

**Πετρολογία Μαγματικών &  
Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων  
Μέρος 1<sup>ο</sup>: Μαγματικά Πετρώματα**

Ιωάννης Ηλιόπουλος  
Πανεπιστήμιο Πατρών  
Τμήμα Γεωλογίας  
Τομέας Ορυκτών Πρώτων Υλών  
Μάρτιος 2020

---

**ΜΟΝΤΕΛΛΑ  
ΜΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ**

---

## Τήξη Ισορροπίας

- Το τήγμα παραμένει στο σύστημα και συνυπάρχει σε ισορροπία με το στερεό έως ότου κάποια στιγμή να απελευθερωθεί και να ανέλθει
- Η ισορροπία στερεού-υγρού υπάρχει σε όλη τη διάρκεια της τήξης
- Η πηγή μπορεί να υποστεί ποικίλους βαθμούς τήξης

## Τήξη Ισορροπίας

$$\frac{C_L}{C_O} = \frac{1}{D_i(1-F)+F}$$

Shaw (1970)

$C_L$  = συγκέντρωση ιχνοστοιχείου στο υγρό

$C_O$  = συγκέντρωση ιχνοστοιχείου στο αρχικό πέτρωμα πριν την έναρξη της τήξης

$F$  = κλάσμα του τήγματος που παράχθηκε  
(=  $\frac{\text{υγρό}}{\text{υγρό} + \text{στερεό}}$ )

$\bar{D}_i$  = συντελεστής κατανομής του στοιχείου  $i$

## Τήξη Ισορροπίας

- Από το ισοζύγιο μάζας και για κλάσμα  $F$  τήξης έχουμε ( $D=C_S/C_L$ ):

$$C_O = F \cdot C_L + (1-F) \cdot C_S \Leftrightarrow$$

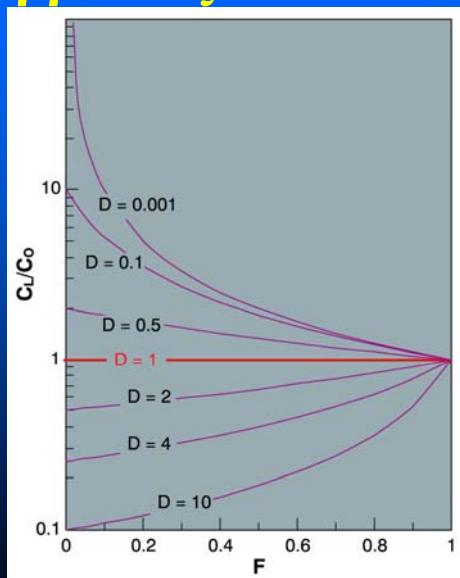
$$C_O = F \cdot C_L + (1-F) \cdot D \cdot C_L \Leftrightarrow$$

$$C_O = C_L \cdot [F + D \cdot (1-F)] \Leftrightarrow \frac{C_L}{C_O} = \frac{1}{D_i(1-F)+F}$$

**ΑΣΚΗΣΗ:** Υπολογίστε μόνοι σας το λόγο  $\frac{C_S}{C_O}$

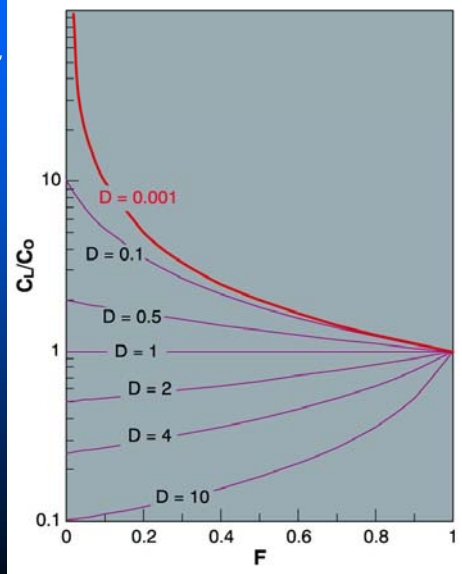
## Τήξη Ισορροπίας

- Προβολή του λόγου  $C_L/C_O$  για διάφορους βαθμούς τήξης
- Προσέξτε τη διακύμανση στα συμβατά και στα ασύμβατα στοιχεία
- Τι γίνεται αν  $D = 1$ ;



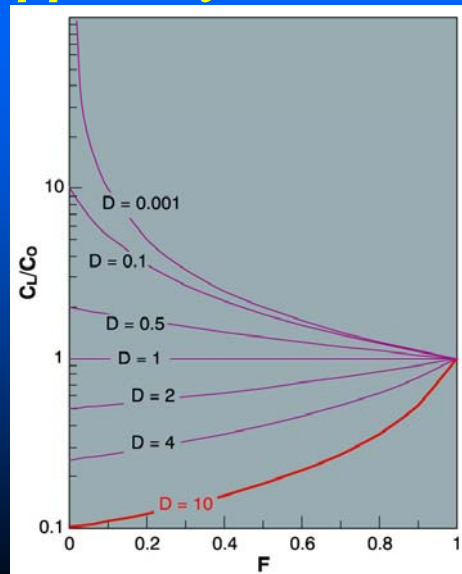
## Τήξη Ισορροπίας

- Τα ασύμβατα στοιχεία παρουσιάζουν μεγάλη συγκέντρωση στο υγρό, για μικρούς βαθμούς τήξης
- Όσο προχωράει η τήξη αυτά “αραιώνονται” και μειώνεται η περιεκτικότητά τους



