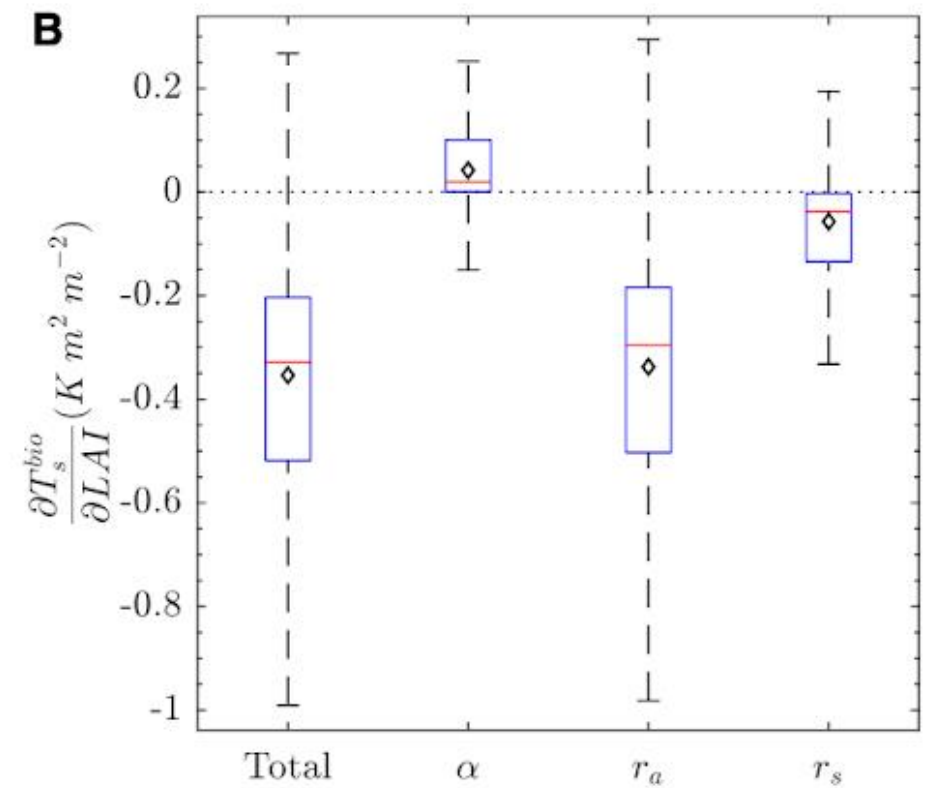
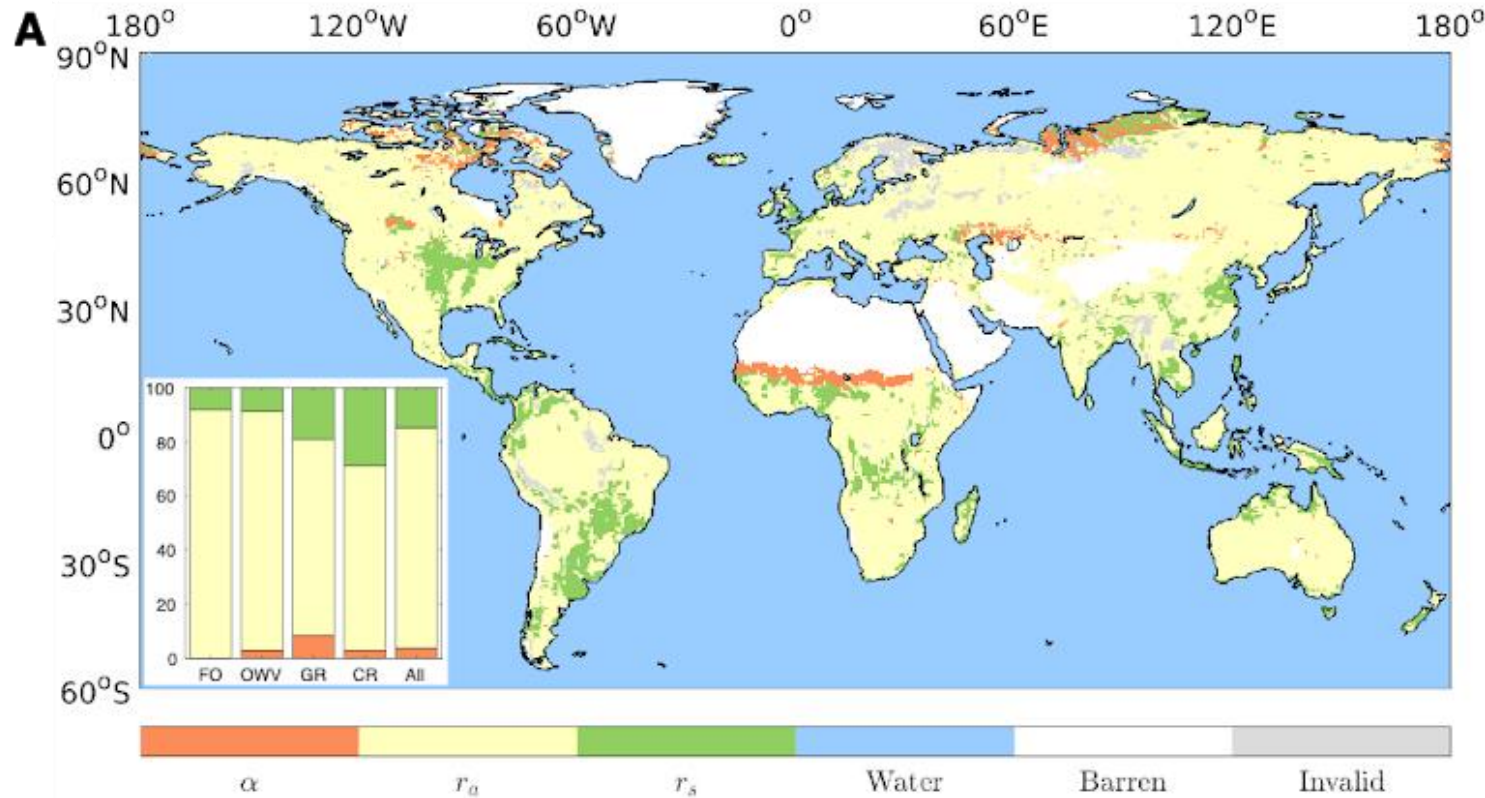
Recent Monthly Mean CO₂ at Mauna Loa Observatory



Atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory

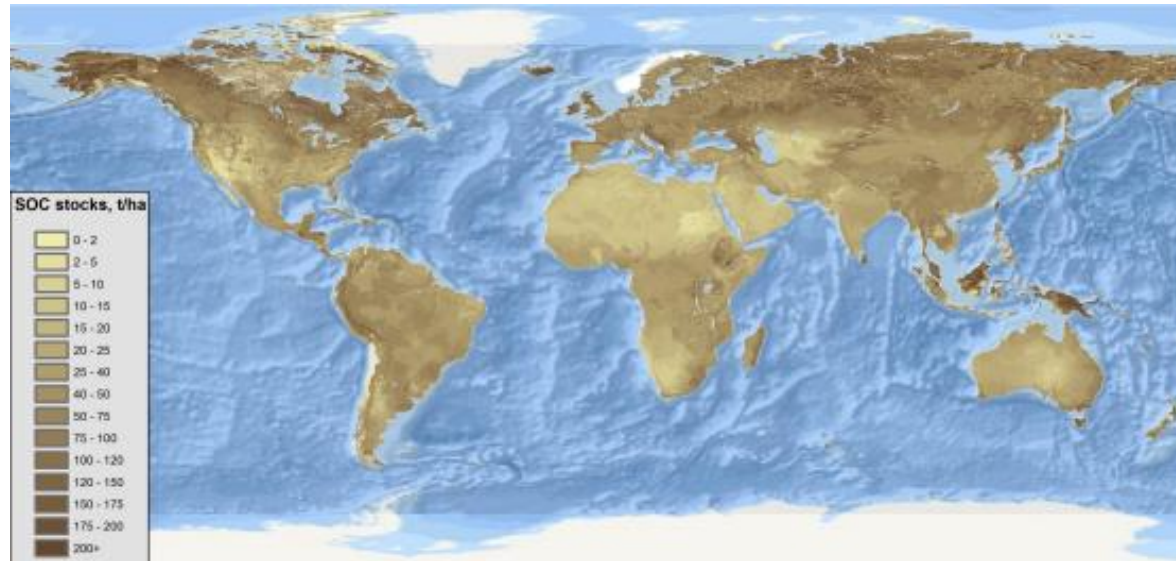


Πρασίνισμα (Greening)



- Δορυφορικές παρατηρήσεις δείχνουν εκτεταμένες αυξητικές τάσεις του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (Leaf Area Index -LAI), ένα φαινόμενο που είναι γνωστό ως πρασίνισμα της Γης και δεν έχει εξηγηθεί πλήρως.
- Οι βιοφυσικές επιπτώσεις αυτού του πρασίνου στη θερμοκρασία της επιφάνειας της γης (Land Surface Temperature - LST) παραμένουν ασαφείς. Επιστήμονες ποσοτικοποίησαν τις βιοφυσικές επιπτώσεις του πρασίνου της Γης στο LST από το 2000 έως το 2014.

Ο άνθρακας στο ανώτερο έδαφος

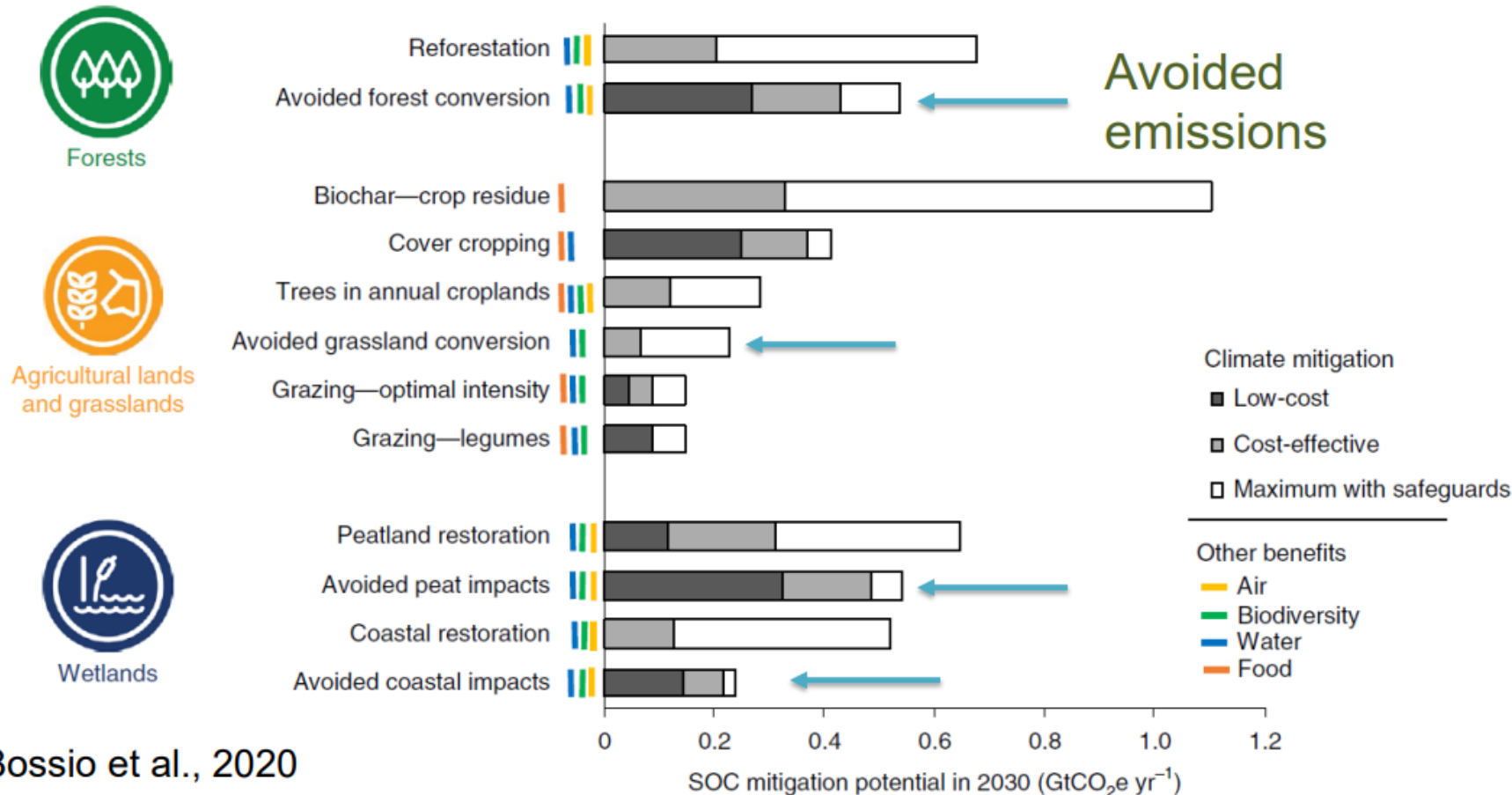


Ο άνθρακας από τους φυτικούς ιστούς καταναλώνεται από τα ζώα ή προστίθεται στο χώμα ως απορρίμματα όταν τα φυτά πεθαίνουν. Ο πρωταρχικός τρόπος που ο άνθρακας είναι αποθηκευμένος στο έδαφος είναι ως Οργανική Ύλη του Εδάφους (Soil Organic matter – SOM). Το SOM είναι ένα πολύπλοκο μείγμα από ενώσεις άνθρακα, που αποτελούνται από αποσύνθεση φυτικού και ζωικού ιστού, μικρόβια (πρωτόζωα, νηματώδεις, μύκητες και βακτήρια) και άνθρακα που σχετίζεται με το έδαφος μεταλλικά στοιχεία. Ο άνθρακας μπορεί να παραμείνει αποθηκευμένος στα εδάφη για χιλιετίες, ή να απελευθερωθεί γρήγορα πίσω στην ατμόσφαιρα. Οι κλιματικές συνθήκες, η φυσική βλάστηση, η υφή εδάφους και η αποστράγγιση επηρεάζουν την ποσότητα και το μήκος του χρόνου που αποθηκεύεται ο άνθρακας.

