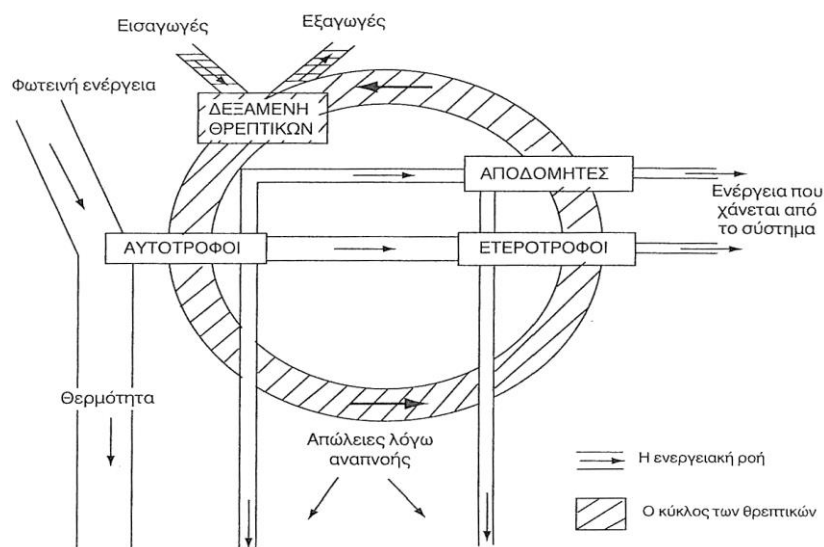


Η ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΕΑ ΤΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ ΤΩΝ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ

Η ροή της ενέργειας μέσα στα οικοσυστήματα έχει φορά μονόδρομη. Η ηλιακή ενέργεια που δεσμεύεται από τα φυτά, καταναλώνεται γρήγορα μέσα από τις τροφικές αλυσίδες και τελικά διαφεύγει από το σύστημα. Αντίθετα, τα θρεπτικά τα οποία είναι αναγκαία για την παραγωγή της οργανικής ύλης, κυκλοφορούν μέσα στο σύστημα και ξαναχρησιμοποιούνται αρκετές φορές. Όταν τα σώματα των φυτών και των ζώων αποσυντεθούν με τη βοήθεια των βακτηρίων και των μυκήτων, τα θρεπτικά που βρίσκονται μέσα σε αυτά απελευθερώνονται στο αβιοτικό περιβάλλον και σχηματίζουν μια δεξαμενή ή παρακαταθήκη θρεπτικών.

Στα χερσαία οικοσυστήματα, τα θρεπτικά συνήθως απελευθερώνονται στο έδαφος. Από εκεί μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν μέσω της πρόσληψής της από τα φυτά. Με τον τρόπο αυτό τα θρεπτικά εισέρχονται εκ νέου στο οικοσύστημα και μπορούν να ξανακυκλοφορήσουν μέσα σε αυτό.

Στο Σχ. 6 φαίνεται ένας κύκλος θρεπτικών μαζί με το διάγραμμα της ενεργειακής ροής που μας δείχνει πως η μονόδρομη ροή της ενέργειας καθοδηγεί τον κύκλο των θρεπτικών.



Σχ. 6. Ένας βιογεωχημικός κύκλος (ο γοαμμοσκιασμένος κυκλικός δακτύλιος) επάνω σε ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενεργειακής ροής.

Η δράση των κύκλων των θρεπτικών είναι αυτή που κάνει τα οργανικά και ανόργανα στοιχεία του οικοσυστήματος να είναι άρρηκτα δεμένα μεταξύ τους και τόσο αλληλοεξαρτώμενα που τις περισσότερες φορές είναι δύσκολο να τα ξεχωρίσουμε στη φύση. Οι δύο θεμελιώδεις διεργασίες της μεταφοράς της ενέργειας και της κυκλοφορίας των θρεπτικών είναι κοινές και χαρακτηριστικές για ολόκληρη τη βιόσφαιρα. Και στις δύο, τα πράσινα φυτά εξασφαλίζουν τη ζωτική σύνδεση ανάμεσα στα αβιοτικά και στα βιοτικά στοιχεία του οικοσυστήματος. Αποτελούν το σημείο στο οποίο η ενέργεια και τα θρεπτικά εισέρχονται στο βιοτικό τμήμα του συστήματος.

ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΘΡΕΠΤΙΚΑ

Είδη θρεπτικών. Τα θρεπτικά, που είναι, επίσης, γνωστά και ως βιογενή άλατα, κατατάσσονται σε δύο κύριες ομάδες.

- **(α') Μακροθρεπτικά.** Είναι τα θρεπτικά που οι οργανισμοί τα χρειάζονται σε μεγάλες ποσότητες και παίζουν κύριο ρόλο στη δημιουργία του πρωτοπλάσματος (ζώσα ύλη). Τα σημαντικότερα θρεπτικά αυτής της κατηγορίας είναι το υδρογόνο, ο άνθρακας, το οξυγόνο και το άζωτο, που όλα μαζί αποτελούν πάνω από το 95% του ξηρού βάρους της ζώσας ύλης. Αυτά τα 4 θρεπτικά προσλαμβάνονται άμεσα ή έμμεσα σε αέρια μορφή από την ατμόσφαιρα. Στα μακροθρεπτικά περιλαμβάνονται και άλλα θρεπτικά που είναι αναγκαία σε μικρότερες ποσότητες όπως το κάλιο, το θείο και ο φώσφορος.
- **(β') Μικροθρεπτικά ή ιχνοστοιχεία.** Είναι στοιχεία απαραίτητα για τη ζωή, που, όμως, οι οργανισμοί τα χρειάζονται σε πολύ μικρές ποσότητες. Τα φυτά χρειάζονται τουλάχιστο δέκα διαφορετικά μικροθρεπτικά. Πολλά από αυτά όπως ο σίδηρος, ο χαλκός, ο ψευδάργυρος και το βόριο, προήλθαν από την αποσάθρωση των πετρωμάτων.

Η σχετική αφθονία των θρεπτικών στους οργανισμούς.

- **(α') Ποσότητες που βρίσκονται στη βιομάζα.** Παρ' όλο που τα φυτά μπορούν να απορροφήσουν όλα τα φυσικά στοιχεία, τρία μόνο από αυτά (ο άνθρακας, το οξυγόνο και το υδρογόνο) βρίσκονται συνήθως σε μεγάλες ποσότητες στη ζωντανή ύλη. Από αυτά τα τρία, το υδρογόνο και το οξυγόνο ενωμένο με τη μορφή νερού, αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του βάρους όλων των μορφών ζωής.
- **(β') Ποσότητες που προσλαμβάνονται από τους οργανισμούς.** Τα περισσότερα στοιχεία απορροφούνται από τους ζωντανούς οργανισμούς είτε σε αέρια μορφή είτε με τη μορφή υδροδιαλυτών αλάτων (NaCl). Τα περισσότερα φυτά δεν κάνουν διάκριση στη διατροφή τους, καθώς προσλαμβάνουν στοιχεία και ενώσεις λίγο ως πολύ κατά την αναλογία με την οποία βρίσκονται στο περιβάλλον τους. Για πολλούς και σύνθετους, ωστόσο, λόγους, που έχουν να κάνουν με τις συνθήκες του περιβάλλοντος και τη φυσιολογία των φυτών, αναπόφευκτα εμφανίζονται ορισμένες διαφορές στην πρόσληψη συγκεκριμένων στοιχείων από διαφορετικών τύπων οργανισμούς. Οι διαφορές αυτές εμφανίζονται ως απόρροια παραγόντων όπως τα χημικά χαρακτηριστικά των διαφόρων θρεπτικών ή ο διαφορετικός μεταβολισμός των φυτών και των ζώων.
- **(γ') Επιλεκτικός χημικός εμπλουτισμός.** Σε ορισμένες περιπτώσεις οι οργανισμοί έχουν την ικανότητα να συσσωρεύουν στοιχεία στο σώμα τους, σε συγκεντρώσεις που υπερβαίνουν τις επικρατούσες στο άμεσο περιβάλλον τους. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως επιλεκτικός χημικός εμπλουτισμός. Τις περισσότερες φορές εμφανίζεται στα χερσαία φυτά, αλλά το συναντάμε και σε απλούς υδρόβιους οργανισμούς. Πολλοί θαλάσσιοι οργανισμοί, για παράδειγμα, έχουν την ικανότητα