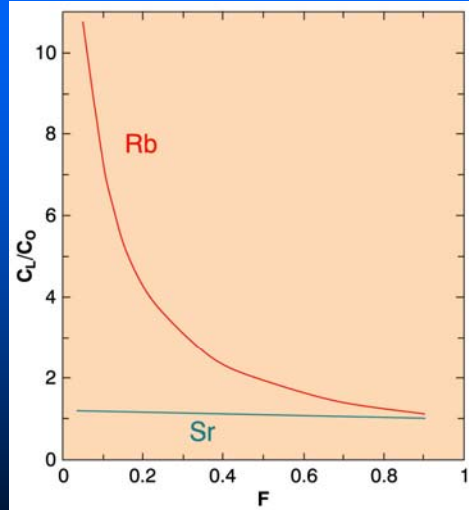
## Τήξη Ισορροπίας

- Τα συμβατά στοιχεία παρουσιάζουν μικρή συγκέντρωση στο υγρό και ειδικά για μικρούς βαθμούς τήξης
- Τιμές  $F > 0,4$  για τήξη ισορροπίας, είναι απίθανο να συμβούν στη φύση (γιατί;)



## Τήξη Ισορροπίας

- Ο λόγος δυο στοιχείων με διαφορετικές συμβατότητες (π.χ. Rb/Sr), αποτελεί πολύ καλό δείκτη για την πρόοδο της τήξης (ή της κλασματικής κρυστάλλωσης)



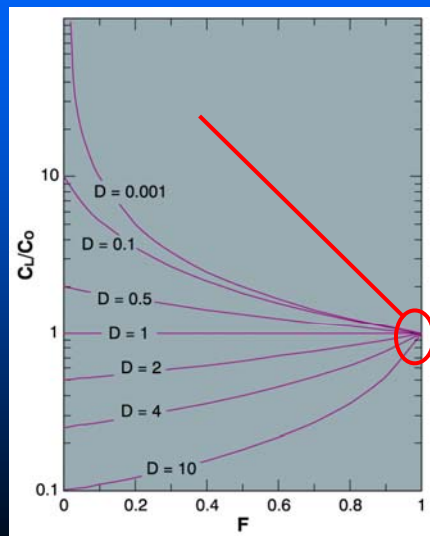
Αλλαγή στη συγκέντρωση των Rb και Sr στο τήγμα που προκύπτει από προοδευτική τήξη ενός βασαλτικού πετρώματος, αποτελούμενου από πλαγιόκλαστο, αυγίτη και ολιβίνη (Winter 2001)

## Τήξη Ισορροπίας

- Όσο ο βαθμός τήξης  $F$  τείνει στο 1 (100%) η συγκέντρωση κάθε ιχνοστοιχείου στο τήγμα τείνει να εξισωθεί με αυτήν στο αρχικό στερεό

$$\frac{C_L}{C_0} = \frac{1}{D_i(1-F)+F}$$

( $F \rightarrow 1, C_L/C_0 \rightarrow 1$ )

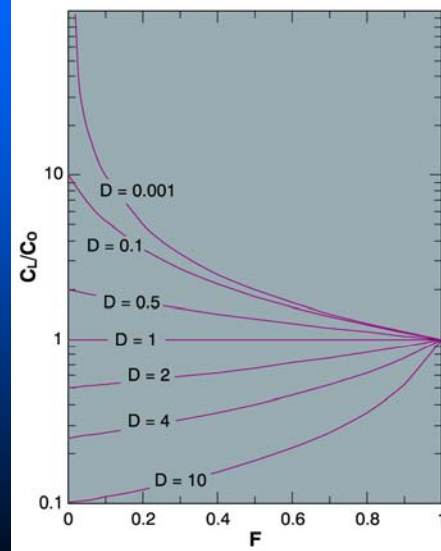


## Τήξη Ισορροπίας

$$\frac{C_L}{C_0} = \frac{1}{D_i(1-F)+F}$$

- Όσο ο βαθμός τήξης  $F \rightarrow 0$ , τόσο ο λόγος

$$\frac{C_L}{C_0} \rightarrow \frac{1}{D}$$



## Τήξη Ισορροπίας

- Έτσι αν ξέρουμε τη συγκέντρωση  $C_L$  ενός στοιχείου σε ένα παράγωγο πέτρωμα (υγρό) που έχει προέλθει από μικρό βαθμό τήξης μιας πηγής, μπορούμε να προσδιορίσουμε και την περιεκτικότητα του στο μητρικό αυτό υλικό

## Τήξη Ισορροπίας

$$\frac{C_L}{C_o} = \frac{1}{D_i(1-F)+F}$$

- Για τα ισχυρά ασύμβατα στοιχεία ( $D \rightarrow 0$ ) από την παραπάνω σχέση έχουμε:

$$\frac{C_L}{C_o} \rightarrow \frac{1}{F}$$

- Έτσι αν ξέρουμε τις συγκεντρώσεις ενός ισχυρά ασύμβατου στοιχείου στο μητρικό υλικό και στο παράγωγο πέτρωμα (υγρό), μπορούμε να προσδιορίσουμε και το βαθμό τήξης που υπέστη η πηγή