[Ο άνθρακας στο ανώτερο έδαφος.](#)

Η αποθήκευση άνθρακα στα επιφανειακά εδάφη αναδεικνύεται ως μια εξαιρετική στρατηγική μετρίασης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής

Soil carbon sequestration potentials: A win-win strategy



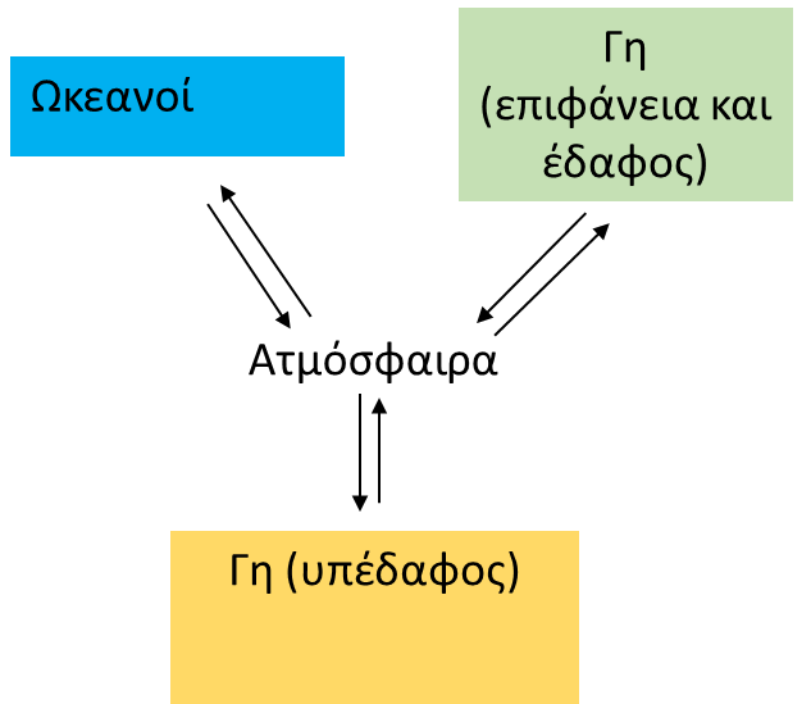
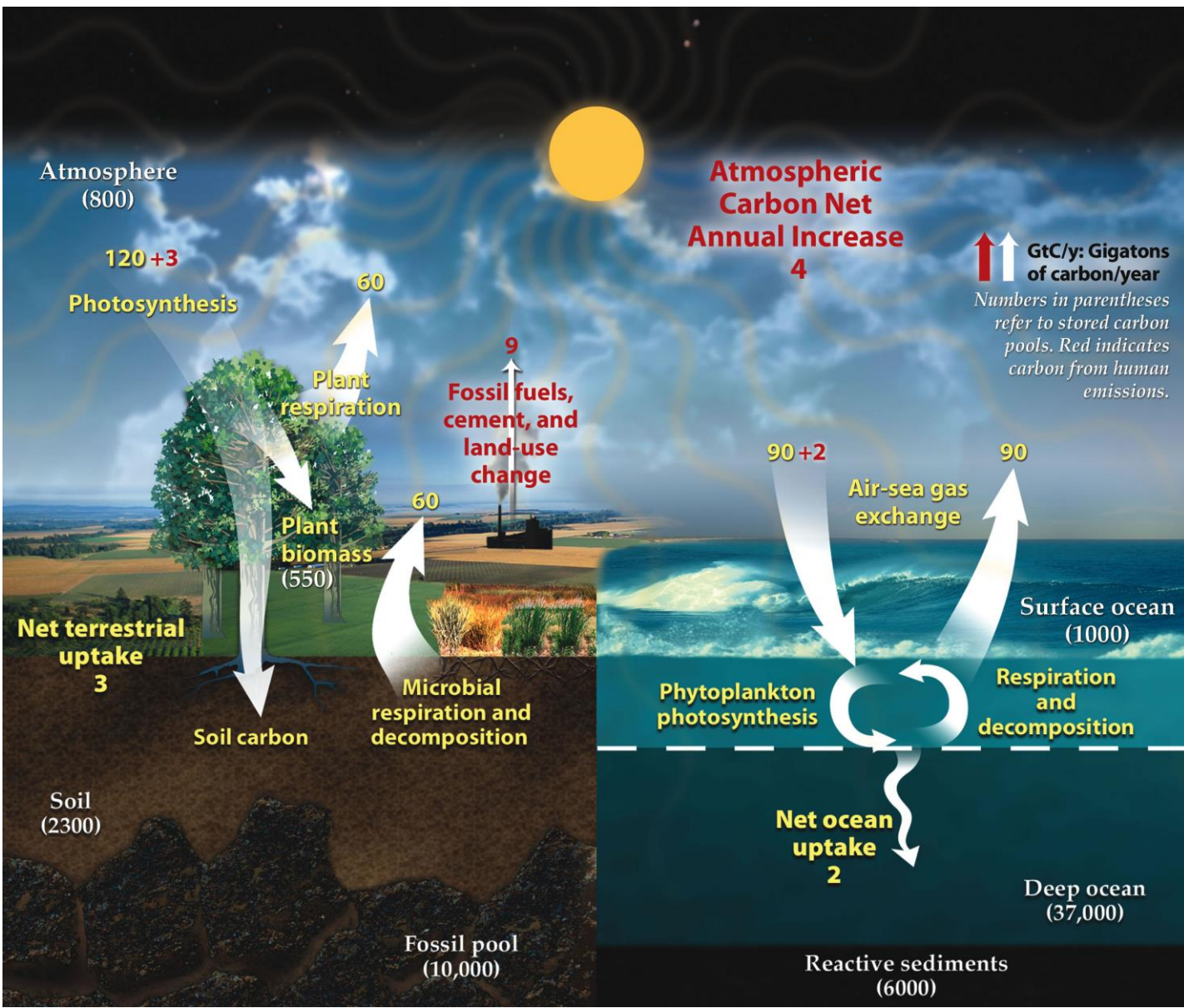
PROS

- Relatively low cost
- Known technology
- Many co-benefits
- No need for new land (in agriculture)

CONS

- Hard to quantify
- Uncertain longevity

Ο αδιατάρακτος κύκλος του άνθρακα με προσεγγιστικά στοιχεία



Η ανθρώπινη επίδραση στο κύκλο του άνθρακα – 1. Καύση ορυκτών καυσίμων

- Όταν καίγονται τα ορυκτά καύσιμα τότε εκλύεται διοξείδιο:
- $CH_4 + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + \text{ενεργεια}$

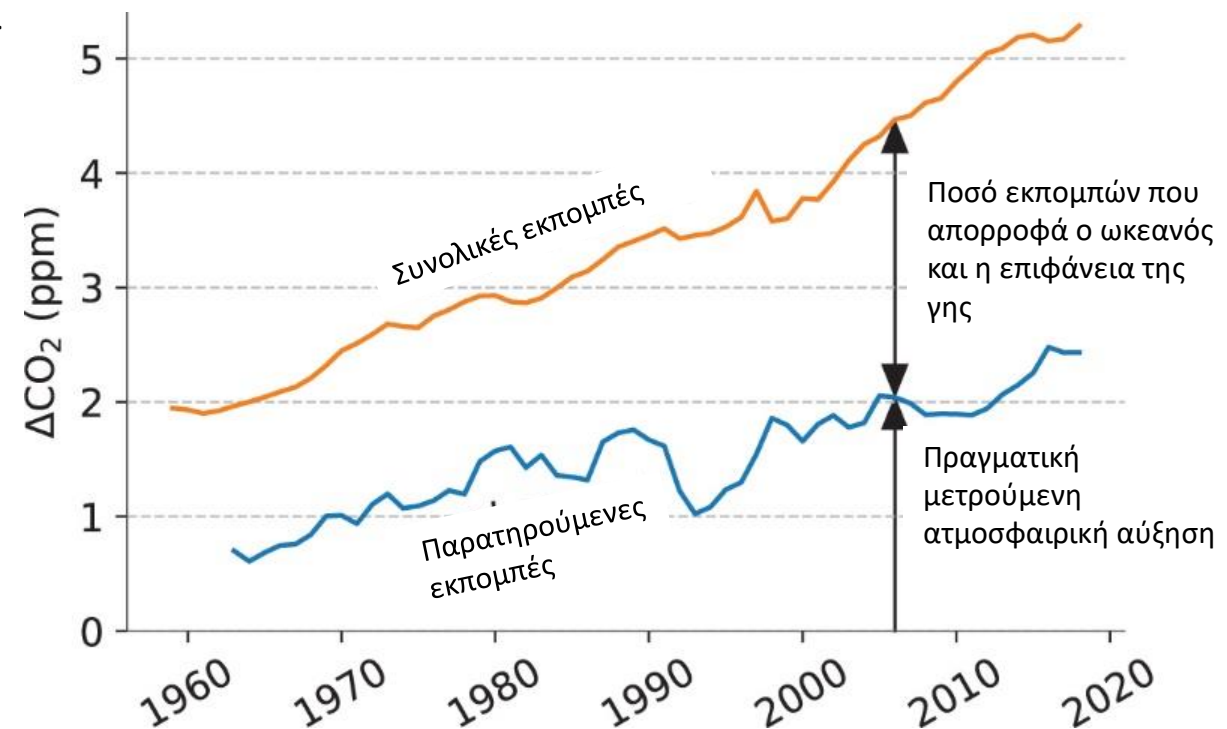
Η ανθρώπινη δραστηριότητα εκλύει κατά μέσο όρο 9,5GtC στην ατμόσφαιρα, δηλαδή 100 φορές περισσότερο από ότι εκλύουν τα ηφαίστεια.

<https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-acidification.mp4>

Οι συνολικές εκπομπές διοξειδίου θα έπρεπε να αυξήσουν τη συγκέντρωση του στην ατμόσφαιρα κατά 4-4,5 ppm, όμως η μετρούμενη αύξηση είναι στην περιοχή του 2-2,5 ppm.

Οι ωκεανοί και η επιφάνεια της γης απορροφούν αυτό τον «χαμένο» άνθρακα.

Φυσικά η επίπτωση είναι η οξίνιση των ωκεανών από την αύξηση της συγκέντρωσης ανθρακικού οξέος με επιπτώσεις στα ωκεάνια οικοσυστήματα.

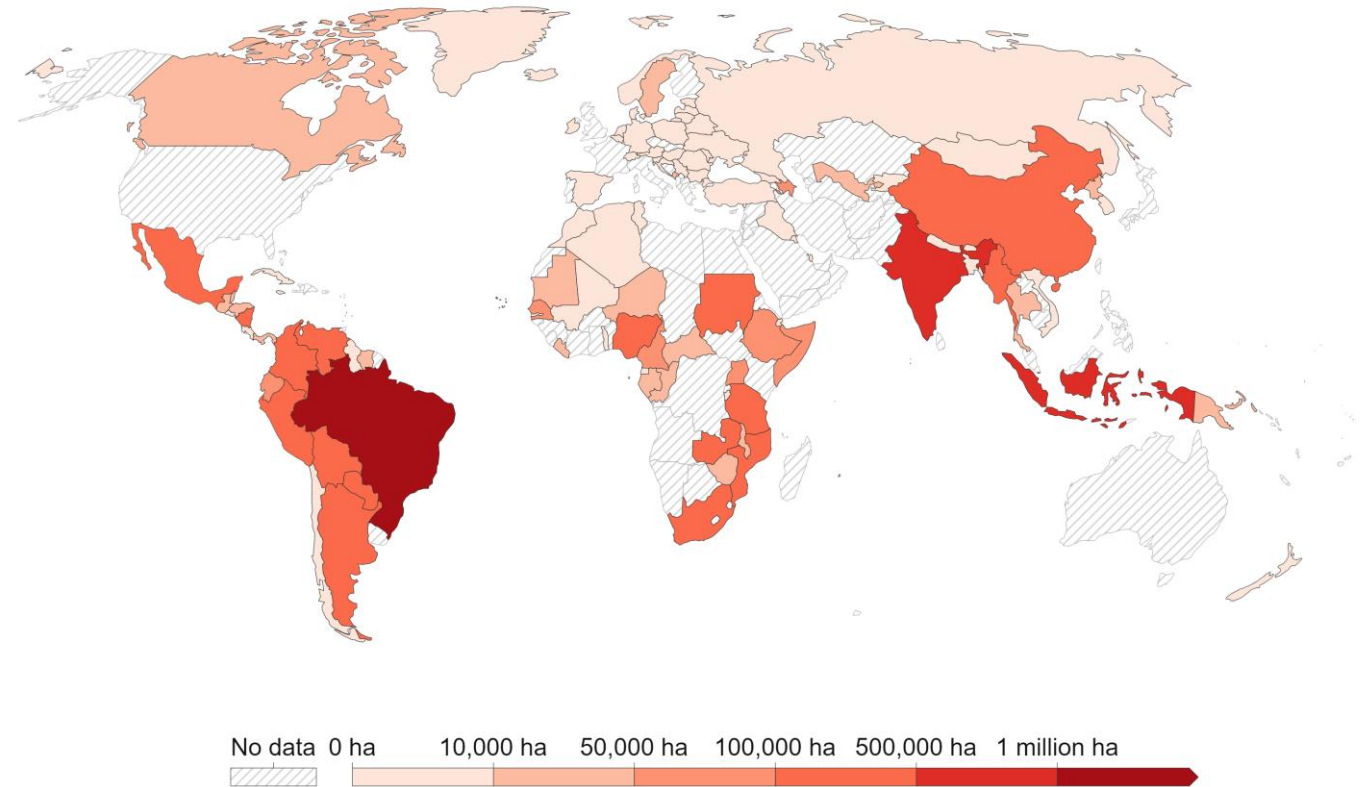


Η ανθρώπινη επίδραση στο κύκλο του άνθρακα –

2. Αλλαγές στη χρήση της γης

- Η αποψίλωση των δασών (deforestation) είναι η σκόπιμη εκκαθάριση δασικής γης. Η αποψίλωση των δασών έχει αλλάξει σε μεγάλο βαθμό τα τοπία σε όλο τον κόσμο. Πριν από περίπου 2.000 χρόνια, το 80% της Δυτικής Ευρώπης ήταν δασική. Σήμερα το ποσοστό είναι 34%. Στη Βόρεια Αμερική, περίπου τα μισά δάση στο ανατολικό τμήμα της ηπείρου κόπηκαν από το 1600 έως το 1870 για ξυλεία και γεωργία.
- Σήμερα, η μεγαλύτερη αποψίλωση των δασών συμβαίνει στα τροπικά δάση, υποβοηθούμενη από την εκτεταμένη κατασκευή δρόμων σε περιοχές που κάποτε ήταν σχεδόν απρόσιτες. Η κατασκευή ή η αναβάθμιση δρόμων σε δάση τους καθιστά πιο προσιτούς για εκμετάλλευση. Οι αγρότες στους τροπικούς καίνε μεγάλες εκτάσεις δάσους, επιτρέποντας στη στάχτη να γονιμοποιήσει τη γη για καλλιέργειες. Ωστόσο, η γη είναι εύφορη μόνο για λίγα χρόνια, μετά τα οποία οι αγρότες συνεχίζουν να επαναλαμβάνουν τη διαδικασία αλλού. Τα τροπικά δάση καθαρίζονται επίσης για να ανοίξουν χώρο για υλοτομία, εκτροφή βοοειδών και φυτείες ελαιοφοίνικα και καουτσούκ.
- Η αποψίλωση των δασών μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση περισσότερου διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Αυτό συμβαίνει επειδή τα δέντρα προσλαμβάνουν διοξείδιο του άνθρακα από τον αέρα για φωτοσύνθεση και ο άνθρακας κλειδώνεται χημικά στο ξύλο τους. Όταν τα δέντρα καίγονται, αυτός ο άνθρακας επιστρέφει στην ατμόσφαιρα ως διοξείδιο του άνθρακα. Με λιγότερα δέντρα γύρω για να απορροφήσουν το διοξείδιο του άνθρακα, αυτό το αέριο του θερμοκηπίου συσσωρεύεται στην ατμόσφαιρα και επιταχύνει την υπερθέρμανση του πλανήτη.
- Ενώ η αποψίλωση των δασών μπορεί να είναι μόνιμη, αυτό δεν συμβαίνει πάντα. Στη Βόρεια Αμερική, για παράδειγμα, τα δάση σε πολλές περιοχές επιστρέφουν χάρη στις προσπάθειες διατήρησης.