να αντλούν μεγάλες ποσότητες ανθρακικού ασβεστίου και πυριτίου από το θαλασσινό νερό, ενώ τα όστρακα μπορούν να συσσωρεύουν στο σώμα τους χαλκό σε συγκεντρώσεις μέχρι και 200 φορές μεγαλύτερες από αυτές που απαντώνται στο υδάτινο περιβάλλον τους.

Η χρήση των μακροθρεπτικών. Τα τρία βασικά μακροθρεπτικά (άνθρακας, υδρογόνο και οξυγόνο) αποτελούν τα σημαντικότερα συστατικά στοιχεία στα λίπη και στους υδατάνθρακες και βοηθούν στο σχηματισμό της βασικής κυτταρικής δομής των φυτών και των ζώων.

Ο άνθρακας, το υδρογόνο και το οξυγόνο, μαζί με το άζωτο - το τέταρτο σε σημασία μακροθρεπτικό αποτελούν τη βάση των πρωτεϊνών.

Η προσθήκη του φωσφόρου στα τέσσερα αυτά στοιχεία παρέχει τα βασικά δομικά συστατικά για το σχηματισμό των νουκλεϊκών οξέων τα οποία με τη σειρά τους σχηματίζουν το γενετικό προσχέδιο των κυττάρων.

Άλλα μακροθρεπτικά απαιτούνται σε μικρότερες ποσότητες. Το ασβέστιο, για παράδειγμα, χρησιμοποιείται για την ενίσχυση των κυτταρικών τοιχωμάτων και το θείο για την παρασκευή των αμινοξέων, που είναι απαραίτητα για το σχηματισμό των πρωτεϊνών.

Η χρήση των μικροθρεπτικών. Τα μικροθρεπτικά συχνά είναι βασικά συστατικά στοιχεία των κυτταρικών δομών. Το μαγνήσιο, για παράδειγμα, χρησιμοποιείται σε πολύ μικρές ποσότητες για την παραγωγή της χλωροφύλλης, της πράσινης αυτής ουσίας μέσω της οποίας απορροφάται η ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης.

Πολύ συχνά τα μικροθρεπτικά απαιτούνται για την παρασκευή των ενζύμων. Τα ένζυμα είναι πρωτεΐνες που δρουν ως οργανικοί καταλύτες για την επιτάχυνση των χημικών αντιδράσεων στο κύτταρο. Πολλά ένζυμα χρειάζονται συγκεκριμένα χημικά στοιχεία.

Το πρόβλημα της χρήσης των θρεπτικών στα ζώα. Τα ζώα, όχι μόνο έχουν πιο ποικίλες θρεπτικές απαιτήσεις από τα φυτά, αλλά και στο μεταβολισμό τους εμπλέκονται διαφορετικές χημικές αντιδράσεις. Σε γενικές γραμμές, τα κύτταρα των ζώων παρουσιάζουν περιορισμένες δυνατότητες σύνθεσης οργανικών ενώσεων. Πράγματι, ο μεταβολισμός τους δε συντηρείται παρά μόνο με την απόκτηση έτοιμης οργανικής τροφής όπως πρωτεΐνες, βιταμίνες και λίπη.

Οι ετερότροφοι οργανισμοί τις τροφές αυτές τις προμηθεύονται έτοιμες από τα φυτά που τις έχουν ήδη συνθέσει, είτε άμεσα τρώγοντας τα ίδια τα φυτά είτε έμμεσα τρώγοντας άλλα ζώα. Έτσι, παρ' όλο που και στα φυτά και στα ζώα υπάρχουν τα ίδια στοιχεία, τα θρεπτικά περνούν από το πρώτο τροφικό επίπεδο στο δεύτερο, ως έτοιμες προκατασκευασμένες οργανικές ενώσεις μάλλον, παρά ως απλές ουσίες.

Μη-βασικά στοιχεία. Πολλά στοιχεία, χωρίς καμία, γνωστή τουλάχιστον, βιολογική λειτουργία κυκλοφορούν ανάμεσα στα βιοτικά και στα αβιοτικά στοιχεία των

οικοσυστημάτων. Μεγάλες ποσότητες ορυκτών, όπως το πυρίτιο, για παράδειγμα, μπαίνουν και βγαίνουν στο αβιοτικό περιβάλλον.

Το παραπάνω χαρακτηριστικό μπορεί να έχει μεγάλη οικολογική σημασία στην περίπτωση που αυτά τα στοιχεία απαντώνται σε ποσότητες που είναι χημικά τοξικές ή αν αντιδρούν χημικά στο έδαφος με τρόπο που μπορεί να καταστήσει τα βασικά στοιχεία μη διαθέσιμα για τα φυτά.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΒΙΟΓΕΩΧΗΜΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ

Η λειτουργία όλων των οικοσυστημάτων εξαρτάται από την κυκλοφορία των θρεπτικών. Στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι σκόπιμο να εξετάζουμε την κυκλοφορία των θρεπτικών σε επίπεδο πλανήτη, καθώς σε τοπικό επίπεδο πάντα υπάρχουν πολλές εισροές και εκροές θρεπτικών από τα οικοσυστήματα. Στα χερσαία οικοσυστήματα, για παράδειγμα, υπάρχει πάντα διαρροή θρεπτικών μέσω των υδάτων απορροής. Από την άλλη, όμως, νέες ποσότητες εισέρχονται στο οικοσύστημα με το νερό της βροχής και την αποσάθρωση των πετρωμάτων.

Βασικά χαρακτηριστικά των βιογεωχημικών κύκλων. Οι κύκλοι των θρεπτικών σε κλίμακα πλανήτη είναι γνωστοί ως βιογεωχημικοί κύκλοι. Σε όλους τους βιογεωχημικούς κύκλους εμπλέκονται αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στο έδαφος και στην ατμόσφαιρα.

Οι ανταλλαγές θρεπτικών στους κύκλους απαιτούν την παρουσία μεγάλης ποικιλίας ζωντανών οργανισμών που οι διαδικασίες της γέννησης, της ανάπτυξης και του θανάτου τους, υποβοηθούν στη διακίνηση των θρεπτικών μέσα στα οικοσυστήματα. Για το λόγο αυτό θα περίμενε κανείς ότι οι κύκλοι λαμβάνουν χώρα σε όλα τα επίπεδα της βιόσφαιρας. Πράγματι, ορισμένες διεργασίες των βιογεωχημικών κύκλων συμβαίνουν σε μεγάλα ύψη στην ατμόσφαιρα, ενώ άλλες ανιχνεύονται στο μητρικό πέτρωμα, αρκετές χιλιάδες μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Οι περισσότερες ανταλλαγές, ωστόσο, λαμβάνουν χώρα στη ζώνη επαφής της κατώτερης ατμόσφαιρας με την επιφάνεια του εδάφους όπου αφθονεί η ζωή και όπου οι ετήσιες διακινήσεις των υλικών είναι τεράστιες.