## Κλασματική Τήξη

- Κάθε μερικό τήγμα απομακρύνεται αμέσως μετά την παραγωγή του
- Μπορούμε να μελετήσουμε είτε τη σύσταση καθενός μερικού τήγματος είτε τη συνολική σύσταση που προκύπτει από τους Μ.Ο. όλων των μερικών τηγμάτων

## Κλασματική Τήξη

- Για κάθε μερικό τήγμα θα ισχύει:

$$\frac{C_L}{C_O} = \frac{1}{D_O} (1 - F)^{\left(\frac{1}{D_O} - 1\right)}$$

$C_L$  = συγκέντρωση ιχνοστοιχείου στο υγρό

$C_O$  = συγκέντρωση ιχνοστοιχείου στο αρχικό πέτρωμα πριν την έναρξη της τήξης

$F$  = κλάσμα του τήγματος που παράχθηκε  
(=  $\frac{\text{υγρό}}{\text{υγρό} + \text{στερεό}}$ )

$D_O$  = συντελεστής κατανομής ενός στοιχείου στο αρχικό υλικό

## Κλασματική Τήξη

- Για το συνολικό τήγμα (M.O. όλων των μερικών τηγμάτων) θα ισχύει:

$$\frac{\bar{C}_L}{C_O} = \frac{1}{F} [1 - (1 - F)^{\left(\frac{1}{D_O}\right)}]$$

$\bar{C}_L$  = συγκέντρωση ιχνοστοιχείου στο υγρό

$C_O$  = συγκέντρωση ιχνοστοιχείου στο αρχικό πέτρωμα πριν την έναρξη της τήξης

$F$  = κλάσμα του τήγματος που παράχθηκε  
(=  $\frac{\text{υγρό}}{\text{υγρό} + \text{στερεό}}$ )

$D_O$  = συντελεστής κατανομής ενός στοιχείου στο αρχικό υλικό



## Σύγκριση Μοντέλων

- Η τήξη ισορροπίας και η κλασματική τήξη στην περίπτωση του υπολογισμού του συνολικού τήγματος παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες
- Η απλή κλασματική τήξη είναι αρκετά διαφορετική
- Εκτός εξαιρετικών περιπτώσεων, στους υπολογισμούς μας συχνά χρησιμοποιούμε το μοντέλο της τήξης ισορροπίας

## Κρυστάλλωση Ισορροπίας

- Οι κρύσταλλοι που σχηματίζονται βρίσκονται συνεχώς σε ισορροπία με το τήγμα
- Ουσιαστικά η αντίθετη διαδικασία από την τήξη ισορροπίας
- Ισχύουν οι ίδιες εξισώσεις με την τήξη ισορροπίας

## Κρυστάλλωση Ισορροπίας

$$\frac{C_L}{C_0} = \frac{1}{D_i(1-F)+F}$$

$C_L$  = συγκέντρωση ιχνοστοιχείου στο υπολειμματικό υγρό

$C_0$  = συγκέντρωση ιχνοστοιχείου στο αρχικό μάγμα πριν την έναρξη της κρυστάλλωσης

$F$  = κλάσμα του τήγματος που απομένει υγρό  
(=  $\frac{\text{υγρό}}{\text{υγρό} + \text{στερεό}}$ )

$D_i$  = συντελεστής κατανομής του στοιχείου  $i$

## Κλασματική Κρυστάλλωση

- Οι κρύσταλλοι που σχηματίζονται αποχωρίζονται αμέσως από το σύστημα και από το μαγματικό θάλαμο (κρυστάλλωση Rayleigh)

## Κλασματική Κρυστάλλωση

$$\frac{C_L}{C_0} = F^{(D-1)}$$

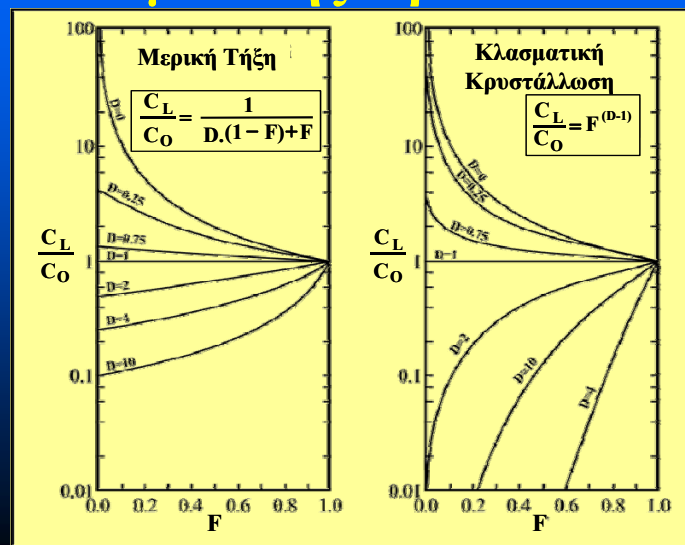
$C_L$  = συγκέντρωση ιχνοστοιχείου στο υπολειμματικό υγρό