Annual deforestation, 2015

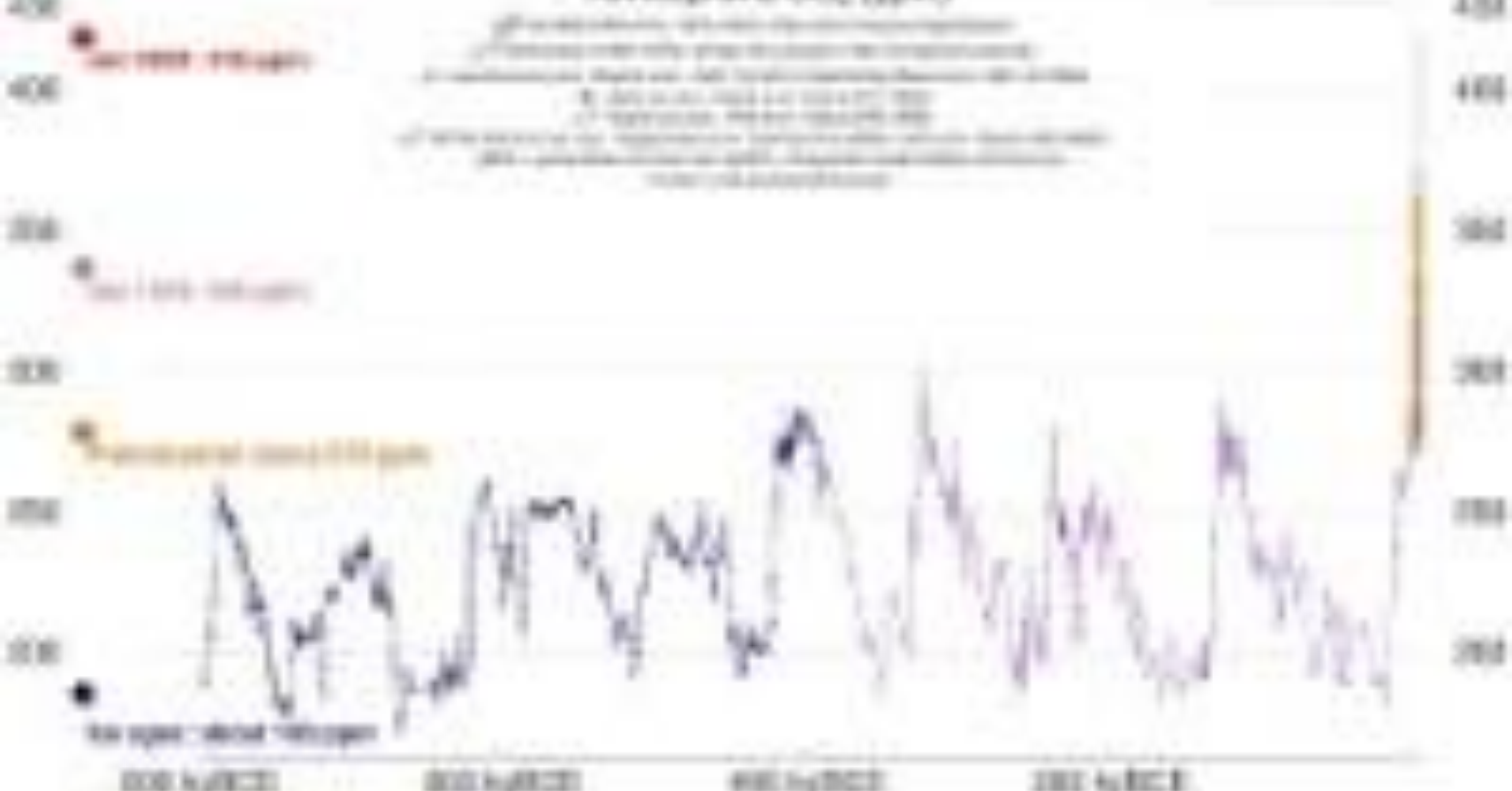


Source: UN Food and Agriculture Organization (FAO). Forest Resources Assessment.

OurWorldInData.org/deforestation • CC BY

Note: The UN FAO publish forest data as the annual average on 10- or 5-year timescales. The following year allocation applies: "1990" is the annual average from 1990 to 2000; "2000" for 2000 to 2010; "2010" for 2010 to 2015; and "2015" for 2015 to 2020.

Atmospheric CO₂ (ppm)



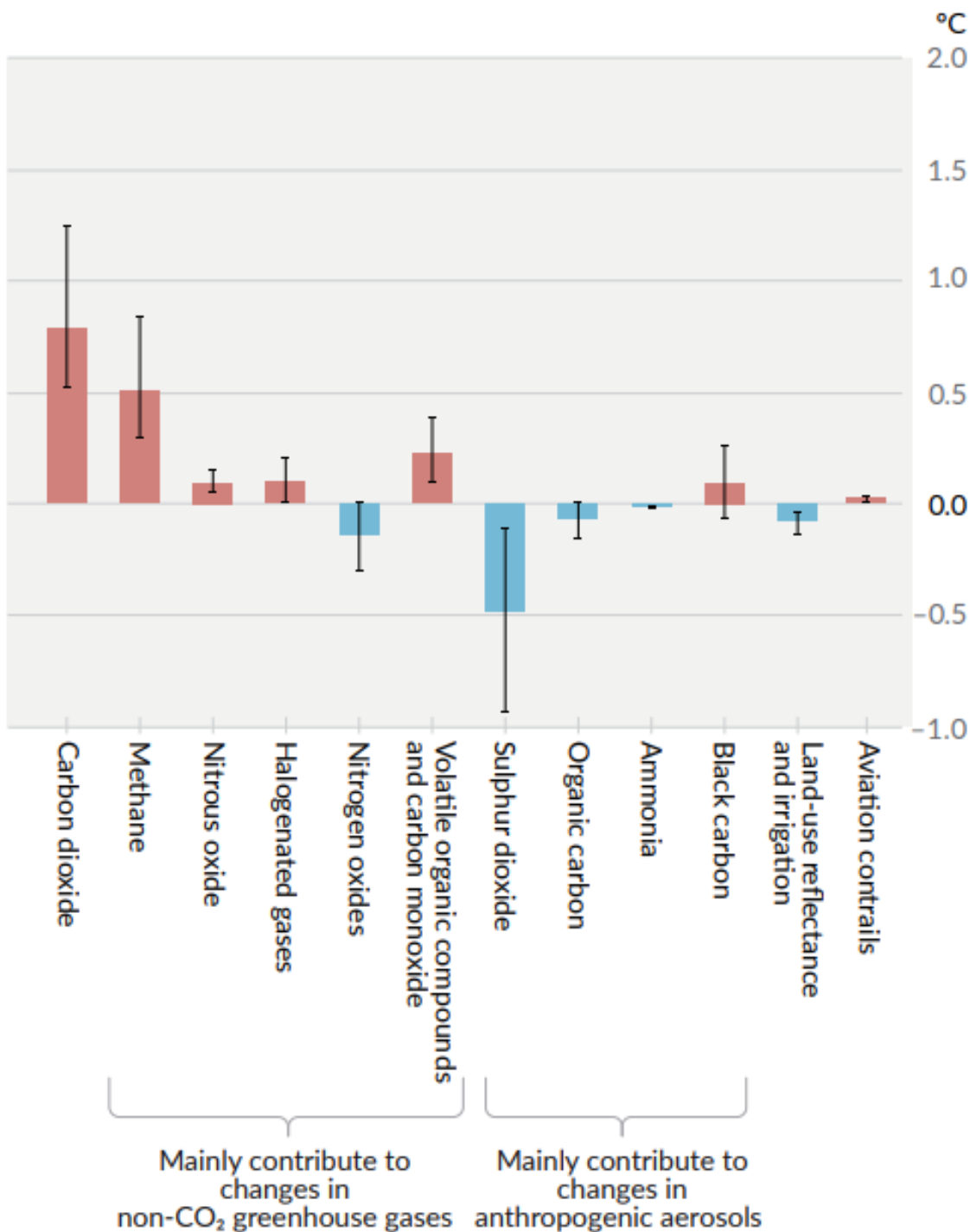
Radiative Forcing (RF) – τροποποίηση του ισοζυγίου ενέργειας

Τροποποίηση του ισοζυγίου ενέργειας είναι η μεταβολή στη ροή ενέργειας (ενέργεια που εισέρχεται μείον ενέργεια που εξέρχεται) σε ένα πλανήτη ως αποτέλεσμα κάποιας αλλαγής που επιβλήθηκε στον πλανήτη πριν την προσαρμογή της θερμοκρασίας του σε αυτή την αλλαγή.

$$RF = \Delta(E_{in} - E_{out}) = \Delta E_{in} - \Delta E_{out}$$

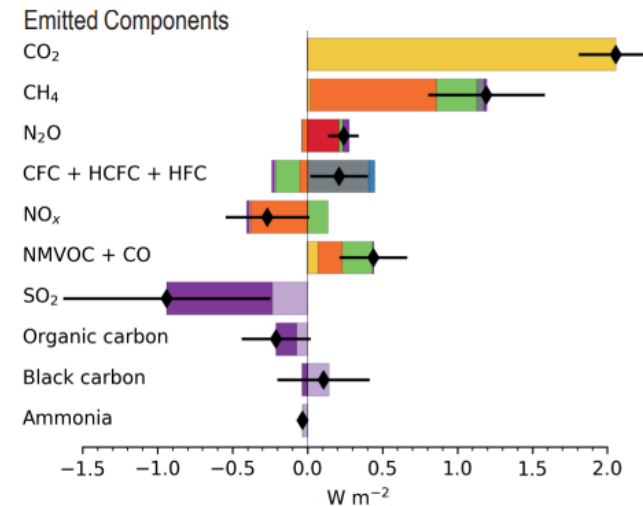
Η κλιματική ευαισθησία ((equilibrium) climate sensitivity) σε μια εξωτερική μεταβολή του ισοζυγίου ενέργειας δείχνει την μεταβολή θερμοκρασίας που θα προκληθεί από μεταβολή του ενεργειακού ισοζυγίου κατά $1\text{W}/\text{m}^2$.

Συνήθως η κλιματική ευαισθησία ορίζεται ως η μεταβολή στη θερμότητα από διπλασιασμό της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) αφού το σύστημα επαναφέρεται σε κατάσταση ισορροπίας.



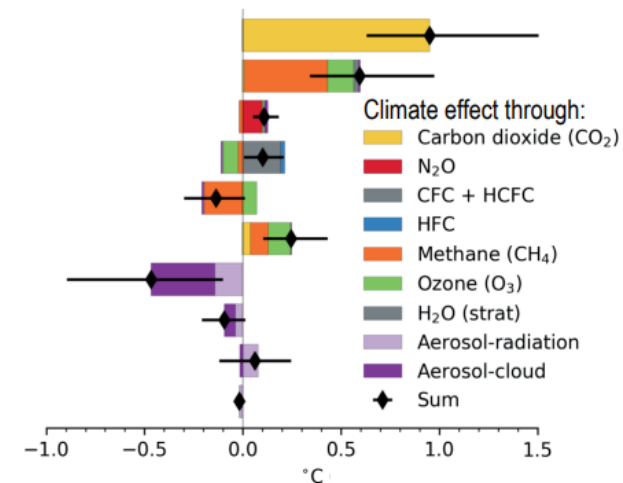
(a) Effective radiative forcing

1750 to 2019



(b) Change in global surface temperature

1750 to 2019



Τροποποίηση του ισοζυγίου ενέργειας (radiative forcing) και η αντίστοιχη μεταβολή στη θερμοκρασία του πλανήτη. Αριστερά: η μεταβολή της θερμοκρασίας από τη μέχρι σήμερα (2019) μεταβολή στη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα, λοιπών αερίων του θερμοκηπίου (εκτός διοξειδίου του άνθρακα) και ανθρωπογενών αερολυμάτων (aerosols). Πάνω: η μεταβολή στην ενέργεια και η αντίστοιχη μεταβολή στη θερμοκρασία.

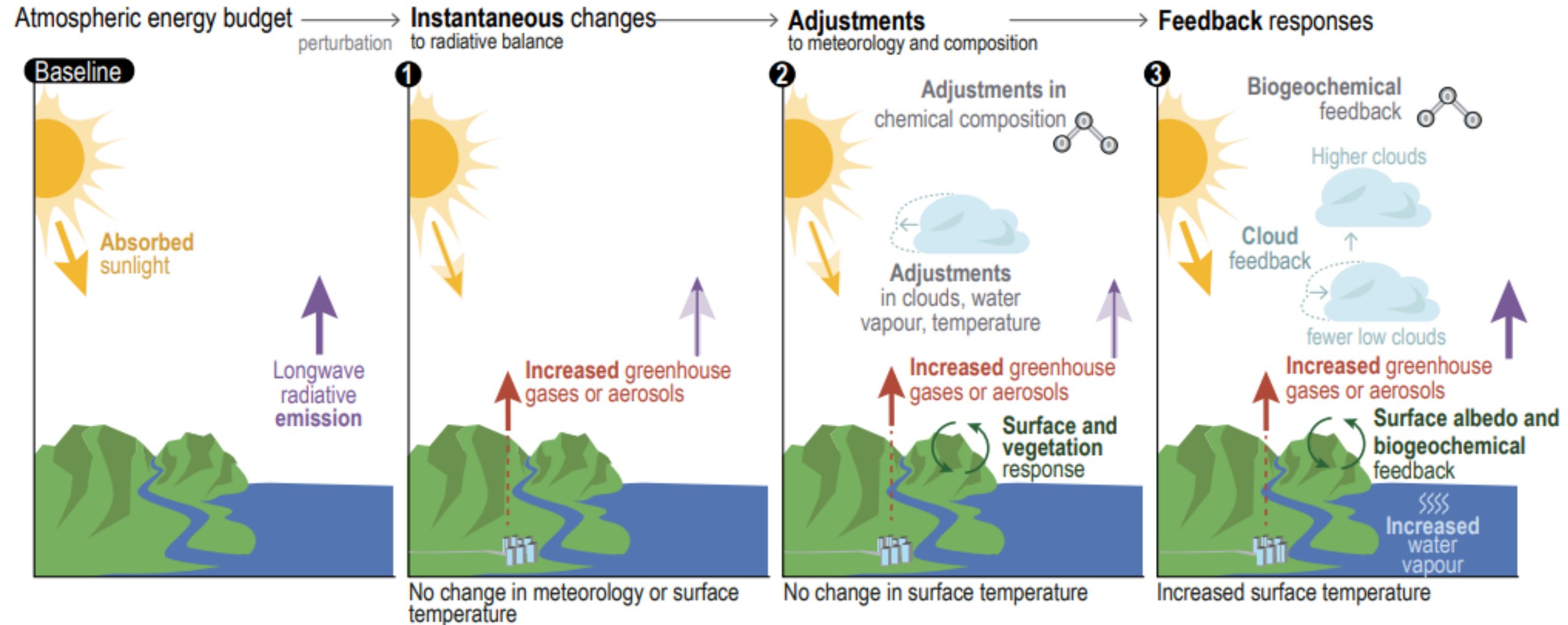
Αριστερά: Figure SPM.2 | Assessed contributions to observed warming in 2010–2019 relative to 1850–1900.