Ο κάθε βιογεωχημικός κύκλος αποτελείται από δύο βασικά μέρη.

- (α') Μια δεξαμενή αποθήκευσης, ένα μη βιολογικό στοιχείο που κινείται αργά και είναι απρόσιτο στους οργανισμούς.
- (β') Μια δεξαμενή ανταλλαγής ή δεξαμενή θρεπτικών, ένα μικρότερο και πιο ενεργό τμήμα όπου τα θρεπτικά ανταλλάσσονται ανάμεσα στα βιοτικά και αβιοτικά μέρη του συστήματος.

Τύποι βιογεωχημικών κύκλων. Οι κύκλοι μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες, με βάση το πού βρίσκεται η δεξαμενή αποθήκευσής τους.

- (α') **Αέριοι κύκλοι**, Η δεξαμενή αποθήκευσής τους είναι η ατμόσφαιρα. Τα θρεπτικά εισέρχονται και εξέρχονται από τη βιόσφαιρα σε αέρια μορφή.
- (β') **Ιζηματογενείς κύκλοι**. Η δεξαμενή αποθήκευσής τους είναι ο φλοιός της Γης. Τα θρεπτικά, εισέρχονται στη βιόσφαιρα από τα πετρώματα που αποσπώνονται και εξέρχονται ως ιζήματα.

Οι κύκλοι διαφέρουν στο βαθμό ανταλλαγής των στοιχείων μεταξύ των αβιοτικών και των βιοτικών μερών του οικοσυστήματος. Σε γενικές γραμμές, στους αέριους κύκλους, η ανταλλαγή είναι πιο πλήρης από ότι στους ιζηματογενείς. Και οι δύο τύποι θεωρούνται σταθεροί, αλλά οι ιζηματογενείς παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία σε τυχόν ανθρώπινη παρέμβαση.

- (α') Οι περισσότεροι αέριοι κύκλοι, όπως αυτοί του άνθρακα, του οξυγόνου και του υδρογόνου, αυτορρυθμίζονται σε περίπτωση τοπικής μεταβολής, εξαιτίας της μεγάλης ατμοσφαιρικής δεξαμενής αποθήκευσης, που διαθέτουν. Τοπικές αυξήσεις στις συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα, για παράδειγμα, οι οποίες προκαλούνται από την καύση των ορυκτών καυσίμων, εξαφανίζονται γρήγορα με τη βοήθεια των κινήσεων του αέρα και με αύξηση της απορρόφησής του από τα φυτά. Με τον τρόπο αυτό λειτουργεί ένας **έλεγχος αρνητικής ανάδρασης**.
- (β') Οι ιζηματογενείς κύκλοι, όπως αυτοί του φωσφόρου και του θείου, είναι λιγότερο πλήρεις και διαταράσσονται ευκολότερα από δράσεις τοπικού χαρακτήρα. Τοπικές διακυμάνσεις στη δεξαμενή αποθήκευσης του φλοιού της Γης, ρυθμίζονται δυσκολότερα καθώς η δεξαμενή εδώ, είναι σχετικά ανενεργή και ακίνητη όταν συγκριθεί με την ατμόσφαιρα. Έτσι, αν κάποιο μέρος των θρεπτικών στη δεξαμενή ανταλλαγής χαθεί στη δεξαμενή αποθήκευσης του φλοιού της Γης καθίσταται για πολύ καιρό απρόσιτο στους οργανισμούς.

Ρυθμοί ανακύκλωσης των θρεπτικών. Ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό και χωρικά και χρονικά. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό ανακύκλωσης είναι οι ακόλουθοι:

- (α') **Η φύση του στοιχείου**. Ορισμένα θρεπτικά ανακυκλώνονται με γρηγορότερους ρυθμούς από άλλα εξαιτίας των χημικών χαρακτηριστικών τους και του τρόπου που αυτά χρησιμοποιούνται από τους οργανισμούς. Τα θρεπτικά των αέριων κύκλων ανακυκλώνονται συνήθως γρηγορότερα από εκείνα των ιζηματογενών' κύκλων.
- (β') **Ο ρυθμός ανάπτυξης των φυτών και των ζώων**. Επηρεάζει το ρυθμό πρόσληψης των θρεπτικών και την κυκλοφορία τους μέσα στα τροφικά δίκτυα.
- (γ') **Ο ρυθμός αποσύνθεσης της οργανικής ύλης**. Εξαρτάται, πρωτίστως, από το κλίμα και τον τύπο του εδάφους. Σε εδάφη ευνοϊκά, όπως αυτά των θερμών και υγρών περιοχών, οι αποδομητές οργανισμοί συναντώνται σε πυκνότητες της τάξης των εκατομμυρίων ανά γραμμάριο εδάφους. Το γεγονός αυτό διευκολύνει την ταχεία αποδόμηση της βιομάζας που με τη σειρά της έχει ως αποτέλεσμα τη

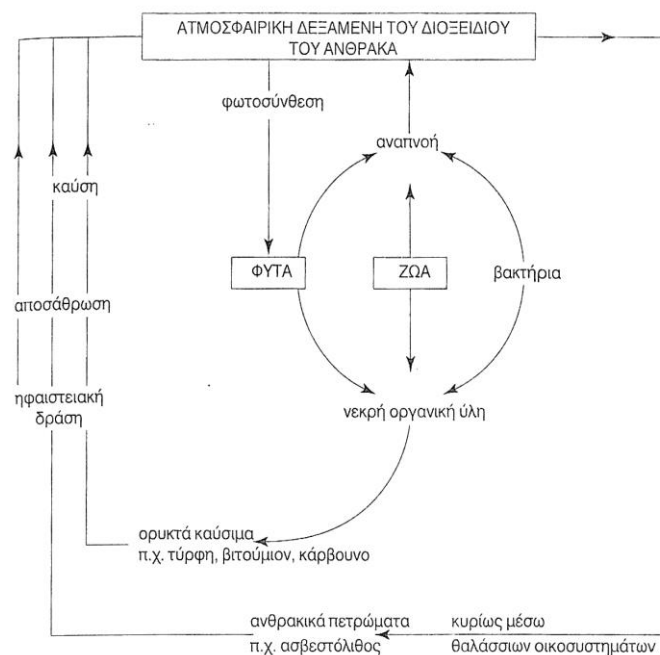
γρήγορη απελευθέρωση θρεπτικών. Στις κρύες και υγρές περιοχές αντίθετα, τα βακτήρια και οι μύκητες είναι λίγα και η αποδόμηση γίνεται με πιο αργούς ρυθμούς. Στις περιπτώσεις αυτές ενδέχεται να παρατηρηθεί συσσώρευση οργανικής ύλης εξαιτίας του αργού ρυθμού καταστροφής της. Ένας άλλος παράγοντας που παίζει, επίσης, σημαντικό ρόλο στο ρυθμό αποδόμησης είναι η οξύτητα του εδάφους. Τα αλκαλικά εδάφη γενικά, υποβοηθούν τη γρήγορη αποδόμηση της οργανικής ύλης, ενώ τα όξινα, που δεν είναι ευνοϊκά για τα βακτήρια, εμποδίζουν τη γρήγορη αποσύνθεση.