$C_0$  = συγκέντρωση ιχνοστοιχείου στο αρχικό μάγμα πριν την έναρξη της κρυστάλλωσης

$F$  = κλάσμα του τήγματος που απέμεινε  
 (=  $\frac{\text{υγρό}}{\text{υγρό} + \text{στερεό}}$ )

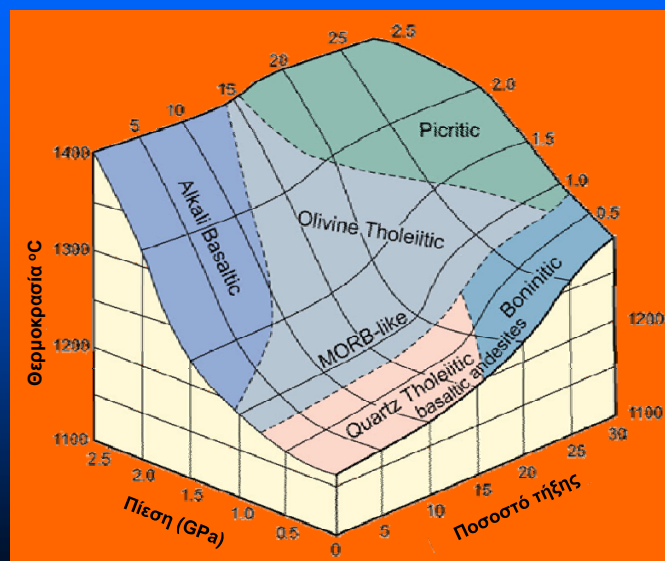
$D$  = συντελεστής κατανομής του εκάστοτε στοιχείου

## Σύγκριση Μερικής Τήξης-Κλασματικής Κρυστάλλωσης



## Μανδρακό μοντέλο: Ομοιογενές ή Ετερογενές ;

## Μαγματική Εξέλιξη

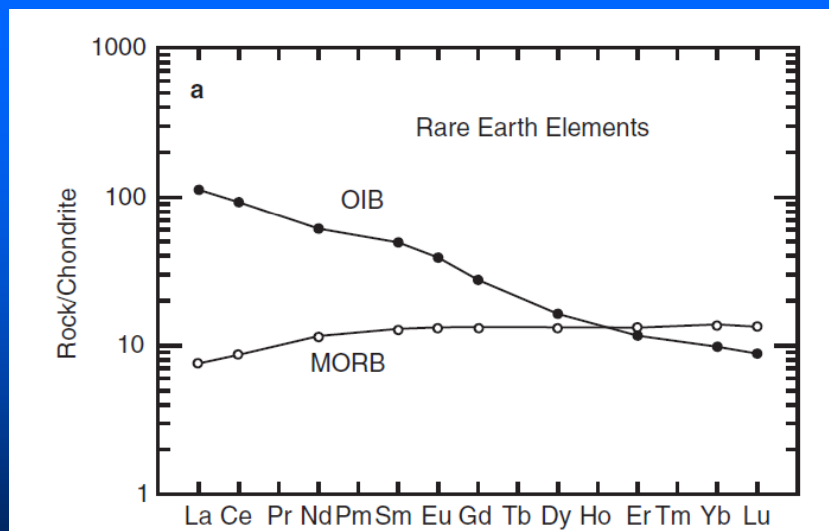


Συσχετισμός των μαγματικών τύπων (από Kushiro 2001)

- Αν και τα δείγματα μανδύα κατατάσσονται σε μόλις τρεις κύριες ευρείες συστασιακές κατηγορίες: **λερζόλιθοι, χαρτσβουργίτες, δουνίτες**, η ποικιλία δεν είναι αμελητέα
- Παρά την συστασιακή ομοιογένεια ως προς τα κύρια στοιχεία, οι διαφοροποιήσεις που καταγράφονται, οδηγούν στη διάκριση δύο κύριων τύπων
  - **Γόνιμοι** (fertile) ή **εμπλουτισμένοι** (enriched) ξενόλιθοι
  - **Εκχυμωμένοι** (depleted) ξενόλιθοι

- Οι **γόνιμοι** (fertile) ή **εμπλουτισμένοι** (enriched) ξενόλιθοι, σε σχέση με τους εκχυμωμένους, εμφανίζουν:
  - υψηλότερα ποσοστά Al, Ca, Ti, Na, K
  - Χαμηλότερο  $Mg/(Mg+Fe)$  και  $Cr/(Cr+Al)$
- Άρα έχουν περισσότερα ασύμβατα στοιχεία, αφού έχουν το δυναμικό να δώσουν μάγμα πριν γίνουν πιο δύστηκτα όπως οι εκχυμωμένοι ξενόλιθοι (γρινατούχοι και σπινελιούχοι λερζόλιθοι Vs δουνίτες)