Πάνω: Figure TS.15 | Contribution to (a) effective radiative forcing (ERF) and (b) global surface temperature change from component emissions for 1750–2019 based on Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) models.

Η αναφορά και στα δύο γραφικά είναι:

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

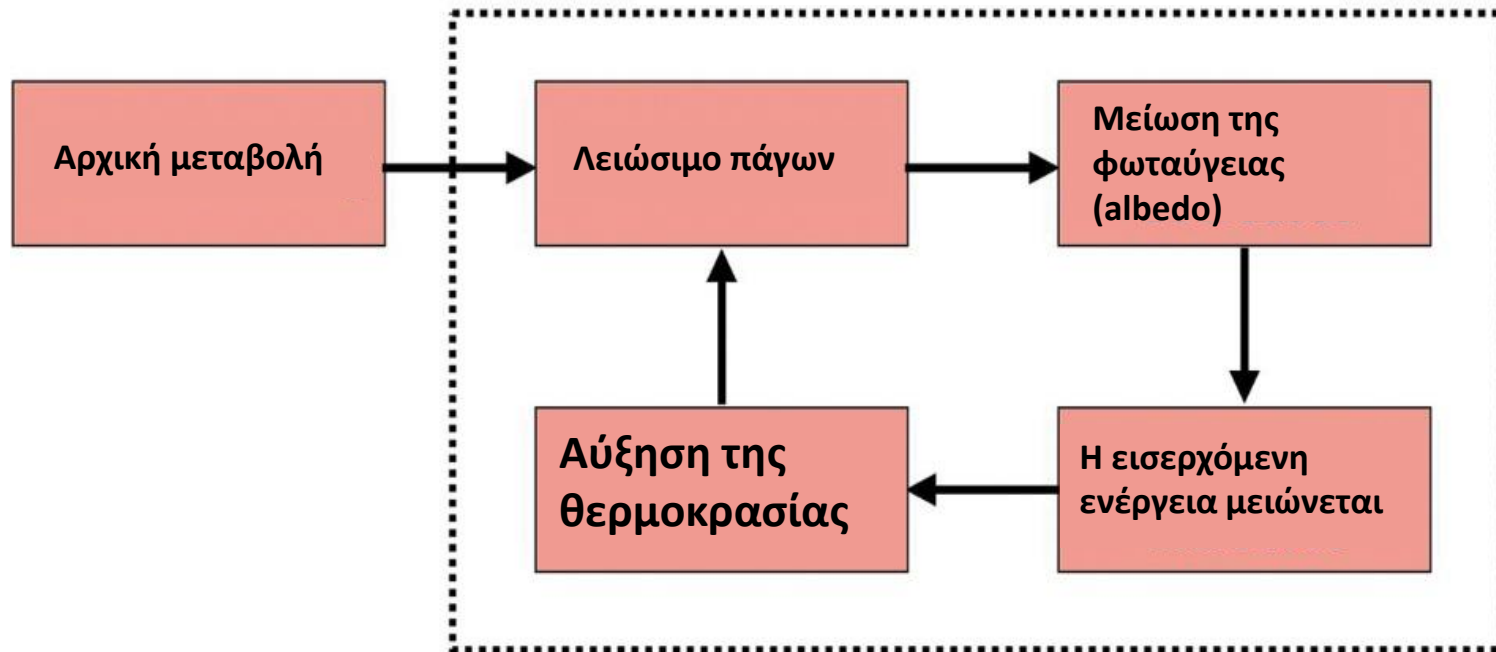
Η αλληλουχία των μεταβολών στην ατμόσφαιρα μετά από μια διαταραχή.



Τι είναι οι ανατροφοδοτήσεις (feedbacks);

- Οι ανατροφοδοτήσεις είναι διαδικασίες οι οποίες επηρεάζουν μία αρχική μεταβολή της θερμοκρασίας.
- Οι ανατροφοδοτήσεις μπορεί να είναι θετικές (ενισχύσεις) όταν αυξάνουν τη θέρμανση του πλανήτη ή αρνητικές (περιοριστικές) όταν την μειώνουν

Ανατροφοδοτούμενος βρόγχος



Αριστερά το παράδειγμα ενός θετικά ανατροφοδοτούμενου βρόγχου που σχετίζεται με το φαινόμενο ice-albedo δηλαδή ύπαρξης πάγων και φωταύγειας, δυνατότητας της γης να αντανακλά την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

Οι πιο σημαντικές ανατροφοδοτήσεις:

Γρήγορες συνεχιζόμενες ανατροφοδοτήσεις – Fast ongoing feedbacks

- Η ανατροφοδότηση Planck (Planck feedback)
- Υδρατμοί (water vapor)
- Ο ρυθμός μεταβολής της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας με το ύψος (lapse rate)
- Σύννεφα
- Σχέση πάγων θάλασσας με φωταύγεια (sea-ice and albedo)

Tiping Points - Ανατροφοδοτήσεις της Βιόσφαιρας (Biosphere feedbacks)

- Λειώσιμο του μόνιμα παγωμένου εδάφους (permafrost) και της τούνδρας
- Λειώσιμο παγετώνων (Γροιλανδίας και Ανταρκτικής)
- Ξαφνική ξήρανση του δάσους του Αμαζονίου (Amazon rainforest dieback)
- Μεταβολή της κυκλοφορίας των ρευμάτων στον Ατλαντικό (Atlantic Meridional Overturning Circulation)
- Μεταβολές στην αποθήκευση άνθρακα στην επιφάνεια της γης και τους ωκεανούς
- Δασικές πυρκαγιές και φωτιές σε τυρφώνες

Η ανατροφοδότηση Planck

- Η ανατροφοδότηση Planck οφείλεται στη συμπεριφορά της γης ως ένα «μέλαν σώμα» το οποίο εκπέμπει περισσότερη ακτινοβολία (ενέργεια) όσο θερμαίνεται. Το φαινόμενο Planck υπολογίζεται ότι τροποποιεί το ισοζύγιο ενέργειας κατά -1.1 W/m^2 για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C .

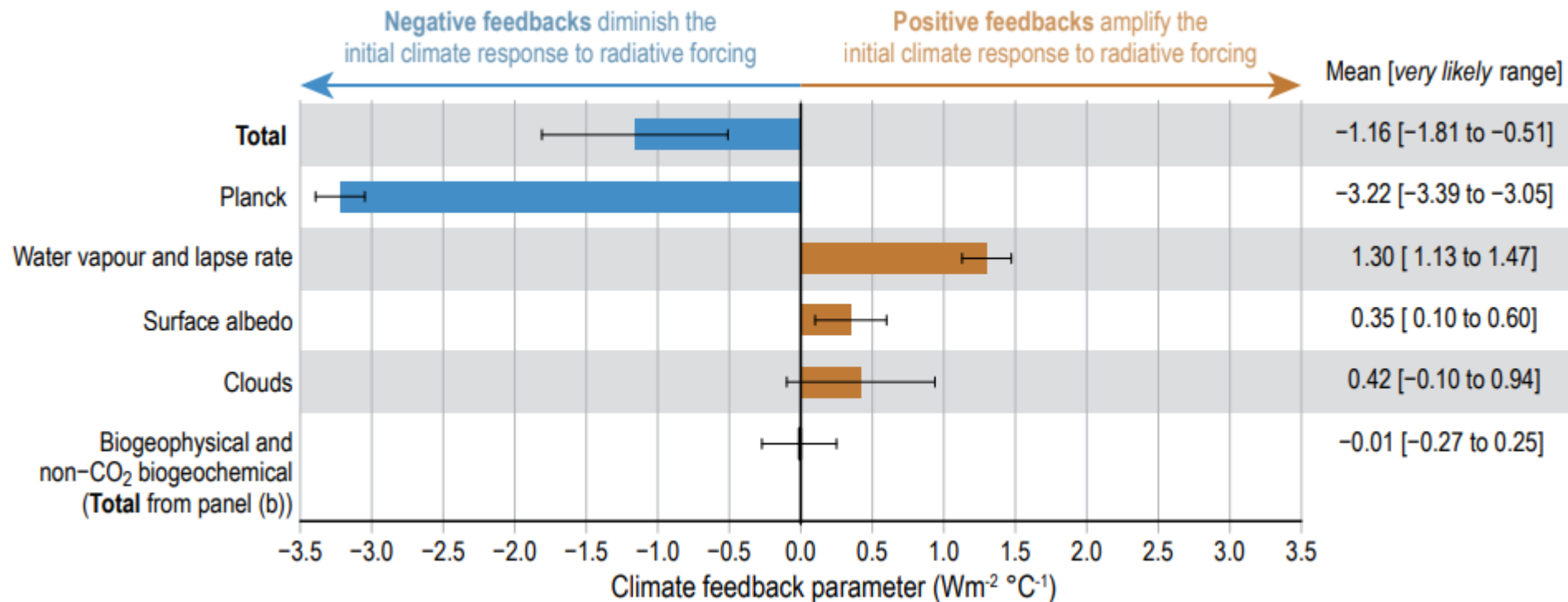


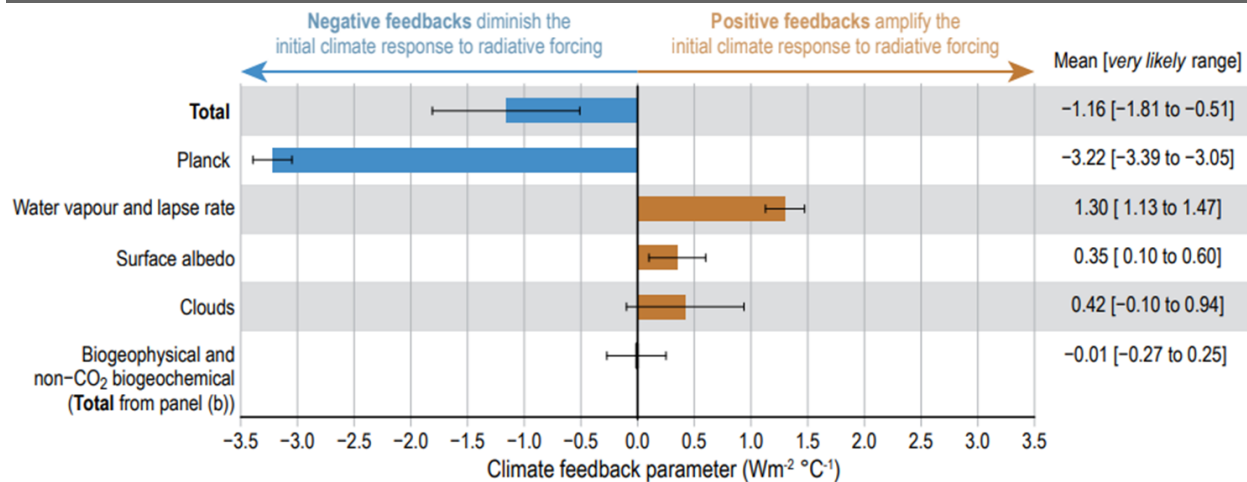
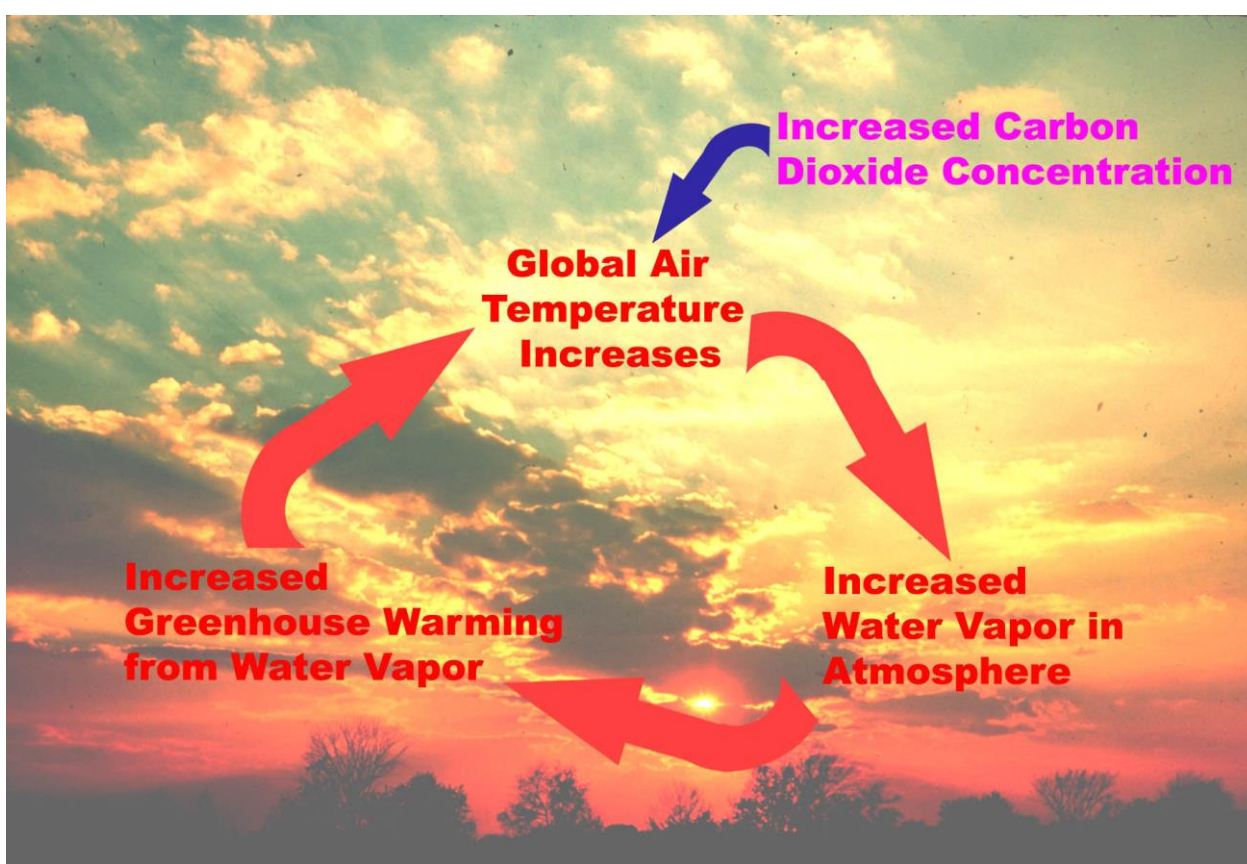
Figure TS.17 a | An overview of physical and biogeochemical feedbacks in the climate system.

