



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

# Μοντέλα Γένεσης Κοιτασμάτων

Ενότητα 3: Κοιτάσματα μαγματικών θειούχων

Μαρία Οικονόμου

Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος

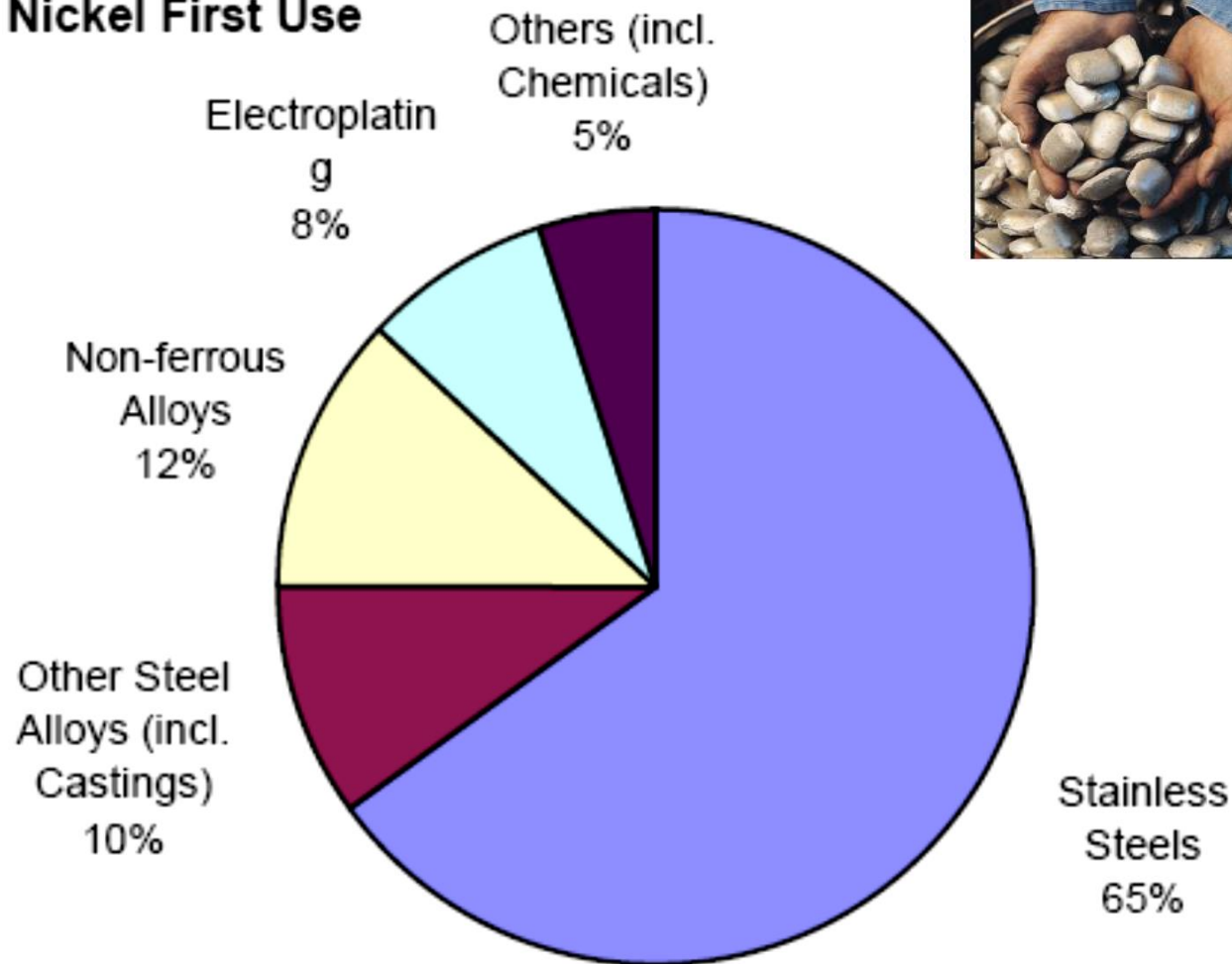
Κοιτάσματα μαγματικών θειούχων

Κοιτάσματα μαγματικών θειούχων σε  
κοματίτες

Χαρακτηριστικά – κλειδιά  
στην έρευνα για εντοπισμό  
κοιτασμάτων  
μαγματικών θειούχων.