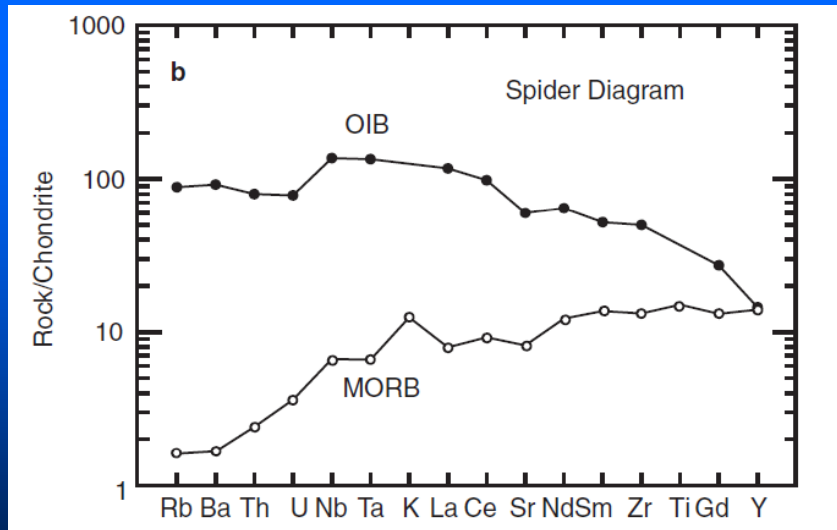
- **εμπλουτισμένος:** κάτι έχει προστεθεί σε αυτούς
- **γόνιμος:** πολύ λίγο υλικό έχει απομακρυνθεί από αυτούς.
- Για παράδειγμα: η παρουσία φλογοπίτη και αμφιβόλου, που αν και πολλές φορές είναι πρωτογενή ορυκτά, συχνά μπορεί να συσχετίζεται με εξωτερική εισροή ρευστών φάσεων. Άλλες εξαλλιώσεις: απατίτης, τιτανίτης, ανθρακικά κ.ά.
- Τα ιχνοστοιχεία περιπλέκουν επίσης την κατάσταση



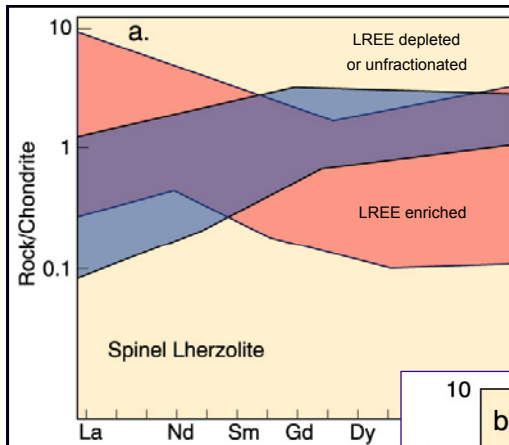
Κανονικοποιημένο ως προς χονδρίτη αραχνοδιάγραμμα σπάνιων γαιών (REE) ενός τυπικού αλκαλικού βασάλτη ωκεάνιου τόξου (OIB) και ενός τυπικού βασάλτη μεσο-ωκεάνιας ράχης (MORB). Από: Sun and McDonough (1989).

- **Αρνητική κλίση OIB:** εμπλουτισμός, συμβατός είτε μερική τήξη περιδοτίτη είτε με κλασματική κρυστάλλωση από παράγωγο τμήμα από περιδοτίτη
- **Θετική κλίση MORB:** δύσκολη η εξήγηση της. Ο μόνος τρόπος: να τηχθεί ένα πέτρωμα ήδη εκχυμωμένο σε LREE και ασύμβατα στοιχεία
- Για να απολέσει ένας μη εκχυμωμένος μανδύας (=χονδρίτης) τις LREE και τα ασύμβατα στοιχεία, αυτά θα πρέπει να έχουν ήδη εξαχθεί από το μανδύα πριν από τη δημιουργία του MORB

- Το πλέον κοινό μάγμα στον πλανήτη μας (MORB) θα πρέπει να έχει δημιουργηθεί από ένα μανδύα ο οποίος ήταν ήδη **εκχυμωμένος** (ίσως μέσω προηγούμενης εξαγωγής μαγματικού υλικού που δημιούργησε τον ωκεάνιο και τον ηπειρωτικό φλοιό)
- Το άλλο κοινό μάγμα στις ωκεάνιες λεκάνες δεν φαίνεται να έχει προέλθει από εκχυμωμένο, αλλά από έναν **γόνιμο** μανδύα



Κανονικοποιημένο ως προς χονδρίτη αραχνοδιάγραμμα ιχνοστοιχείων (spider) ενός τυπικού αλκαλικού βασάλτη ωκεάνιου τόξου (OIB) και ενός τυπικού βασάλτη μεσο-ωκεάνιας ράχης (MORB). Από: Sun and McDonough (1989).