Υδρατμοί (water vapor)

Αυτή η ανατροφοδότηση λειτουργεί ως εξής: Καθώς τα αέρια του θερμοκηπίου αυξάνονται, η θερμοκρασία της γης αυξάνεται. Αυτό αυξάνει την εξατμηση τόσο από τις υδάτινες όσο και από τις χερσαίες περιοχές. Επειδή ο θερμότερος αέρας συγκρατεί περισσότερη υγρασία, η συγκέντρωσή του σε υδρατμούς αυξάνεται. Συγκεκριμένα, αυτό συμβαίνει επειδή οι υδρατμοί δεν συμπυκνώνονται και δεν καθιζάνουν από την ατμόσφαιρα τόσο εύκολα σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Στη συνέχεια, οι υδρατμοί απορροφούν τη θερμότητα που εκπέμπεται από τη Γη και την εμποδίζει να διαφύγει στο διάστημα. Αυτό θερμαίνει περαιτέρω την ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα ακόμη περισσότερους υδρατμούς στην ατμόσφαιρα. Αυτό είναι τυπικό δείγμα ενός «βρόγχου θετικής ανατροφοδότησης». Οι επιστήμονες εκτιμούν ότι αυτή η επίδραση υπερδιπλασιάζει τη θέρμανση που θα συνέβαινε μόνο λόγω της αύξησης του διοξειδίου του άνθρακα.

Για κάθε 1°C θέρμανσης της γης, οι υδρατμοί αυξάνονται κατά 7% με αποτέλεσμα να έχουν τη μεγαλύτερη θετική ανατροφοδότηση.



Γράφημα πάνω: Steamy Relationships: How Atmospheric Water Vapor Amplifies Earth's Greenhouse Effect. Στην ιστοσελίδα της NASA: <https://climate.nasa.gov/ask-nasa-climate/3143/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect/>

Γράφημα κάτω: Figure TS.17 a | An overview of physical and biogeochemical feedbacks in the climate system.

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

Το παράδοξο της υγρασίας (humidity)

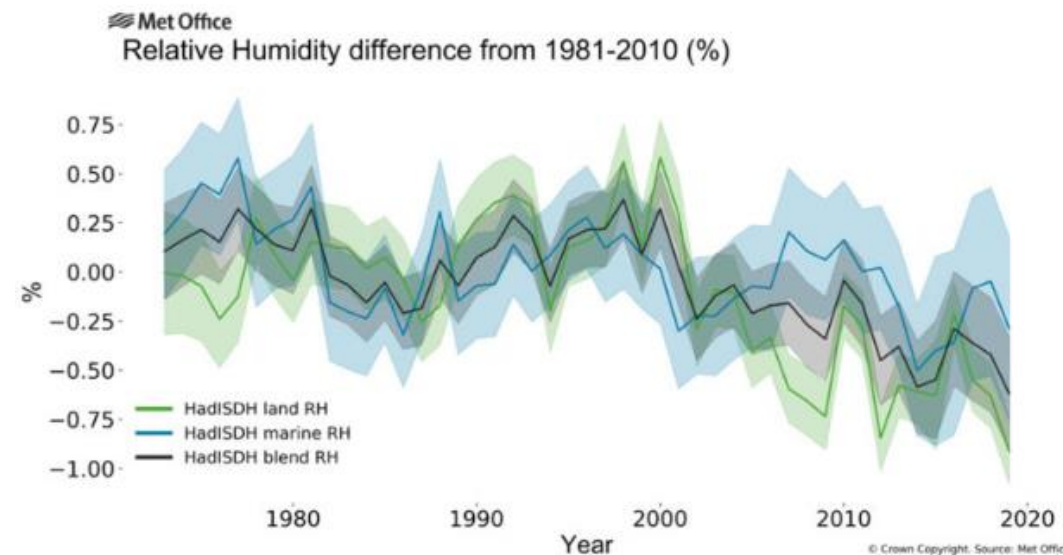
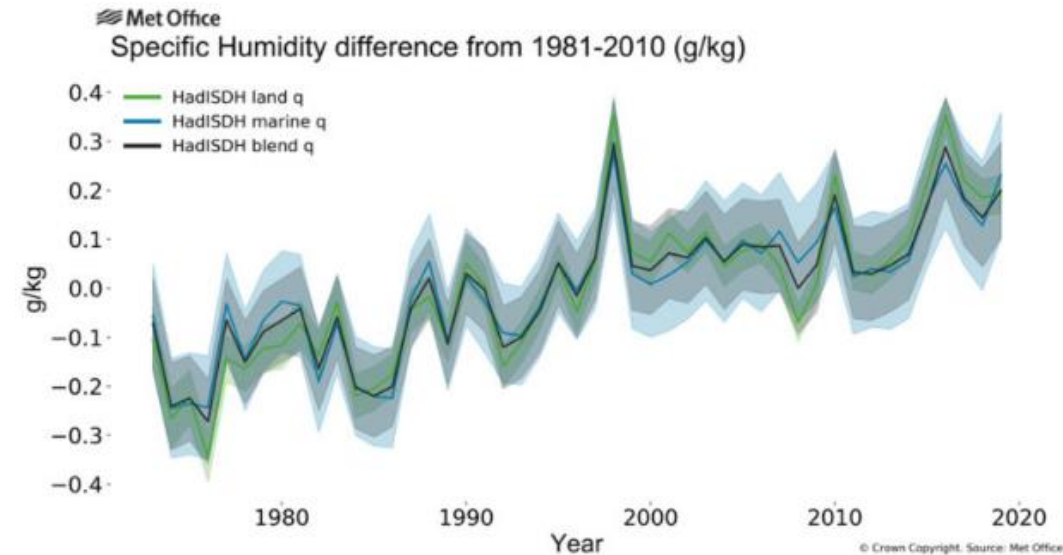
- Η υγρασία είναι ένα μέτρο για το πόση ποσότητα νερού αιωρείται στον αέρα.
- Η ειδική υγρασία, γνωστή και ως «περιεκτικότητα σε υγρασία», είναι ένα μέτρο του πόσοι υδρατμοί υπάρχουν σε σχέση με τη συνολική μάζα των υδρατμών και του αέρα μαζί. Μετριέται σε γραμμάρια υδρατμών ανά κιλό υγρού αέρα.
- Η σχετική υγρασία είναι ένα μέτρο – εκφρασμένο ως ποσοστό – του πόσο «κορεσμένος» είναι ο αέρας, με άλλα λόγια, πόσους υδρατμούς περιέχει ο αέρας σε σύγκριση με το μέγιστο που θα μπορούσε να περιέχει.

Το παράδοξο της υγρασίας

- Οι παρατηρήσεις της υγρασίας σε όλο τον κόσμο δείχνουν ότι η ειδική υγρασία –ή η ποσότητα των υδρατμών– έχει αυξηθεί, ωστόσο, την ίδια στιγμή, η σχετική υγρασία –ή κορεσμός– σε πολλές περιοχές έχει μειωθεί.

Εξήγηση:

- Επειδή η Γη θερμαίνεται, ο θερμότερος αέρας μπορεί να συγκρατήσει περισσότερους υδρατμούς (ειδική υγρασία αυξάνεται) άρα το μέγιστο που μπορεί να συγκρατήσει αυξάνεται και συνεπώς η σχετική υγρασία μειώνεται (όχι παντού).

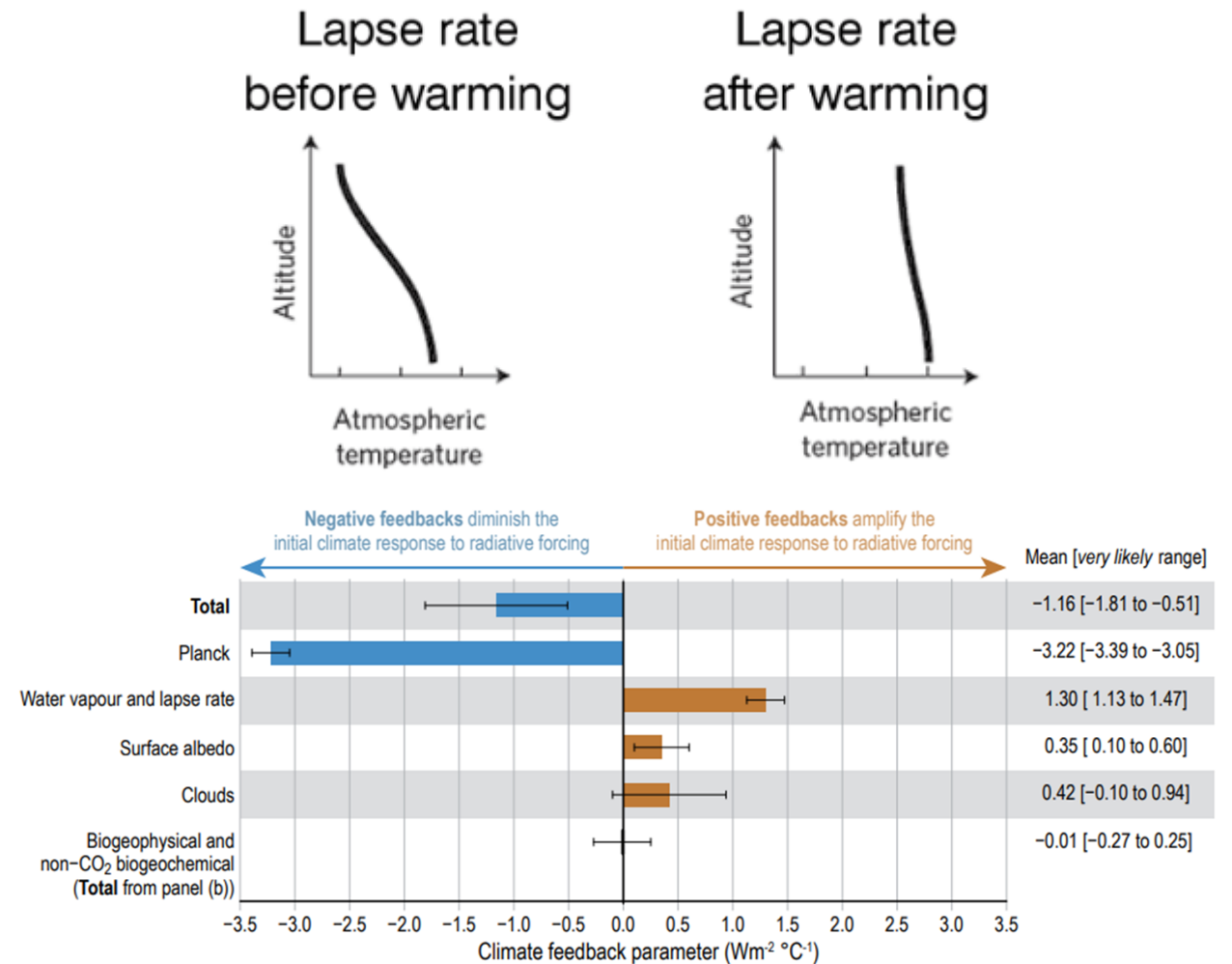


ο ρυθμός μεταβολής της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας με το ύψος (lapse rate)

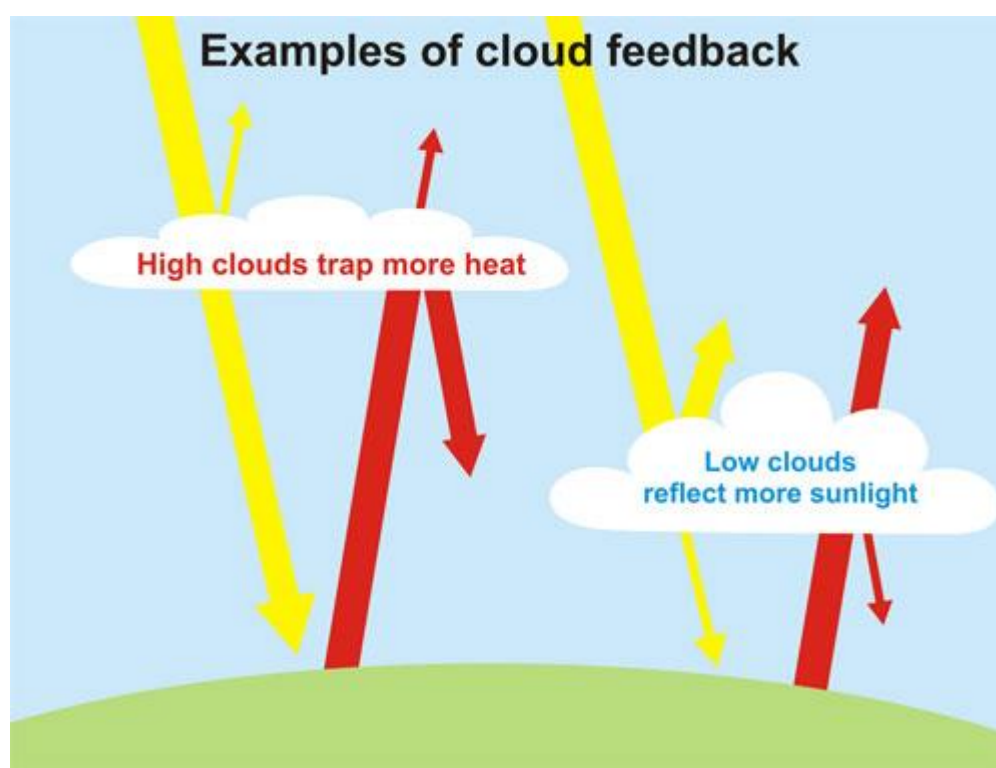
Επιπτώσεις της αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη:

- Μείωση του ρυθμού μεταβολής της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας με το ύψος
- Θέρμανση της μέσης τροπόσφαιρας
- Ισχυρότερη ακτινοβολία της γης
- Δροσερότερο κλίμα
- Συνολικά μια αρνητική ανατροφοδότηση