- **(δ') Οι ανθρώπινες δραστηριότητες**, επηρεάζουν σημαντικά το ρυθμό ανακύκλωσης των θρεπτικών. Η γεωργία, για παράδειγμα, όπως και η αποψίλωση των δασών επηρεάζουν το ρυθμό με τον οποίο τα μεταλλικά θρεπτικά αποπλένονται από το έδαφος με το νερό της βροχής και η καύση των ορυκτών καυσίμων απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες θείου και διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αέριου βιογεωχημικού κύκλου καθώς η κύρια δεξαμενή άνθρακα είναι το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας. Ο άνθρακας είναι το σημαντικότερο απλό στοιχείο της οργανικής χημείας και ανακυκλώνεται συνεχώς στα βιοτικά και στα αβιοτικά μέρη των οικοσυστημάτων.

Ο κύκλος του άνθρακα έχει πολλά κοινά χαρακτηριστικά με άλλους βιογεωχημικούς κύκλους, αλλά περισσότερο μοιάζει προς τη ροή της ενέργειας μέσα από ένα οικοσύστημα. Ο κύκλος του άνθρακα είναι γενικά ένα πλήρες, καλά ρυθμιζόμενο σύστημα με αρκετούς μηχανισμούς ανάδρασης, ώστε να εξασφαλίζεται ο πλήρης εφοδιασμός σε άνθρακα για την ανάπτυξη των οργανισμών. Οι κύριοι οδοί του κύκλου φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί



Σχ. 7. Ο κύκλος του άνθρακα.

Πρόσληψη του διοξειδίου του άνθρακα από τα φυτά. Το σύνολο σχεδόν του άνθρακα εισέρχεται στο βιοτικό τμήμα των οικοσυστημάτων μέσω της άμεσης πρόσληψης διοξειδίου του άνθρακα από τα φυτά. Το διοξείδιο του άνθρακα χρησιμοποιείται για την παρασκευή σακχάρων και υδατανθράκων μέσω της φωτοσύνθεσης.

Ορισμένες από αυτές τις ουσίες, ενσωματώνονται στη δομή του φυτού, ενώ άλλες χρησιμοποιούνται για την αναπνοή και το διοξείδιο του άνθρακα που περιέχουν απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Η μισή περίπου ποσότητα του άνθρακα που έχει αφομοιωθεί καταλήγει τελικά στο έδαφος με τη μορφή αποσυντιθέμενης οργανικής ύλης.

Οι συνολικές ποσότητες του άνθρακα που αφομοιώνονται από τα φυτά είναι πολύ μεγάλες. Υπολογίζεται ότι σε ετήσια βάση, απορροφάται το 3% του συνολικού διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας.

Η διέλευση του άνθρακα μέσα από τις τροφικές αλυσίδες. Ο άνθρακας που έχει αφομοιωθεί στους ιστούς των φυτών μπορεί να διέλθει μέσα από τις τροφικές αλυσίδες των οικοσυστημάτων. Οι μακριές τροφικές αλυσίδες είναι δυνατό να μεγαλώσουν τον κύκλο σημαντικά. Ο άνθρακας επιστρέφει στην ατμόσφαιρα ως διοξείδιο του άνθρακα μέσω της αναπνοής που συντελείται στο κάθε τροφικό επίπεδο. Τελικά, η νεκρή οργανική ύλη είτε αποθηκεύεται στο σύστημα είτε περνάει στους αποδομητές.

Νεκρή οργανική ύλη.

- (α') Η νεκρή οργανική ύλη αποτελεί μια συμπληρωματική δεξαμενή άνθρακα στο έδαφος. Ο περισσότερος άνθρακας που βρίσκεται στο έδαφος προέρχεται από το επιφανειακό στρώμα των αποσυντιθέμενων φυτών (φύλλα, κλαδιά κ.λπ.) σημαντική, όμως, είναι και η συνεισφορά των φυτικών ριζών που σαπίζουν, όπως και των νεκρών ζώων.
- (β') Ο ρυθμός και η ταχύτητα αποδόμησης της οργανικής ύλης και συνεπώς και ο ρυθμός απελευθέρωσης άνθρακα, ποικίλλουν αρκετά, ανάλογα με τη φύση του οργανισμού. Τα δέντρα, για παράδειγμα, σαπίζουν πιο αργά από τα τρυφερά ετήσια φυτά. Σε γενικές γραμμές, οι υδατάνθρακες, τα λίπη και οι πρωτεΐνες αποδομούνται πολύ γρήγορα. Δομικά υλικά όπως η κυτταρίνη, απαιτούν περισσότερο χρόνο. Άλλα υλικά παρουσιάζουν μεγάλη ανθεκτικότητα και αποσυντίθενται πολύ αργά.
- (γ') Οργανισμοί που προκαλούν αποδόμηση όπως είναι τα βακτήρια, αλλά και σαπροφάγοι οργανισμοί όπως οι γαιοσκώληκες υποβοηθούν τη διάσπαση της νεκρής ύλης και απελευθερώνουν στην ατμόσφαιρα μέσω της αναπνοής τους διοξείδιο του άνθρακα. Με τον τρόπο αυτό, η ανακύκλωση του άνθρακα στο οικοσύστημα σε ετήσια βάση είναι πλήρης. Μέρος του άνθρακα αποθηκεύεται στο σύστημα, η μεγαλύτερη ποσότητα, όμως, επιστρέφει μέσω της αναπνοής στην ατμόσφαιρα.

Ορυκτά καύσιμα.

- (α') Κάτω από ειδικές συνθήκες, η νεκρή οργανική ύλη μπορεί να σχηματίσει οργανικές εναποθέσεις όπως είναι η τύρφη και το κάρβουνο. Οι εναποθέσεις αυτές αποτελούν μια πρόσθετη αποθήκη οργανικού άνθρακα. Ο άνθρακας αυτός μένει εκτός κυκλοφορίας για μεγάλο χρονικό διάστημα, μπορεί, όμως, να ξαναγυρίσει στην ατμόσφαιρα εάν τα καύσιμα αυτά καούν.
- (β') Η αυξημένη χρήση ορυκτών καυσίμων τα τελευταία χρόνια είχε ως αποτέλεσμα τη γρήγορη επιστροφή μεγάλων ποσών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Παρ' όλο που ένα μέρος τους αφαιρείται με φυσικές διεργασίες υπάρχουν ενδείξεις πως η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα μεγαλώνει και πως δημιουργείται κάποια διατάραξη στον κύκλο του άνθρακα. Οι συνέπειες αυτού του γεγονότος μπορεί να είναι πολλές και μια από αυτές, η σταδιακή μεταβολή του παγκόσμιου κλίματος προς υψηλότερες θερμοκρασίες.

Ανταλλαγή μεταξύ της ατμόσφαιρας και της θάλασσας.