Επειδή τα συγκεκριμένα δείγματα αποτελούν εν δυνάμει πιθανές πηγές μανδουακών πετρωμάτων και όχι παράγωγα τήγματα, εκείνα με την αρνητική κλίση και τιμές έως 10, θα πρέπει να αποτελούν πραγματικά εμπλουτισμένα υλικά, και όχι απλώς γόνιμα

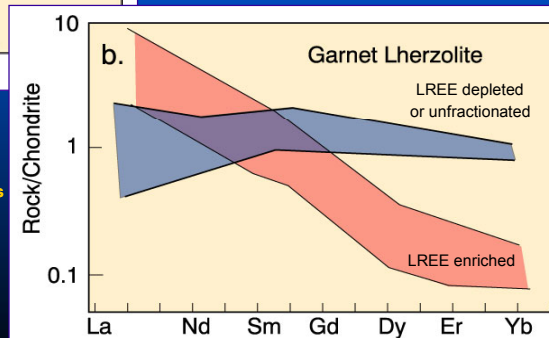
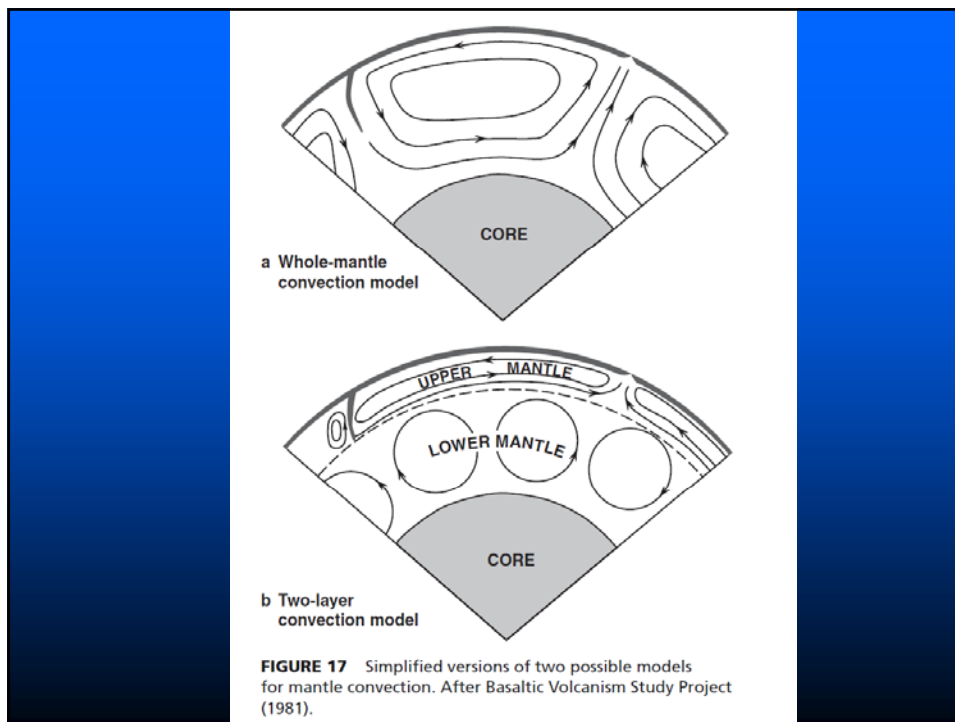


Figure 10-14 Chondrite-normalized REE diagrams for spinel (a) and garnet (b) lherzolites. After Basaltic Volcanism Study Project (1981). Lunar and Planetary Institute.



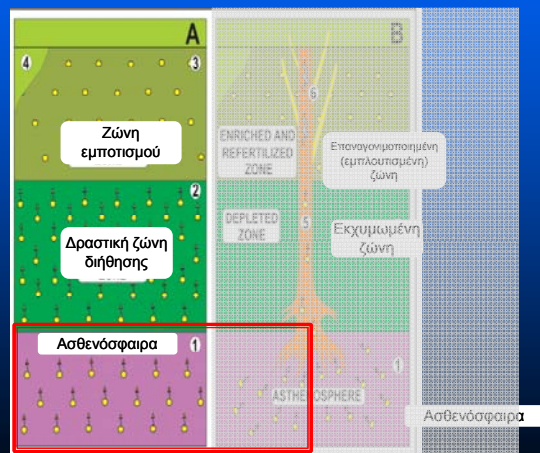


- Ισοτοπικά στοιχεία → μίξη μεταξύ δύο δεξαμενών μαγματος σε διάφορες αναλογίες, ενός εκχυμωμένου (MORB-like) και ενός γόνιμου ή ελαφρά εμπλουτισμένου.
- Μοντέλο μονοστρωματωμένου μανδύα: τα ρεύματα μεταγωγής θα οδηγούσαν στην ομογενοποίηση (χημικά και ισοτοπικά).
- Μοντέλο διπλά στρωματωμένου μανδύα: διαχωρισμός ενός εκχυμωμένου ανώτερου μανδύα από έναν κατώτερο γόνιμο μανδύα μέσω μιας σεισμικής ασυνέχεια ~660 km