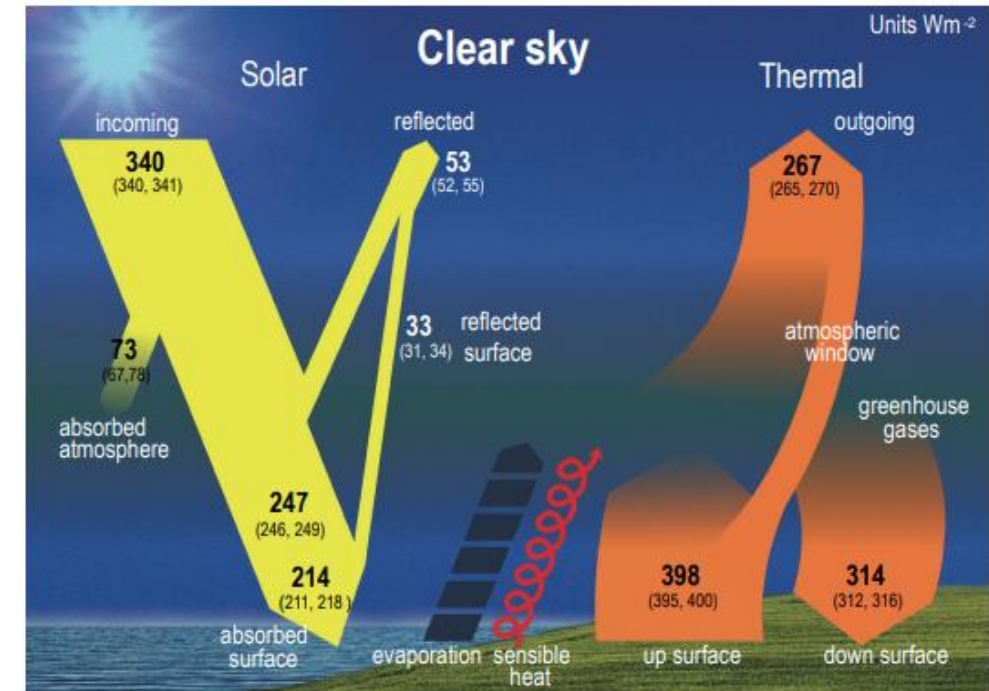
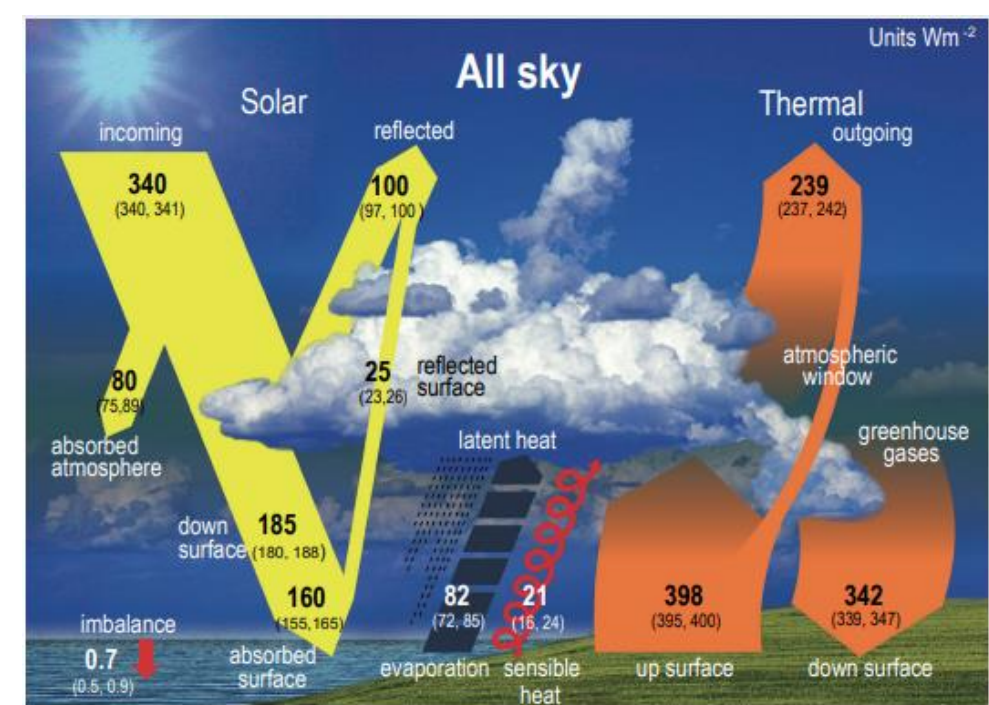
- Στις τροπικές περιοχές, ο ρυθμός μεταβολής της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας με το ύψος αναμένεται να μειωθεί ενισχύοντας τη θέρμανση στην ανώτερη τροπόσφαιρα και μειώνοντάς τη στην επιφάνεια.
- Αυτή η καταστολή προκαλεί αρνητική ανατροφοδότηση για τη θερμοκρασία της επιφάνειας. Προς τους πόλους, συμβαίνει το αντίστροφο (μια θετική ανατροφοδότηση), αλλά το φαινόμενο στις τροπικές περιοχές κυριαρχεί παράγοντας συνολικά αρνητική ανατροφοδότηση.
- Τα αέρια του θερμοκηπίου και τα σύννεφα προκαλούν την εκπομπή θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας από τη Γη στη περιοχή της μέσας τροπόσφαιρας, η οποία έχει μικρότερη θερμοκρασία από την επιφάνεια.
- Αν εξασθενήσει το φαινόμενο του ρυθμού μεταβολής της θερμοκρασίας με το ύψος, οι θερμοκρασίες επιφάνειας και εκπομπής συγκλίνουν και το φαινόμενο του θερμοκηπίου εξασθενεί
- Συνεπώς εάν ο ρυθμός μεταβολής της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας με το ύψος μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας επιφάνειας, αυτό σημαίνει αρνητική ανατροφοδότηση.



Σύννεφα



- Τα σύννεφα έχουν δύο διαφορετικές μορφές επίδρασης ανάλογα με το ύψος και το είδος τους. Μπορούν να ενισχύσουν την θέρμανση ή να την επιβραδύνουν.
- Τα σύννεφα χαμηλού ύψους έχουν καθαρό αποτέλεσμα ψύξης επειδή είναι φωτεινά και αντανακλούν περισσότερο το ηλιακό φως,
- Τα σύννεφα υψηλού επιπέδου έχουν καθαρή επίδραση θέρμανσης επειδή παγιδεύουν περισσότερη εξερχόμενη θερμότητα (υπέρυθρη ακτινοβολία).
- Η συνολική ανατροφοδότηση από τα σύννεφα σε έναν κόσμο που θερμαίνεται είναι δύσκολο να προβλεφθεί επειδή εξαρτάται από το πώς θα αλλάξει η ποσότητα και οι ιδιότητες τόσο των νεφών χαμηλού όσο και υψηλού επιπέδου.



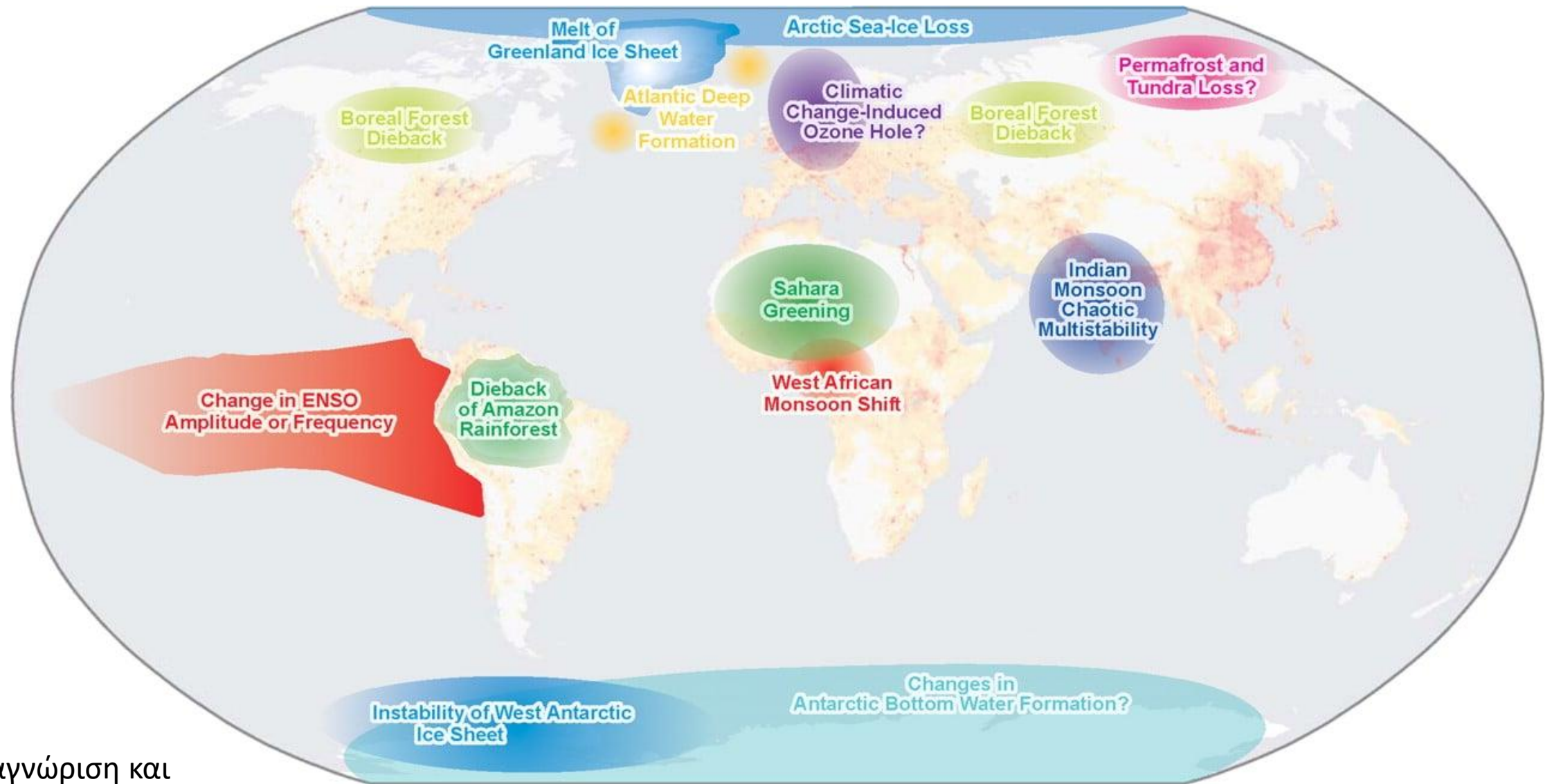
Πάγοι και φωταύγεια (Sea-ice and albedo)

- Το Albedo είναι το κλάσμα του φωτός που ανακλά μια επιφάνεια. Εάν ανακλώνται όλα, το albedo είναι ίσο με 1. Εάν ανακλάται 30%, το albedo είναι 0,3. Το albedo της επιφάνειας της Γης (ατμόσφαιρα, ωκεανοί, επιφάνειες γης) καθορίζει πόση εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια, ή φως, αντανακλάται αμέσως πίσω στο διάστημα.
- Όσο περιορίζονται οι πάγοι, τόσο μειώνεται το albedo και μειώνεται η εκπεμπόμενη ακτινοβολία από τη γη, οπότε αυξάνεται η θερμοκρασία της που προκαλεί περαιτέρω μείωση των πάγων και περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας.

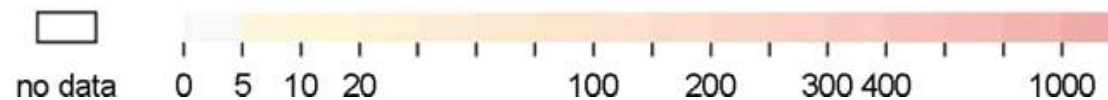


[Dr. Steven C. Amstrup at: https://youtu.be/CwQDgpkGiE4](https://youtu.be/CwQDgpkGiE4)

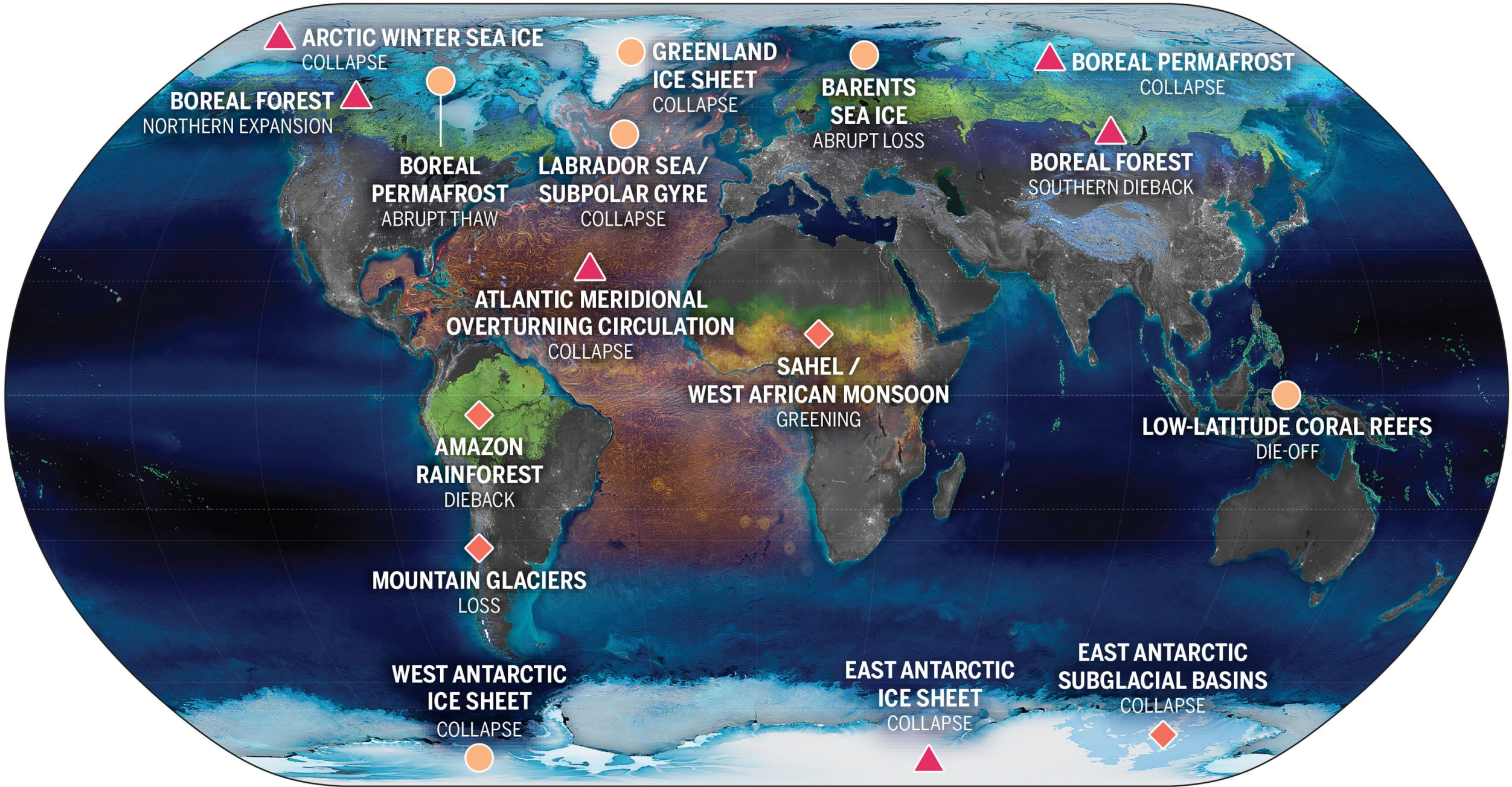
[BBC at: https://youtu.be/zNO0kxTCIYo](https://youtu.be/zNO0kxTCIYo)



population density [persons per km²]



Η αναγνώριση και διατύπωση των πρώτων tipping points στην κλασική εργασία των Lenton κ.α. στο PNAS.