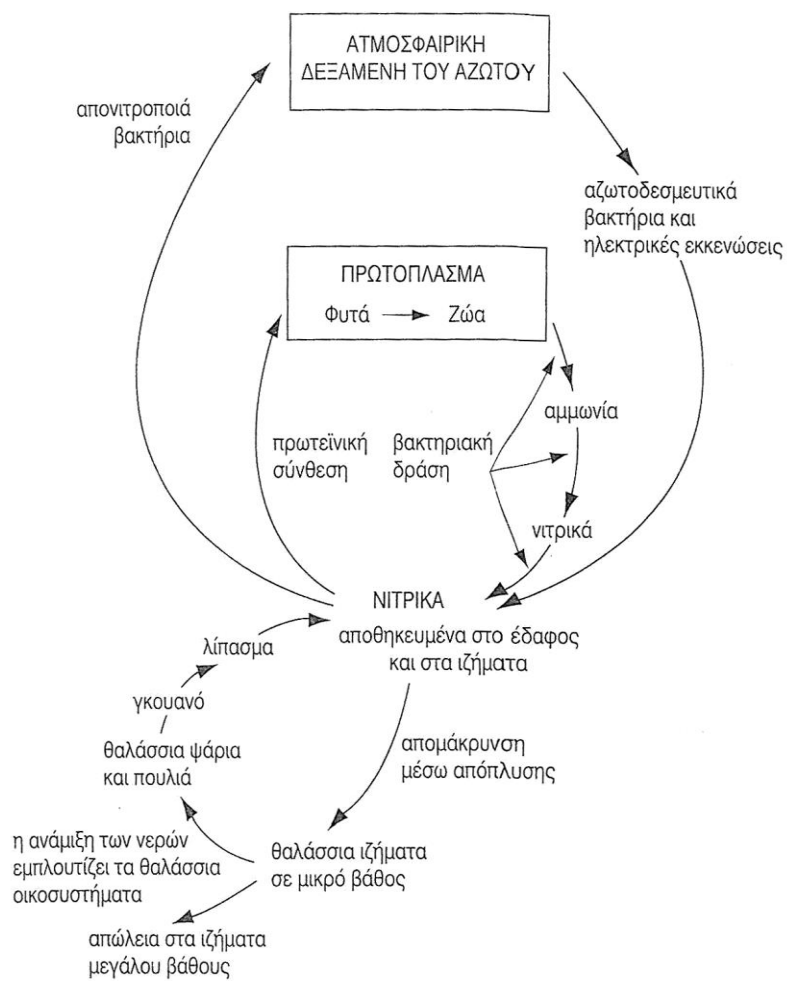
- (α') Το διοξείδιο του άνθρακα διαλύεται εύκολα στο θαλασσινό νερό. Εάν, συνεπώς, η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα αυξηθεί, μεγάλο μέρος του θα απορροφηθεί από τις θάλασσες. Παρ' όλη, όμως, τη ρύθμιση, η μισή περίπου ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα που παράγεται από την καύση των ορυκτών καυσίμων παραμένει στην ατμόσφαιρα. Αυτό συμβαίνει γιατί οι ωκεανοί χρειάζονται σχεδόν διακόσια χρόνια για να αναμιχθούν, ώστε να απορροφήσουν την επιπλέον ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα.
- (β') Το διοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με το νερό, σχηματίζοντας ανθρακικά άλατα και κυρίως ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3). Το υλικό αυτό χρησιμοποιείται από διάφορα ζώα όπως τα μύδια, τα στρείδια και κάποια είδη μικροφυκών και πρωτόζωων για την κατασκευή του κελύφους τους. Μετά το θάνατο αυτών των ζώων το ανθρακικό ασβέστιο μπορεί να διαλυθεί ή να ενσωματωθεί σε ιζήματα σχηματίζοντας τελικά ανθρακικά πετρώματα όπως οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες.

Τα ανθρακικά πετρώματα, αποθηκεύοντας τον άνθρακα για εκατομμύρια χρόνια, συμπεριφέρονται ως περιβαλλοντικοί ρυθμιστές. Ο άνθρακας αυτός μπορεί τελικά να απελευθερωθεί ξανά ως διοξείδιο του άνθρακα, με τη διαδικασία της αποσάθρωσης.

Ηφαιστειακή δράση. Διοξείδιο του άνθρακα εκπέμπεται συνεχώς από τους κρατήρες των ηφαιστειών. Η δράση τους προμηθεύει την ατμόσφαιρα με νέες ποσότητες άνθρακα από το εσωτερικό της Γης.

Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ

Αποτελεί παράδειγμα ιδιαίτερα σύνθετου αέριου κύκλου. Ο κύκλος του αζώτου είναι πιθανότατα ο πληρέστερος όλων των κύκλων των θρεπτικών καθώς έχει πολλούς αυτορυθμιζόμενους μηχανισμούς ανάδρασης. Το άζωτο είναι ένα στοιχείο που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς αποτελεί βασικό συστατικό στοιχείο και για τους ζωντανούς οργανισμούς, αλλά και για την ατμόσφαιρα της οποίας αποτελείτο 80% κ.ο. Όπως και στην περίπτωση του κύκλου του άνθρακα, η βασική δεξαμενή αποθήκευσης είναι η ατμόσφαιρα και η δεξαμενή ανταλλαγής λειτουργεί ανάμεσα στους οργανισμούς και στο έδαφος. Σε αντίθεση, όμως, με τον άνθρακα, η πρόσληψη του αζώτου από τα φυτά δεν μπορεί να γίνει άμεσα από τον αέρα. Προτού γίνει διαθέσιμο στη δεξαμενή ανταλλαγής, πρέπει να πάρει τη μορφή χημικών ενώσεων όπως είναι τα νιτρικά άλατα.



Σχ. 8. Ο κύκλος του αζώτου.

Η μετατροπή του ατμοσφαιρικού αζώτου σε νιτρικά άλατα.

Πραγματοποιείται

- (α') Μέσω της δράσης εξειδικευμένων οργανισμών. Είναι κυρίως τα βακτήρια, που παίζουν και το σημαντικότερο ρόλο, τα μικροφύκη και οι μύκητες. Λειτουργούν είτε μόνοι τους στο έδαφος είτε σε συνδυασμό με ένα φυτό, και κυρίως με αυτά της οικογένειας των ψυχανθών όπως είναι το τριφύλλι. Η σχέση ανάμεσα σε ένα βακτήριο που δεσμεύει το άζωτο (π.χ. το *Rizobium*) και σε ένα ψυχανθές σχηματίζει εξογκώματα στις ρίζες, γνωστά ως ριζοφυμάτια. Μέσα σε αυτά, σχηματίζονται τα νιτρικά τα οποία είτε χρησιμοποιούνται από τα φυτά είτε αποβάλλονται στο έδαφος. Για το λόγο αυτό τα ψυχανθή είναι πολύ σημαντικά στις αμειψισπορές που γίνονται για τη διατήρηση της γονιμότητας του εδάφους.
- β') Μέσω της δράσης των ηλεκτρικών εκκενώσεων. Η ηλεκτρική δραστηριότητα κατά τη διάρκεια των καταιγίδων προκαλεί τη μετατροπή του ατμοσφαιρικού αζώτου σε νιτρικά. Αυτός ο τύπος δέσμευσης είναι ελάχιστος σημασίας όταν συγκριθεί με αυτόν που οφείλεται στις βιολογικές δραστηριότητες και συνεισφέρει κατά ένα μικρό μόνο ποσοστό στη συνολική ποσότητα νιτρικών που κυκλοφορούν στα οικοσυστήματα.

Η διέλευση των νιτρικών μέσα από τις τροφικές αλυσίδες.

Τα νιτρικά χρησιμοποιούνται από τα φυτά για τη σύνθεση των πρωτεϊνών τους. Προσλαμβάνονται είτε απευθείας από τα ριζοφυμάτια, εάν υπάρχουν, είτε από το έδαφος. Τα νιτρικά που αφομοιώνονται από τα φυτά για να σχηματίσουν τις πρωτεΐνες μπορούν, μέσω των τροφικών αλυσίδων, να περάσουν στο οικοσύστημα. Μέσα σε κάθε ετεροτροφικό επίπεδο, υπάρχει πάντα μερική απώλεια αζώτου, κατά την έκκριση νιτρικών ουσιών, με τα ούρα και τα περιττώματα. Το αζωτούχο περιεχόμενο της οργανικής ύλης επιστρέφει τελικά στο αβιοτικό τμήμα του οικοσυστήματος όταν αποσυντίθενται τα φυτά, τα ζώα και τα απορρίμματα.

Η μετατροπή των πρωτεϊνών σε νιτρικά μέσα στο έδαφος.