## Διεργασίες Μανδρακής Μετασώματωσης

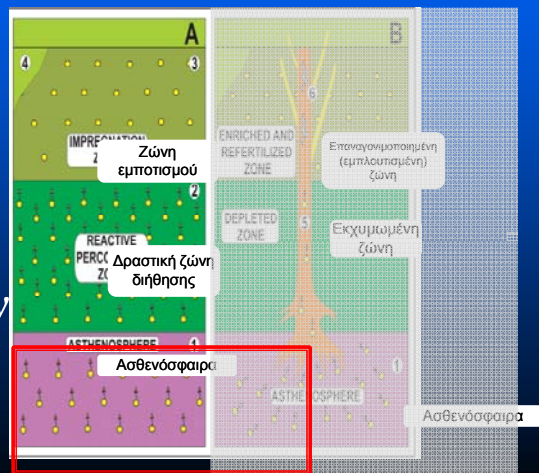
### Διεργασίες στο Μανδύα

- Ο ασθenoσφαιρικός μανδύας που βρίσκεται σε μεγάλο βάθος υφίσταται μερική τήξη λόγω αδιαβατικής εκτόνωσης



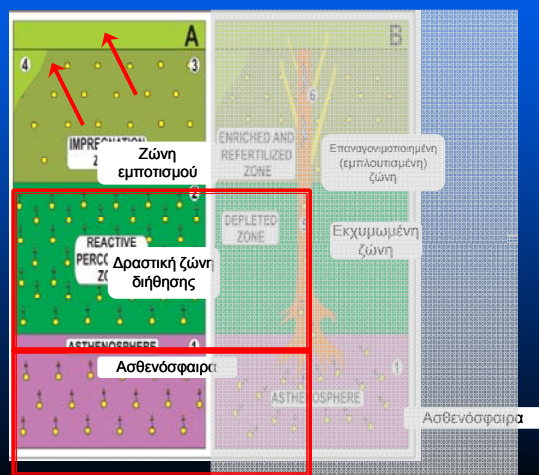
## Διεργασίες στο Μανδύα

- Παράγονται απλά ψήγματα βασαλτικού μάγματος
- Αυτά υφίστανται κλασματική κρυστάλλωση και μεταναστεύουν προς τα πάνω



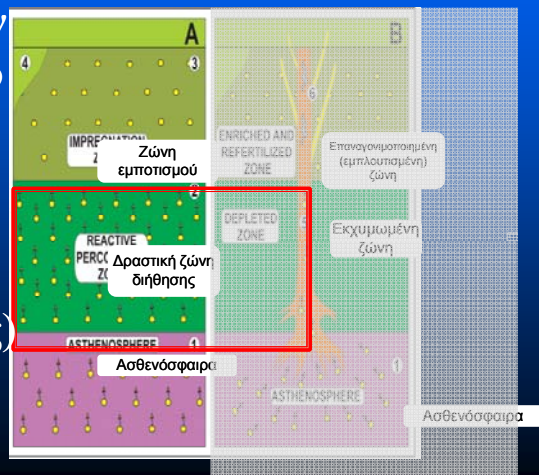
## Διεργασίες στο Μανδύα

- Ταυτόχρονα μεταναστεύουν προς τα ανώτερα τμήματα του μανδύα, όπου συναντούν τον μερικά εκχυμωμένο λερζόλιθο (4) (που έχει υποστεί ήδη πλαστική παραμόρφωση και ανακρυστάλλωση)



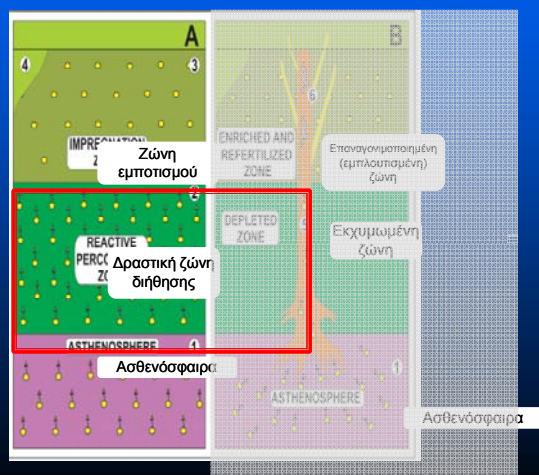
## Διεργασίες στο Μανδύα

- Τα θερμά αυτά κλάσματα κινούνται μέσα στους πόρους του μανδύα και εκεί αντιδρούν διαλύοντας τον κλινοπυρόξενο και κρυσταλλώνοντας ολιβίνη (δραστική ζώνη διήθησης)



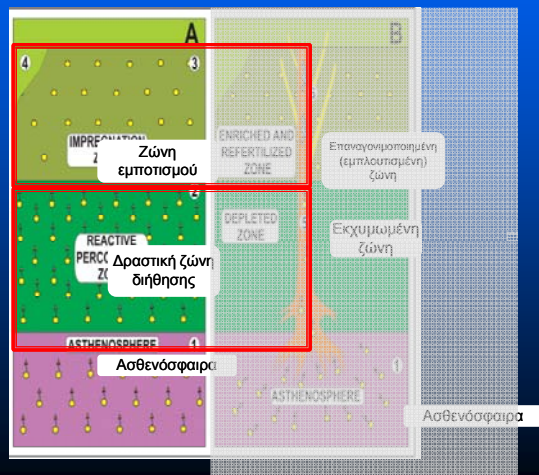
## Διεργασίες στο Μανδύα

- Τα τήγματα που ανεβαίνουν είναι πλούσια σε ασύμβατα στοιχεία
- Στη θέση αυτή σχηματίζουν τελικά χαρτζβουργίτη