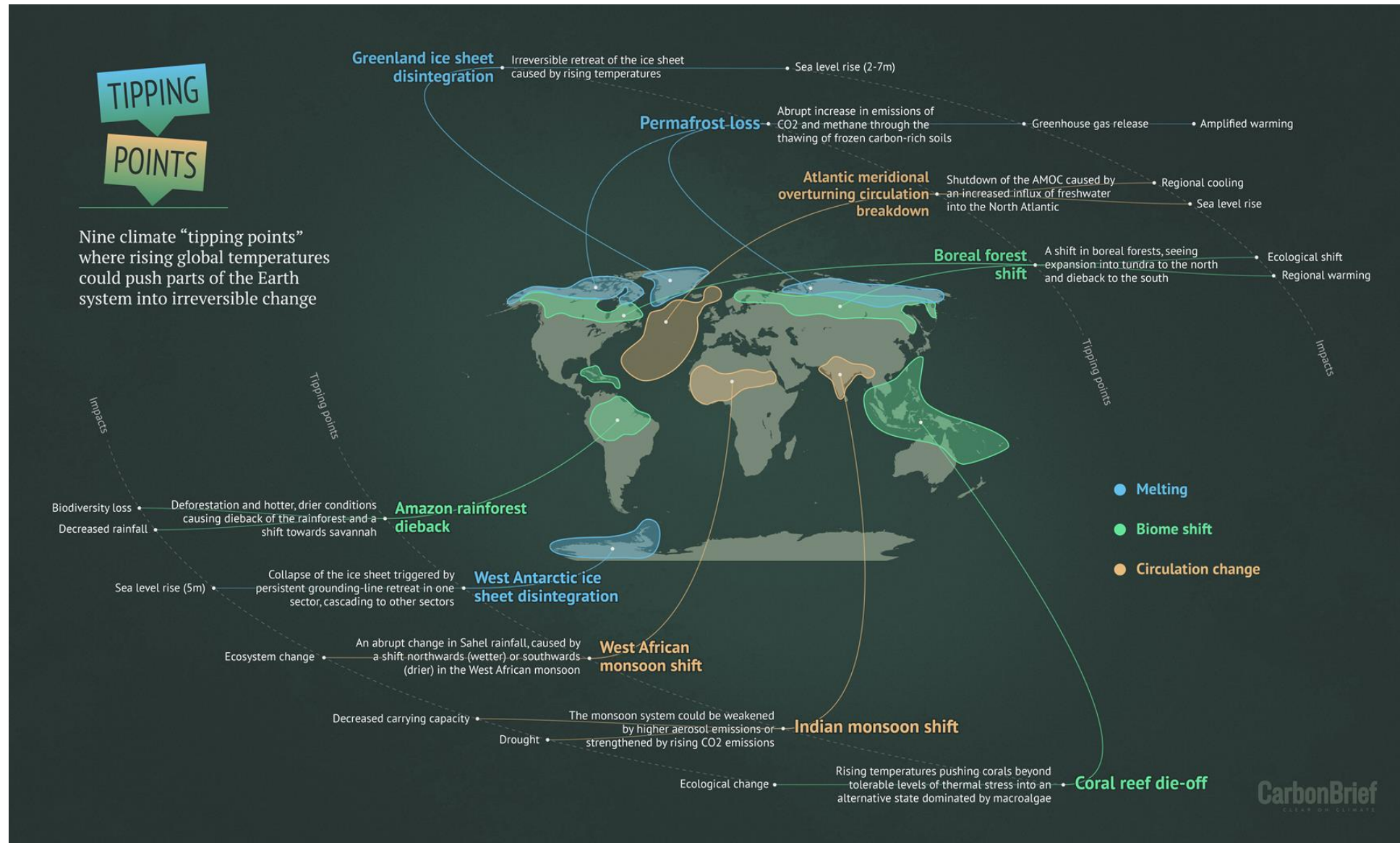


GLOBAL WARMING THRESHOLDS

● $< 2^{\circ}\text{C}$
◆ $2-4^{\circ}\text{C}$
▲ $\geq 4^{\circ}\text{C}$

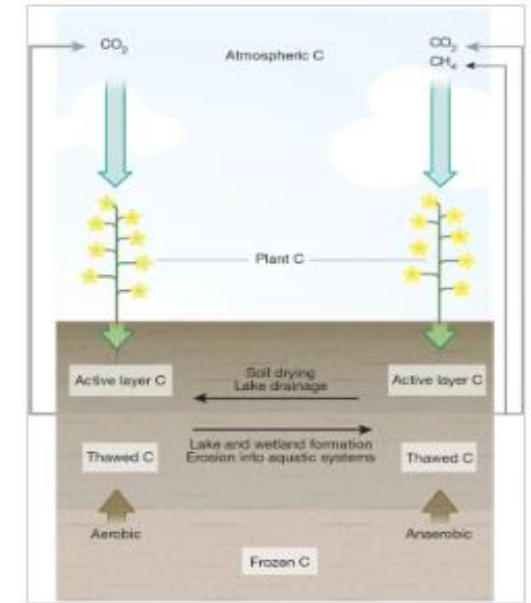
Σημεία ανατροπής (tipping points)

Ανατροφοδοτήσεις της Βιόσφαιρας (Biosphere feedbacks)



Μόνιμα παγωμένο έδαφος (permafrost)

- Η ποσότητα άνθρακα αποθηκευμένη στο μόνιμο πάγο υπολογίζεται σε περίπου 1.500 γιγατόνους, ή διπλάσια από ό,τι περιέχει η ατμόσφαιρα. Αυτός ο άνθρακας προέρχεται από υπολείμματα φυτών και άλλων οργανικών υλικών που δεν αποσυντέθηκαν πλήρως στα παγωμένα εδάφη για χιλιάδες χρόνια. (Ο παλαιότερος γνωστός μόνιμος πάγος είναι περίπου 700.000 ετών!). Καθώς ο μόνιμος πάγος ξεπαγώνει, τα βακτήρια μπορούν να διασπασούν αυτήν την οργανική ύλη, απελευθερώνοντας αυτόν τον άνθρακα στην ατμόσφαιρα ως διοξείδιο του άνθρακα ή μεθάνιο.
- Οι επιστήμονες του κλίματος προσπαθούν να κατανοήσουν καλύτερα πόσο άνθρακας θα απελευθερωθεί κατά την απόψυξη του μόνιμου παγετού τις επόμενες δεκαετίες. Δεν υπάρχει ακόμη επιστημονική συναίνεση.
- Ο άνθρακας σε μόνιμα παγωμένο έδαφος, αφού αποψυχθεί, μπορεί να εισέλθει σε οικοσυστήματα που έχουν είτε κυρίως αερόβιες συνθήκες (υπάρχει οξυγόνο) (αριστερή πλευρά του διαγράμματος δίπλα) είτε κυρίως αναερόβιες (περιορισμένο σε οξυγόνο) (δεξιά πλευρά) συνθήκες εδάφους. Στα αερόβια εδάφη, το CO₂ απελευθερώνεται με μικροβιακή αποσύνθεση του οργανικού άνθρακα του εδάφους, ενώ τόσο το CO₂ όσο και το CH₄ απελευθερώνονται από τα αναερόβια εδάφη και τα ιζήματα. Η μικροβιακή διάσπαση του οργανικού άνθρακα του εδάφους μπορεί να συμβεί στο επιφανειακά ενεργό στρώμα, το οποίο ξεπαγώνει κάθε καλοκαίρι και ξαναπαγώνει το χειμώνα, και στο υπέδαφος καθώς ο πρόσφατα αποψυγμένος άνθρακας γίνεται διαθέσιμος για αποσύνθεση αφού έχει αναδυθεί από την πολυετή παγωμένη αποθήκη.



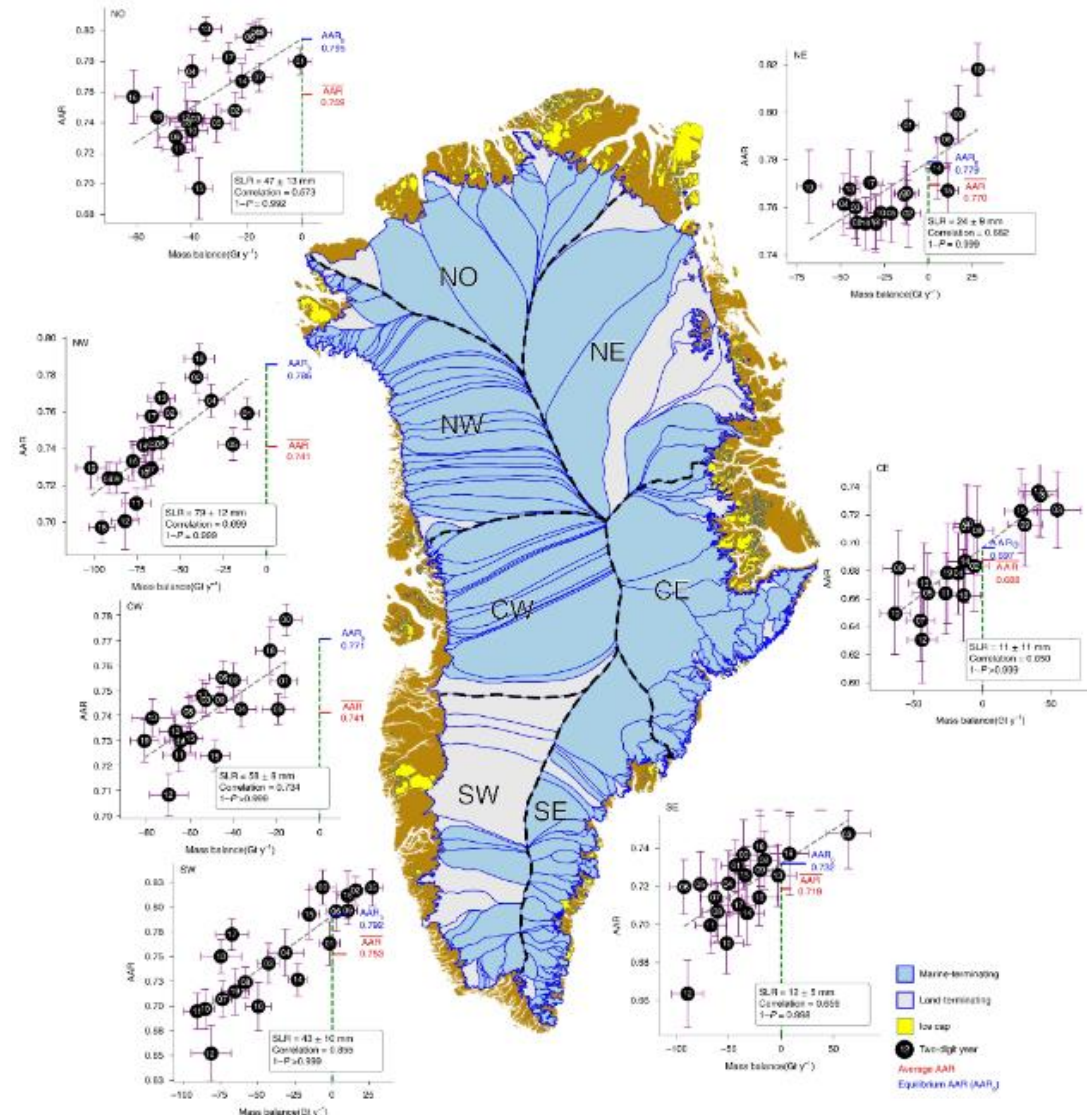
EAG Schuur *et al.* *Climate change and the permafrost carbon feedback.* *Nature* **520**, 1-9(2015)
doi:10.1038/nature14338

Εάν η Αρκτική συνεχίσει να θερμαίνεται τόσο γρήγορα όσο προβλέπουν τα κλιματικά μοντέλα, υπολογίζεται ότι 2,5 εκατομμύρια τετραγωνικά μίλια μόνιμα παγωμένου εδάφους – 40% αυτού του είδους εδαφών του κόσμου - θα μπορούσαν να εξαφανιστούν μέχρι το τέλος του αιώνα, με τεράστιες συνέπειες. Το πιο ανησυχητικό αναμένεται να είναι η απελευθέρωση τεράστιων αποθεμάτων αερίων του θερμοκηπίου, συμπεριλαμβανομένου του μεθανίου, του διοξειδίου του άνθρακα και του υποξειδίου του αζώτου που έχουν παραμείνει κλειδωμένα στον μόνιμο παγετό για αιώνες. Θα απελευθερωθούν επίσης παθογόνα.