- (α') Το άζωτο βρίσκεται μέσα στους ζωντανούς οργανισμούς, δεσμευμένο σε μεγαλομοριακές ενώσεις πλούσιες σε ενέργεια. Η διάσπαση των πρωτεϊνών και άλλων αζωτούχων ενώσεων σε νιτρικά, προσφέρει ενέργεια στους μικροοργανισμούς. Η διαδικασία αυτή της απελευθέρωσης ενέργειας ονομάζεται «αμμωνιοποίηση». Αποτελείται από πολλά στάδια, που το κάθε ένα πραγματοποιείται με τη βοήθεια ειδικών βακτηρίων.
- (β') Οι πρωτεΐνες μετατρέπονται στην αρχή σε αμινοξέα από τα οποία απελευθερώνονται τα μεταλλικά στοιχεία. Η διαδικασία αυτή γνωστή ως *ανοργανοποίηση* απαιτεί τη δράση μεγάλου φάσματος βακτηρίων και μυκήτων.

- (γ') Τα αμινοξέα στη συνέχεια αποδομούνται περαιτέρω, παράγοντας αμμωνία (NH_3) ή ιόντα αμμωνίου (NH_4). Τα νιτροποιά βακτήρια, όπως το *Nitrosomonas*, χρησιμοποιούν την ενέργεια της ένωσης αυτής και τη μετατρέπουν σε νιτρώδη (NO_2^-).
- (δ') Τα νιτρώδη σε μεγάλες ποσότητες μπορεί να είναι τοξικά για τα φυτά. Τα νιτρώδη του εδάφους, ωστόσο, μετατρέπονται συνήθως γρήγορα σε νιτρικά (NO_3^-) με τη βοήθεια βακτηρίων. Τα νιτρικά είναι χημικά σταθερές ενώσεις, που μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν από τα φυτά, συμπληρώνοντας με τον τρόπο αυτό έναν κύκλο μέσα στη δεξαμενή ανταλλαγής.

Η μετατροπή των νιτρικών αλάτων σε ατμοσφαιρικά άζωτο.

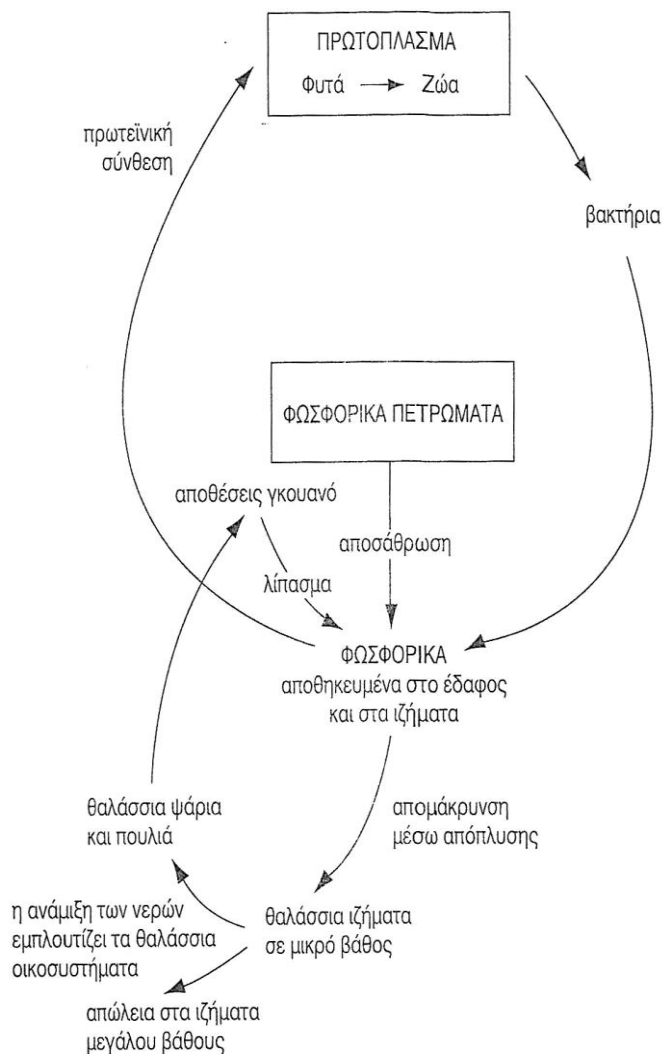
Στην περίπτωση που τα νιτρικά δεν απορροφηθούν από τα φυτά μπορεί να χαθούν από τη δεξαμενή ανταλλαγής, με την αποδόμησή τους από τα απονιτροποιητικά βακτήρια που απελευθερώνουν άζωτο στην ατμόσφαιρα. Τα βακτήρια αυτά ζουν σε μέρη όπου δεν υπάρχει οξυγόνο όπως είναι οι εκβολές των ποταμών, οι βυθοί των εύφορων λιμνών, τμήματα του θαλάσσιου βυθού και το βαλτώδες έδαφος. Τα απονιτροποιητικά βακτήρια καταναλώνουν ενέργεια για τη μετατροπή των νιτρικών σε νιτρώδη, μετά σε αμμωνία και τελικά σε άζωτο.

Η απομάκρυνση των νιτρικών του εδάφους μέσω της απόπλυσης.

- (α') Εάν τα νιτρικά δεν απορροφηθούν από τα φυτά μπορεί να ξεπλυθούν από το έδαφος με τις βροχές (διαδικασία γνωστή ως απόπλυση). Με τον τρόπο αυτό τα νιτρικά μεταφέρονται στα ποτάμια και τελικά χάνονται σε ρηγά θαλάσσια ιζήματα.
- (β') Σε ορισμένες περιοχές, όπως για παράδειγμα, έξω από τις ακτές του Περού, υπάρχουν θαλάσσια ρεύματα που αναμιγνύουν το νερό και εμπλουτίζουν τα θαλάσσια οικοσυστήματα. Τα νιτρικά μπορεί να διέλθουν στις θαλάσσιες τροφικές αλυσίδες και να επιστρέψουν στη χέρσο με τα περιττώματα που πέφτουν από τα θαλασσοπούλια.
- (γ') Η χρήση των συνθετικών νιτρικών λιπασμάτων έχει επιταχύνει τη διαδικασία απώλειας των νιτρικών με την απόπλυση και έχει δημιουργήσει μια εν δυνάμει ανισορροπία στο σύστημα.
- (δ') Εάν τα νιτρικά που βρίσκονται στα ρηγά θαλάσσια ιζήματα, δεν ανακυκλωθούν ως γκουανό μπορεί να χαθούν σε βαθιά ιζήματα και να καταστούν απρόσιτα στη δεξαμενή ανταλλαγής για εκατομμύρια χρόνια. Η απώλεια αυτή αντισταθμίζεται εν μέρει από την απελευθέρωση αερίου αζώτου από τα ηφαίστεια.

Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΦΩΣΦΟΡΟΥ

Αποτελεί παράδειγμα απλού ιζηματογενούς κύκλου που διαταράσσεται εύκολα. Τη δεξαμενή αποθήκευσης του φωσφόρου την αποτελούν τα κρυσταλλικά πετρώματα των φωσφορικών αλάτων, ενώ η δεξαμενή ανταλλαγής περιλαμβάνει την ανακύκλωση ανάμεσα στους οργανισμούς, στο έδαφος και στα ρηχά θαλάσσια ιζήματα. Όπως στους περισσότερους ιζηματογενείς κύκλους, έτσι και στον κύκλο του φωσφόρου δεν υπάρχει αέρια φάση. Ο φώσφορος είναι ένα σχετικά σπάνιο στοιχείο στη φύση, αλλά σημαντικό για την ανάπτυξη των φυτών και των ζώων. Για να αντεπεξέλθουν τη σπανιότητα αυτή, οι οργανισμοί έχουν αναπτύξει μηχανισμούς συσσώρευσης φωσφόρου στους ιστούς τους σε συγκεντρώσεις πολύ μεγαλύτερες από αυτές του αβιοτικού περιβάλλοντος. Ο φώσφορος βρίσκεται στη φύση με τη μορφή φωσφορικών αλάτων. Τα άλατα αυτά βρίσκονται σε ανόργανες ή σε οργανικές ενώσεις, και σε διαλυτή ή αδιάλυτη μορφή.