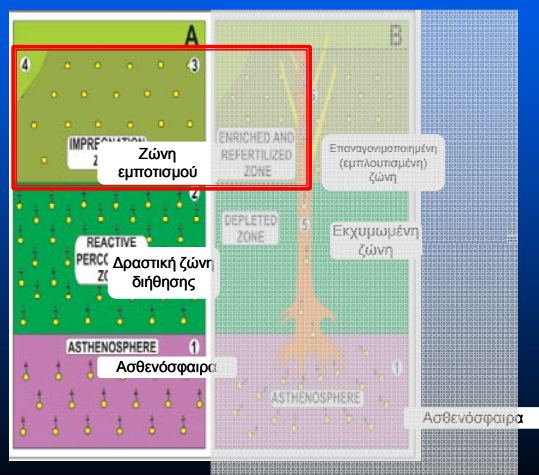
## Διεργασίες στο Μανδύα

- Σε σχετικά ανώτερες θέσεις έχουμε ανταγωνισμό της θερμότητας που ανέρχεται, με αυτήν που λόγω αγωγής διαφεύγει προς τα πάνω (ψύξη)



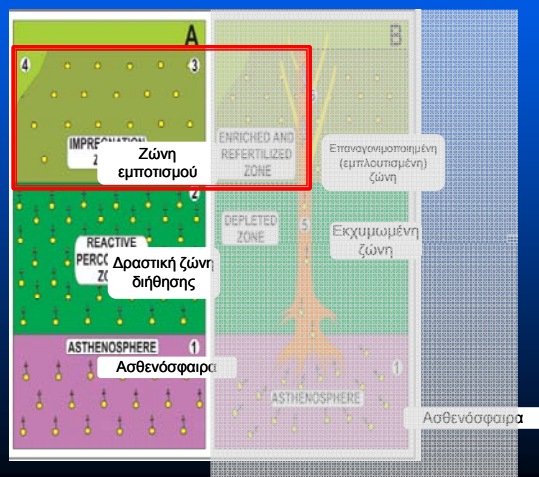
## Διεργασίες στο Μανδύα

- Εκεί επανεμπλουτίζεται ο χαρτζβουργίτης λόγω κρυστάλλωσης βασαλτικού υλικού ανάμεσα στους πόρους του μανδύα
- Σε ποια στοιχεία θα εμπλουτίζεται;



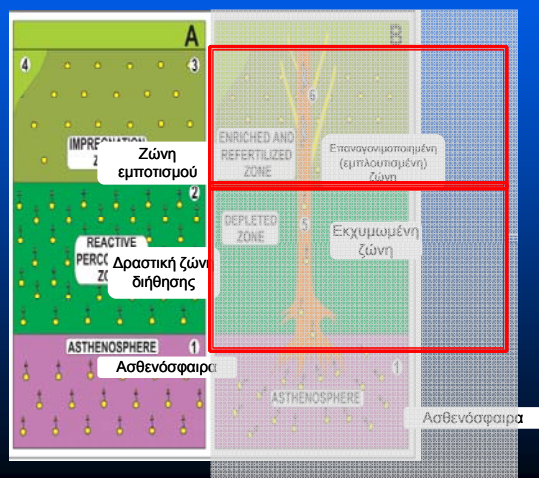
## Διεργασίες στο Μανδύα

- Έτσι παρουσιάζονται φαινόμενα κρυπτικής ή ορυκτολογικής μετασμάτωσης, π.χ. πλαγιοκλαστομιγής περιδοτίτης)



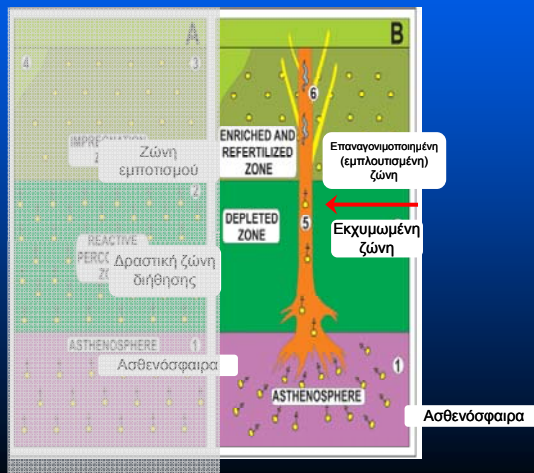
## Διεργασίες στο Μανδύα

- Με τον τρόπο αυτόν σχηματίζεται τελικά μια επανεμπλουτισμένη και μια εκχυμωμένη ζώνη (εκχυμωτής μανδύας) πάνω από την ασθενόσφαιρα



## Διεργασίες στο Μανδύα

- Τα σταγονίδια του τήγματος πλέον αυξάνουν, συγκεντρώνονται και κινούνται πια ανοδικά σχηματίζοντας «κανάλια» δουνιτών (συχνά συνδεόμενων με μαγματικό χρωμίτη)



## Διεργασίες στο Μανδύα

- Το συγκεντρωμένο τήγμα με τη διαφοροποίηση του, μπορεί τελικά να δώσει και φλέβες πυροξενιτών ή/και γάββρων στα πιο ανώτερα τμήματα