[Yale Environment 360](#)

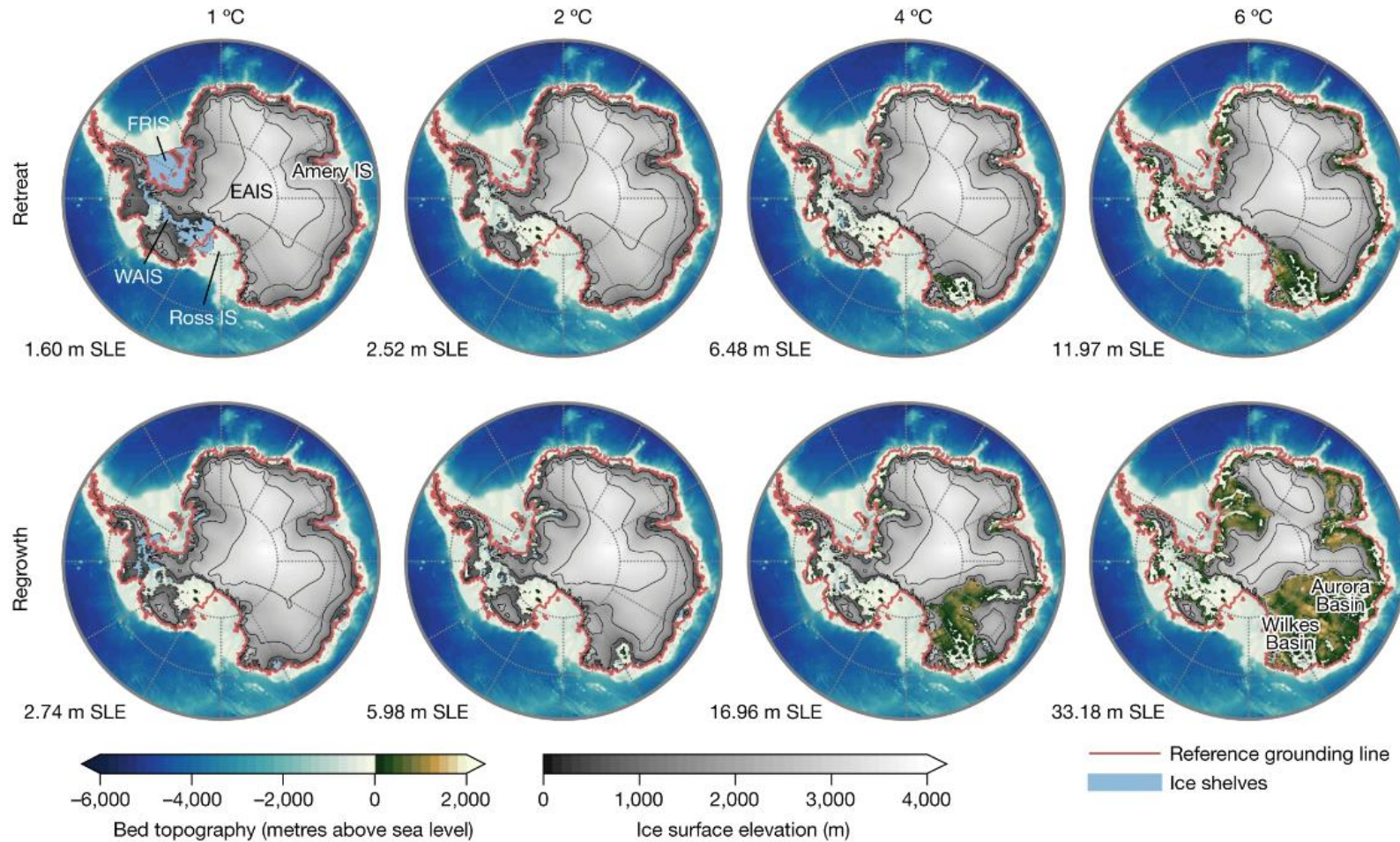
Λειώσιμο παγετώνων Γροιλανδίας

- Η απώλεια πάγου από το στρώμα πάγου της Γροιλανδίας είναι μια από τις μεγαλύτερες πηγές σύγχρονης ανόδου της στάθμης της θάλασσας (SLR).
- Επιστήμονες διαπίστωσαν ότι η ανισορροπία του πάγου της Γροιλανδίας με το πρόσφατο κλίμα (2000–2019) προκαλεί τουλάχιστον 274 ± 68 mm SLR από $59 \pm 15 \times 10^3$ km² υποχώρησης πάγου. Αυτό ισοδυναμεί με $3,3 \pm 0,9\%$ απώλειας όγκου, ανεξαρτήτως της πορείας του κλίματος. Αυτό είναι αποτέλεσμα της αυξανόμενης μάζας από τις κατακρημνίσεις, την εκκένωση ροής πάγου και την επιφανειακή απορροή του τήγματος. Εάν εφαρμοστεί στο διηνεκές το έτος υψηλής τήξης του 2012, αυτό δίνει απώλεια πάγου που αντιστοιχεί σε 782 ± 135 mm SLR, που χρησιμεύει ως δυσοίωνη πρόγνωση για την τροχιά της Γροιλανδίας στον 21^ο αιώνα.

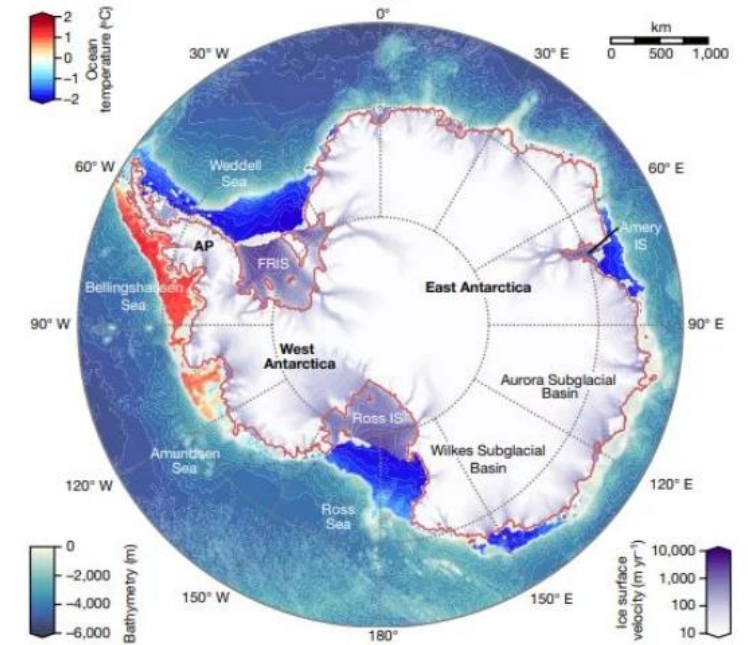


Λειώσιμο παγετώνων Ανταρκτικής

Long-term ice loss for different warming levels.



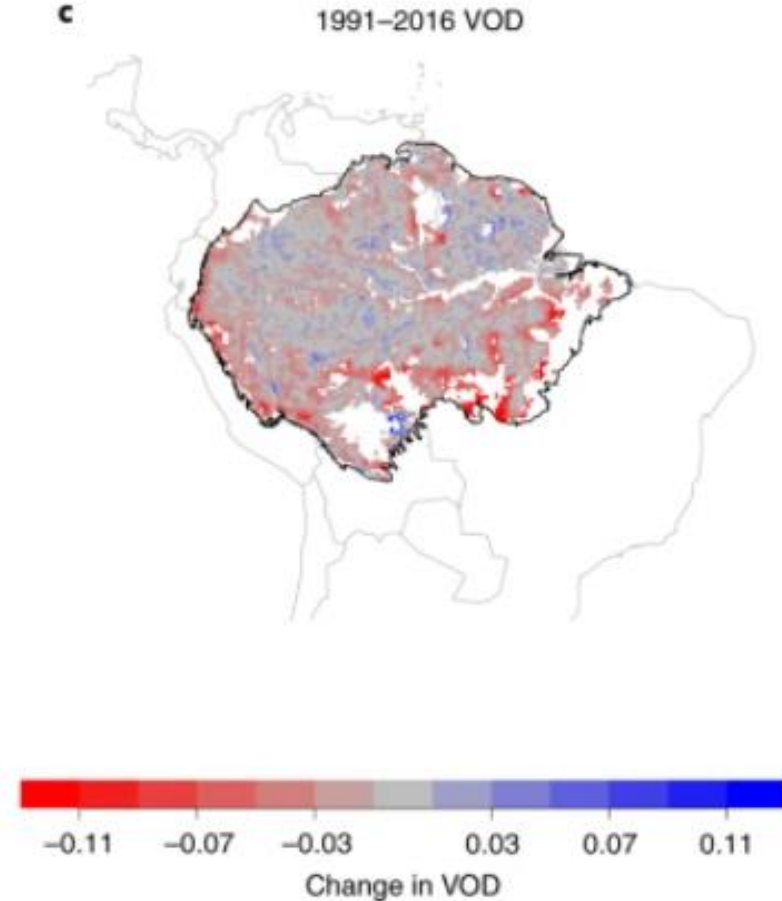
Antarctic ice velocities and surrounding ocean temperatures.



source : The hysteresis of the Antarctic Ice Sheet
Garbe & al. 2020

Η ξήρανση (dieback) του δάσους του Αμαζονίου

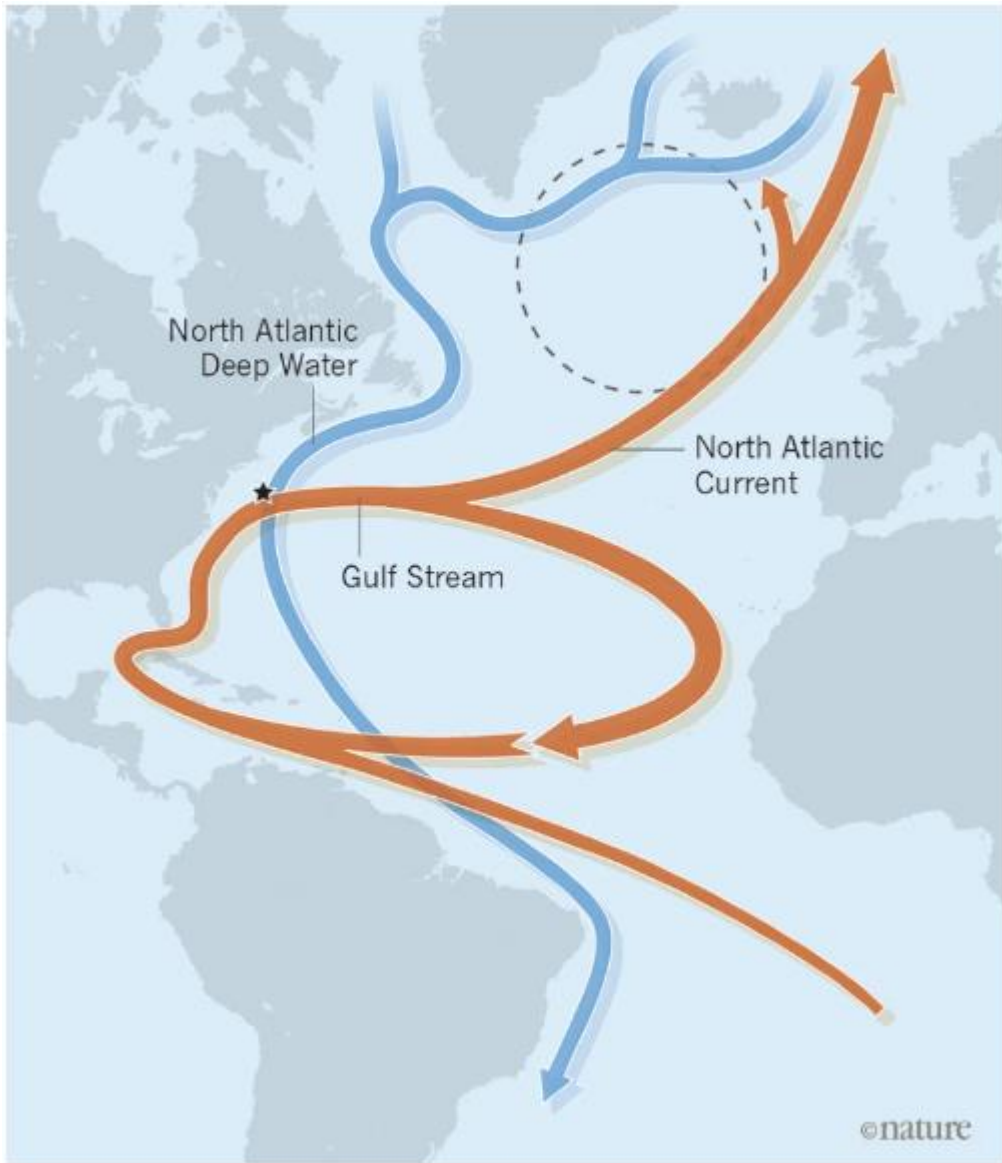
- Το δάσος του Αμαζονίου διατηρεί το δικό του κλίμα ανακυκλώνοντας νερό στην ατμόσφαιρα, γεγονός που διατηρεί τις βροχοπτώσεις και μειώνει τη διάρκεια των ξηρών περιόδων. Η αποψίλωση των δασών υπονομεύει αυτούς τους ρυθμιστικούς μηχανισμούς και μπορεί, τελικά, να οδηγήσει σε ένα οριακό σημείο.
- Σε συνδυασμό με την περίοδο της ξηρασίας που γίνεται αρκετά μεγάλη και επιτρέπει τακτικές φυσικές πυρκαγιές, θα μπορούσε να οδηγήσει τη μετάβαση του δάσους σε μια μόνιμη σαβάνα. Αυτό θα χαρακτηριζόταν από ένα μικτό σύστημα δέντρων και λιβαδιών με ανοιχτό θόλο που επιτρέπει στο έδαφος να γίνει πολύ πιο ζεστό και ξηρό, καθώς και να αποθηκεύει πολύ λιγότερο άνθρακα».
- Πρόσφατα αποτελέσματα που δημοσιεύθηκαν στο Nature Climate Change, δηλώνουν ότι περισσότερα από τα τρία τέταρτα του τροπικού δάσους του Αμαζονίου έχουν ήδη χάσει την ανθεκτικότητά τους τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Τα πιο ξηρά μέρη του Αμαζονίου και περιοχές που γειτνιάζουν με περιοχές χρήσης γης, όπως δρόμοι και γεωργικές εκτάσεις είναι τα λιγότερο ανθεκτικά.
- Το δάσος του Αμαζονίου πλησιάζει σε ένα «κρίσιμο όριο» ή «σημείο ανατροπής»; Δεν μπορεί κανείς να πει πότε θα συμβεί κάτι τέτοιο με βάση αυτή την ανάλυση.



Οι συγγραφείς αξιολογούν το "vegetation optical depth" (VOD) - ένα μέτρο της ποσότητας βιομάζας στα φυτά, το οποίο σχετίζεται στενά με την περιεκτικότητα σε νερό και συνεπώς με μια σημαντική παράμετρο ανθεκτικότητας του δάσους.

Boulton, C.A., Lenton, T.M. & Boers, N. Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s. Nature Climate Change 12, 271–278 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01287-8>

Η μεσημβρινή ανατροπή κυκλοφορίας του Ατλαντικού (AMOC) και η υποπολική κυκλική κίνηση Atlantic Meridional Overturning Circulation



Το AMOC είναι ένα σύστημα ωκεάνιας κυκλοφορίας που αποτελείται από θερμά επιφανειακά ρεύματα (πορτοκαλί) και κρύες ροές επιστροφής βαθέων υδάτων (μπλε), όπως φαίνεται σε αυτήν την απλοποιημένη αναπαράσταση. Τα επιφανειακά ρεύματα περιλαμβάνουν το Ρεύμα του Κόλπου, το οποίο τροφοδοτεί έναν κλάδο του AMOC γνωστό ως Βόρειο Ατλαντικό Ρεύμα. Οι ροές επιστροφής βαθέων υδάτων ξεκινούν από τρεις κλάδους που συγχωνεύονται στο Βόρειο Ατλαντικό Deep Water. Ερευνητές χρησιμοποίησαν μετρήσεις λάσπης σε πυρήνες ιζήματος για να ανακατασκευάσουν την ταχύτητα ροής του AMOC τα τελευταία 1.600 χρόνια. Το μαύρο αστέρι υποδεικνύει την κατά προσέγγιση τοποθεσία στην οποία συλλέχθηκαν οι πυρήνες των ιζημάτων. Άλλοι ερευνητές ανέλυσαν τις ανωμαλίες θερμοκρασίας στην υποπολική κυκλική κίνηση του Βορείου Ατλαντικού (διακεκομμένη γραμμή) για να συμπεράνουν αλλαγές στη ροή AMOC τον περασμένο αιώνα. Και οι δύο μελέτες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι το AMOC έχει αποδυναμωθεί κατά περίπου 15% κατά τις υπό εξέταση περιόδους, αλλά διαφέρουν ως προς το πότε άρχισε να μειώνεται η ροή.

Praetorius, S.K. 2018. North Atlantic circulation slows down. *Nature* 556, 180-181 (2018). doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-018-04086-4>