Σχ. 9. Ο κύκλος του φωσφόρου.

Η διέλευση των φωσφορικών αλάτων του εδάφους μέσα από τις τροφικές αλυσίδες.

- (α') Η οργανική φάση του κύκλου του φωσφόρου είναι πολύ απλή. Ποσότητες φωσφόρου μπορεί να βρίσκονται στο έδαφος είτε με τη μορφή οργανικών ενώσεων είτε ως ανόργανα άλατα. Και οι δύο αυτές μορφές μπορούν διαλυμένες να απορροφηθούν από τα φυτά.
- (β') Τα φωσφορικά που έχουν απορροφηθεί χρησιμοποιούνται από τα φυτά για τη σύνθεση των πρωτεϊνών τους και μπορούν να διέλθουν μέσα από τις τροφικές αλυσίδες. Όταν τα φυτά και τα ζώα πεθάνουν, η διαδικασία της αποσύνθεσης των σωμάτων τους και τα προϊόντα που εκκρίνουν τα βακτήρια και οι μύκητες απελευθερώνουν ποσότητες φωσφορικών αλάτων πίσω στο έδαφος.
- (γ') Ορισμένα ανόργανα φωσφορικά άλατα ενδέχεται να ακινητοποιηθούν προσωρινά στα σώματα των μικροοργανισμών που τα χρειάζονται για τροφή και που, συνεπώς, ανταγωνίζονται ενεργά για αυτά, συχνά σε βάρος των φυτών. Ο ακινητοποιημένος αυτός φώσφορος γίνεται ξανά διαθέσιμος για τα φυτά μετά το θάνατο των μικροοργανισμών.

Η απόπλυση των φωσφορικών από το έδαφος.

- (α') Τα περισσότερα φωσφορικά του εδάφους γρήγορα επαναπορροφούνται από τα φυτά. Ορισμένες ποσότητες δεσμεύονται σε αργιλικά ορυκτά, όπως οι καολινίτες και κατακρατούνται στο έδαφος. Όπως, όμως, και στις άλλες περιπτώσεις θρεπτικών, υπάρχει και εδώ ένας βαθμός απόπλυσης. Τα περισσότερα φωσφορικά που μεταφέρονται με τα ύδατα απορροής από την ξηρά στη θάλασσα, απορροφούνται τελικά στα ιζήματα των θαλασσών και χάνονται για τα χερσαία οικοσυστήματα.
- β') Σημαντική δίοδος για τη γρήγορη επιστροφή του φωσφόρου από τα ρηχά θαλάσσια ιζήματα αποτελούν οι αποθέσεις γκουανό. Ο ρόλος τους είναι ακόμα πιο σημαντικός στην περίπτωση των φωσφορικών από ότι στην περίπτωση των νιτρικών. Η επιστροφή, όμως, του φωσφόρου με αυτόν τον τρόπο, έχει έντονο τοπικό χαρακτήρα και υπολογίζεται πως με τη διαδικασία αυτή, επιστρέφει στην ξηρά λιγότερο από το 3% αυτού που χάθηκε. Αν τα φωσφορικά δεν ανακυκλωθούν με τη βοήθεια των θαλασσίων ρευμάτων που προκαλούν ανάμιξη των νερών, χάνονται σε βαθύτερα ιζήματα και ενσωματώνονται στα φωσφορικά πετρώματα.

Η απελευθέρωση των φωσφορικών από τα πετρώματα.

- (α') Η μείωση του φωσφόρου στη δεξαμενή ανταλλαγής αντισταθμίζεται πολύ αργά στη φύση μέσω της απελευθέρωσής του από τα φωσφορικά πετρώματα. Η απελευθέρωση αυτή συντελείται κυρίως με τη διάβρωση και την αποσάθρωση και ενισχύεται με την ηφαιστειακή δράση. Η επιστροφή αυτή είναι πολύ αργή και

ασταθής, πράγμα που σημαίνει πως ο κύκλος μπορεί εύκολα να διαταραχθεί. Οι μηχανισμοί ρύθμισης που χαρακτηρίζουν τους αέριους κύκλους, εδώ απουσιάζουν.

- (β') Τα φωσφορικά πετρώματα εξορύσσονται για την παρασκευή φωσφορικών λιπασμάτων. Ο φώσφορος που περιέχεται σε αυτά χάνεται γρήγορα από τη δεξαμενή ανταλλαγής μέσω της απόπλυσης. Με τον τρόπο αυτό, ο άνθρωπος επιταχύνει τους ρυθμούς απώλειας του διαθέσιμου φωσφόρου, καθιστώντας τον κύκλο λιγότερο πλήρη. Η παραπάνω διαδικασία θα μπορούσε να προκαλέσει στο μέλλον σοβαρές ελλείψεις στα αποθέματα φωσφόρου με σημαντικές επιπτώσεις για τη γεωργία.

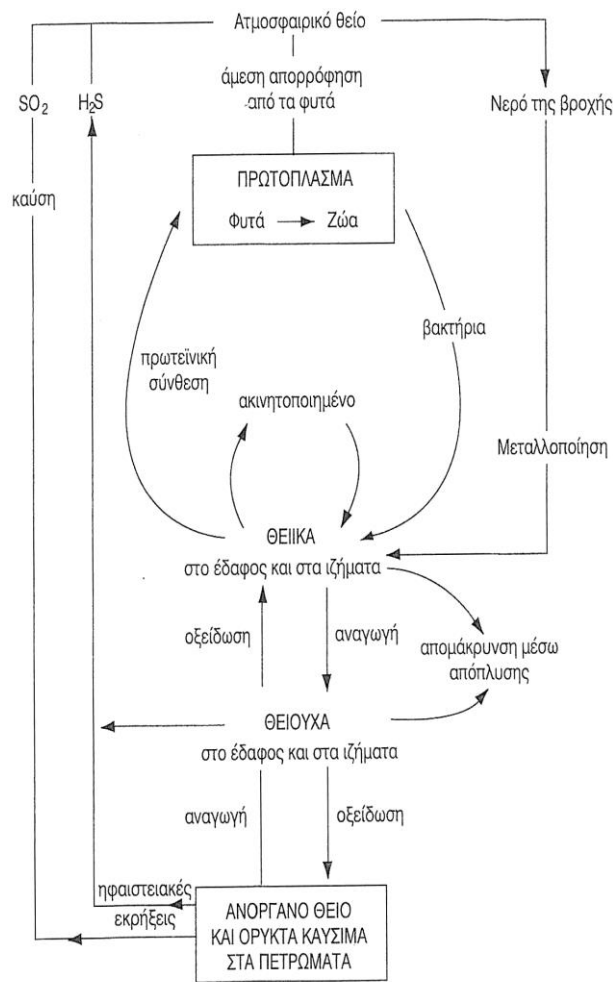
Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΘΕΙΟΥ

Αποτελεί ένα ακόμα παράδειγμα ιζηματογενούς κύκλου, σε αντίθεση, όμως, με τον προηγούμενο, ο κύκλος αυτός διαθέτει και ατμοσφαιρική φάση. Τη βασική δεξαμενή αποθήκευσης του θείου αποτελούντα θειικά πετρώματα, όπως ο γύψος, μικρές, όμως, ποσότητες βρίσκονται και στην ατμόσφαιρα. Το θείο δεν είναι απαραίτητο για τα οικοσυστήματα σε ποσότητες ανάλογες με αυτές του άνθρακα, του αζώτου ή του φωσφόρου, ούτε αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη των οργανισμών. Παρ' όλα αυτά, ο κύκλος του θείου είναι ζωτικής σημασίας για το γενικό μόρφωμα της ανάπτυξης και της αποδόμησης. Σε πολλά από τα στάδιά του απαιτείται η δράση ειδικών μικροοργανισμών, που ο καθένας τους εμπλέκεται σε συγκεκριμένες χημικές αντιδράσεις.

Η διέλευση των θεικών μέσα από τις τροφικές αλυσίδες.

Το θείο είναι αναγκαίο στους οργανισμούς για τη σύνθεση των πρωτεϊνών και των βιταμινών τους. Τα φυτά προσλαμβάνουν το θείο κυρίως με τη μορφή θεικών (SO_4^{2-}) από το έδαφος. Μικρές, όμως, ποσότητες απορροφούνται και απευθείας από την ατμόσφαιρα ως διοξείδιο του θείου (SO_2).

Τα θειικά που βρίσκονται στα φυτά μπορεί να περάσουν μέσα από τις τροφικές αλυσίδες ή να αποδομηθούν κατευθείαν μετά το θάνατο του φυτού. Και στις δύο περιπτώσεις, τα θειικά απελευθερώνονται στο έδαφος μέσω της δράσης των βακτηρίων και των μυκήτων που διασπούν τις πρωτεΐνες.



Σχ. 10. Ο κύκλος του θείου.

Οι μικροοργανισμοί μπορεί να ακινητοποιούν προσωρινά στα σώματά τους ορισμένα από τα θειικά του εδάφους και να ανταγωνίζονται με αυτόν τον τρόπο τα φυτά. Η δράση αυτή παρατείνει την οργανική φάση του κύκλου.

Απώλεια των θειικών από το έδαφος. Εάν τα θειικά δεν απορροφηθούν από τους αυτότροφους οργανισμούς, μπορεί να χαθούν από το έδαφος. Αυτό συντελείται με δύο κυρίως τρόπους.

- (α') Σταθερές απώλειες λαμβάνουν χώρα μέσω της απόπλυσης κυρίως σε εδάφη φτωχά σε οργανικές ενώσεις.
- (β') Τα θειικά μπορεί να μετατραπούν με αναγωγή (προσθήκη υδρογόνου) σε θειούχες ενώσεις. Με αυτή τη διαδικασία, που προκαλείται από αναγωγικά βακτήρια, όπως το *Desulfonibrio desulfuicans*, που ζουν σε αναερόβιες συνθήκες (μέρη όπου δεν υπάρχει οξυγόνο όπως τα βαλτώδη εδάφη και η λάσπη στις εκβολές των ποταμών), απελευθερώνεται οξυγόνο. Εάν σχηματιστεί υδρόθειο (H₂S), μπορεί να διαφύγει στην ατμόσφαιρα. Παρουσία σιδήρου, όμως, το υδρόθειο μπορεί να μετατραπεί σε θειούχο σίδηρο, ένωση αδιάλυτη στο νερό.

Το απόθεμα θειικών στα πετρώματα.

- (α') Οι θειούχες ενώσεις που βρίσκονται στα ιζήματα και στο έδαφος, περικλείουν χημική ενέργεια. Τα χημειοσυνθετικά βακτήρια, τα οποία μπορούν να απελευθερώσουν αυτή την ενέργεια και να τη χρησιμοποιήσουν, μετατρέπουν τις θειούχες ενώσεις σε θειικά οξειδώνοντάς τις (προσθέτοντας οξυγόνο).

Μερικά από τα θειικά μπορεί να επιστρέψουν στο έδαφος, κάποια άλλα, όμως, ενσωματώνονται στα θειικά πετρώματα ή στο ανόργανο θείο των ορυκτών καυσίμων. Με τον τρόπο αυτό επανεισάγονται στη δεξαμενή αποθήκευσης του κύκλου.

- (β') Ο σημαντικότερος φυσικός τρόπος επιστροφής των θειικών στη δεξαμενή ανταλλαγής είναι η αποσάθρωση και η διάβρωση των πετρωμάτων. Τα ανόργανα θειικά των πετρωμάτων ανάγονται μέσω της δράσης των βακτηρίων σε θειούχες ενώσεις. Αυτές με τη σειρά τους οξειδώνονται για να σχηματίσουν τα θειικά του εδάφους και να καταστήσουν με τον τρόπο αυτό το θείο και πάλι διαθέσιμο για τα φυτά.
- (γ') Το θείο που βρίσκεται στη δεξαμενή αποθήκευσης μπορεί να απελευθερωθεί στη δεξαμενή ανταλλαγής όταν κατά τη διάρκεια ηφαιστειακών εκρήξεων, εκλύεται στην ατμόσφαιρα υδρόθειο. Ένας άλλος, ολοένα σημαντικότερος τρόπος επιστροφής του θείου στη δεξαμενή ανταλλαγής είναι η καύση των ορυκτών καυσίμων. Κατά τη διάρκεια της καύσης, το θείο που περιέχεται σε αυτά οξειδώνεται και εκλύεται στην ατμόσφαιρα με τη μορφή διοξειδίου του θείου (SO_2).

Η ατμοσφαιρική φάση.

- (α') Η ατμόσφαιρα αποτελεί μια σημαντική επιπρόσθετη δεξαμενή θείου, που βρίσκεται εκεί είτε με τη μορφή υδρόθειου που παράγεται από ηφαιστειακή δράση ή από αναγωγικά βακτήρια είτε με τη μορφή διοξειδίου του θείου που εκλύεται από την καύση των ορυκτών καυσίμων.

Η απελευθέρωση διοξειδίου του θείου μέσω της καύσης έχει προκαλέσει σημαντική αύξηση στη συγκέντρωση του θείου στην ατμόσφαιρα, κυρίως στις αστικές και βιομηχανικές περιοχές. Η αύξηση αυτή έχει δημιουργήσει μια εν δυνάμει ανισορροπία στον κύκλο.

- (β') Από τη στιγμή που οι ενώσεις του θείου βρεθούν στην ατμόσφαιρα, οξειδώνονται γρήγορα σε θειώδη (SO_3) και θειικά (SO_4). Οι διαδικασίες αυτές είναι αποτέλεσμα χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στον αέρα και δεν απαιτούν παρουσία οργανισμών. Ορισμένες από αυτές τις ενώσεις του θείου επαναπορροφούνται από τα φύλλα των φυτών, μερικές εναποτίθενται στο έδαφος και άλλες ξεπλένονται από την ατμόσφαιρα με τη βροχή.

Τα θειώδη και τα θειικά μπορούν να αντιδράσουν με το νερό της βροχής και να σχηματίσουν θειικό οξύ (H_2SO_4). Σε μικρές ποσότητες, η αντίδραση αυτή αποτελεί ένα χρήσιμο τρόπο επιστροφής των θειικών στο έδαφος. Εάν, ωστόσο, το θειικό οξύ ξεπεράσει

κάποιες συγκεντρώσεις, μπορεί να έχει επιβλαβή αποτελέσματα, μεταβάλλοντας τις συνθήκες μέσα στο οικοσύστημα.