# Χρήσεις νικελίου

## Nickel First Use



Εικόνα 1

# Κοιτάσματα μαγματικών θειούχων

- ❑ Κοιτάσματα μαγματικών θειούχων Ni - Cu (>10% θειούχα)
- ❑ Κοιτάσματα μαγματικών θειούχων PGE (<5% θειούχα)



# ΤΑΞΙΝΟΜΙΣΗ

Τα Κοιτάσματα μαγματικών θειούχων ταξινομούνται με βάση τον πετρολογικό τύπο με τον οποίο συνδέονται και το τεκτονικό περιβάλλον σχηματισμού τους:

- Κοματιτικές και θολειϊτικές λάβες σε μεγάλους ορίζοντες πρασινοπετρωμάτων.
- Διεισδύσεις βασικών – υπερβασικών, συχνά στο περιθώριο κρατονικών μαζών.
- Διεισδύσεις βασικών – υπερβασικών, σε ενδο-ηπειρωτικό περιβάλλον.
- Εστρωμένες διεισδύσεις,



# Κοματιτικοί ορίζοντες πρασινοπετρωμάτων

## Τύποι κοιτασμάτων

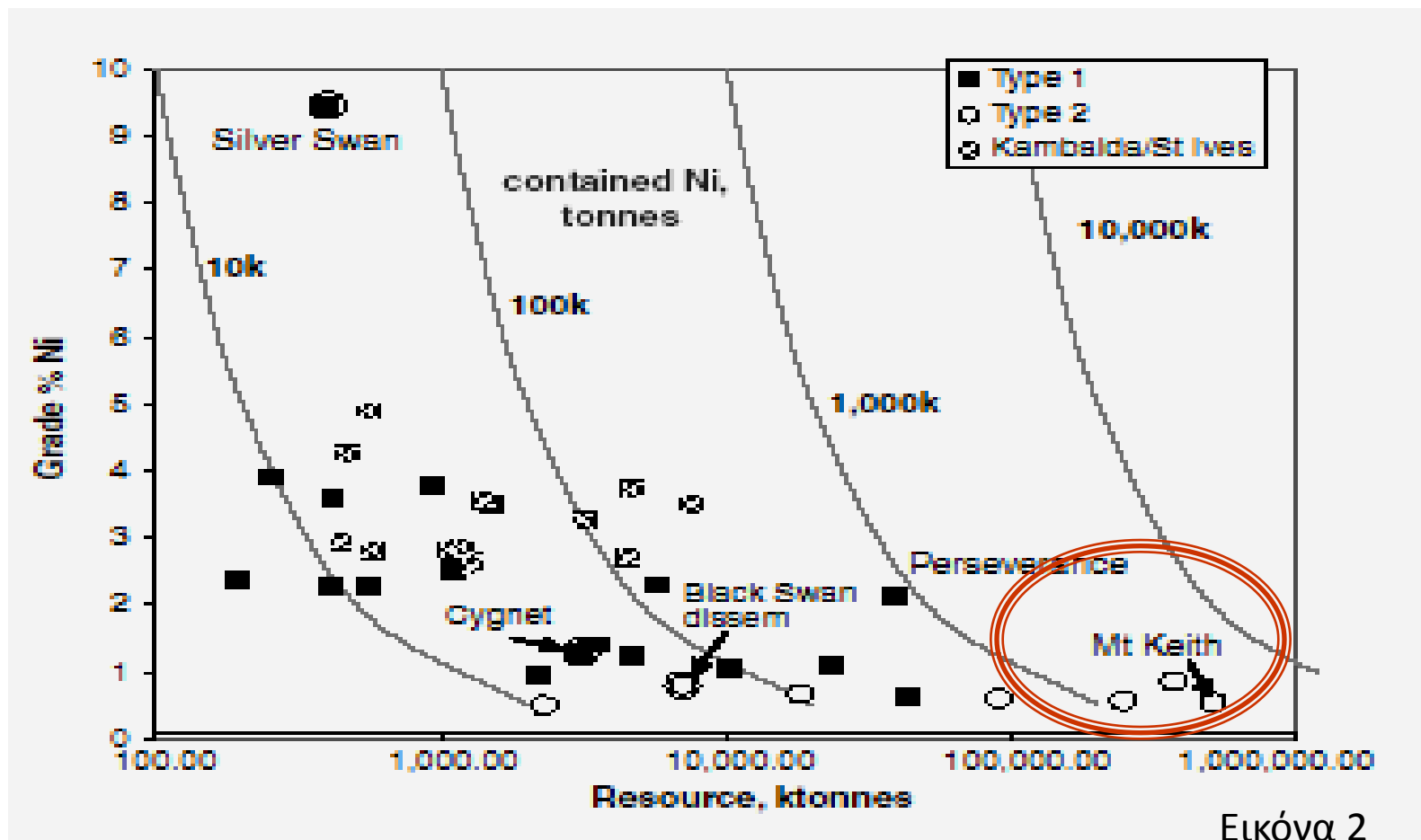
Με βάση τον τύπο μεταλλοφορίας (συμπαγής – διάσπαρτη) και την σχέση της με τα πετρώματα, (στην βάση υπερβασικών λαβών ή κατά μήκος αγωγών) διακρίνονται:

**(1) Κοιτάσματα με μικρά αποθέματα (1-10 x 10<sup>6</sup> τόνοι) και μεγάλη περιεκτικότητα Ni (1.5 - 3.5% Ni).** Παράδειγμα, τα κοιτάσματα της περιοχής Kambalda, Αυστραλία,

**(2) Κοιτάσματα με μεγάλα αποθέματα και μικρή περιεκτικότητα.** Παράδειγμα Mt Keith, Αυστραλία (0.57% Ni και 600 x 10<sup>6</sup> τόνοι αποθέματα)



# Κοιτάσματα μαγματικών θειούχων που συνδέονται με εκτεταμένους ορίζοντες πρασινοπετρωμάτων της Δ. Αυστραλίας (The Agnew-Wiluna greenstone):

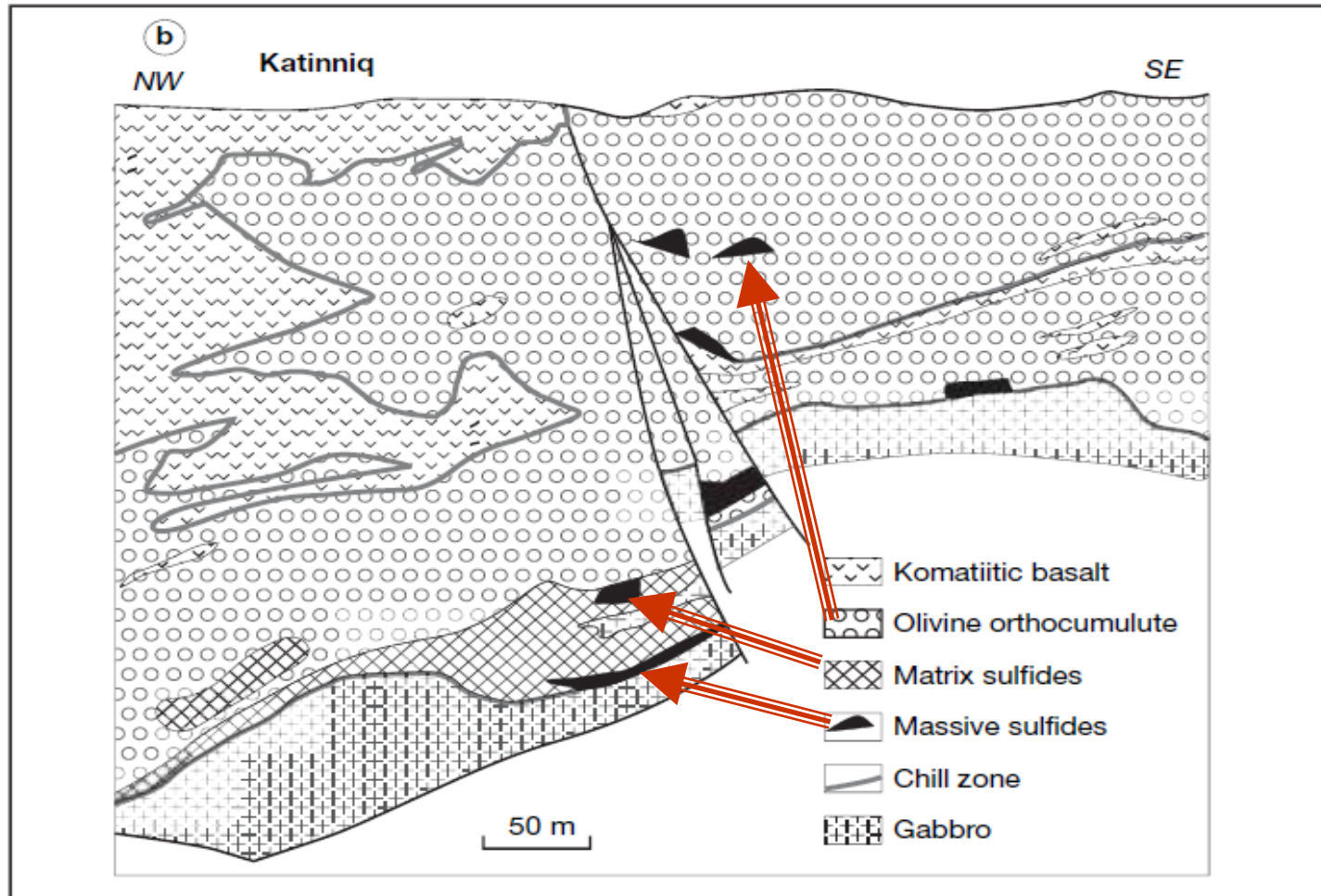


Εικόνα 2





# Μεταλλοφορία μαγματικών θειούχων σε υπερβασικά τμήματα κοματιτιτών



Εικόνα 3

# Ιστολογικά χαρακτηριστικά μεταλλευμάτων μαγματικών θειούχων



Εικόνες 4-7

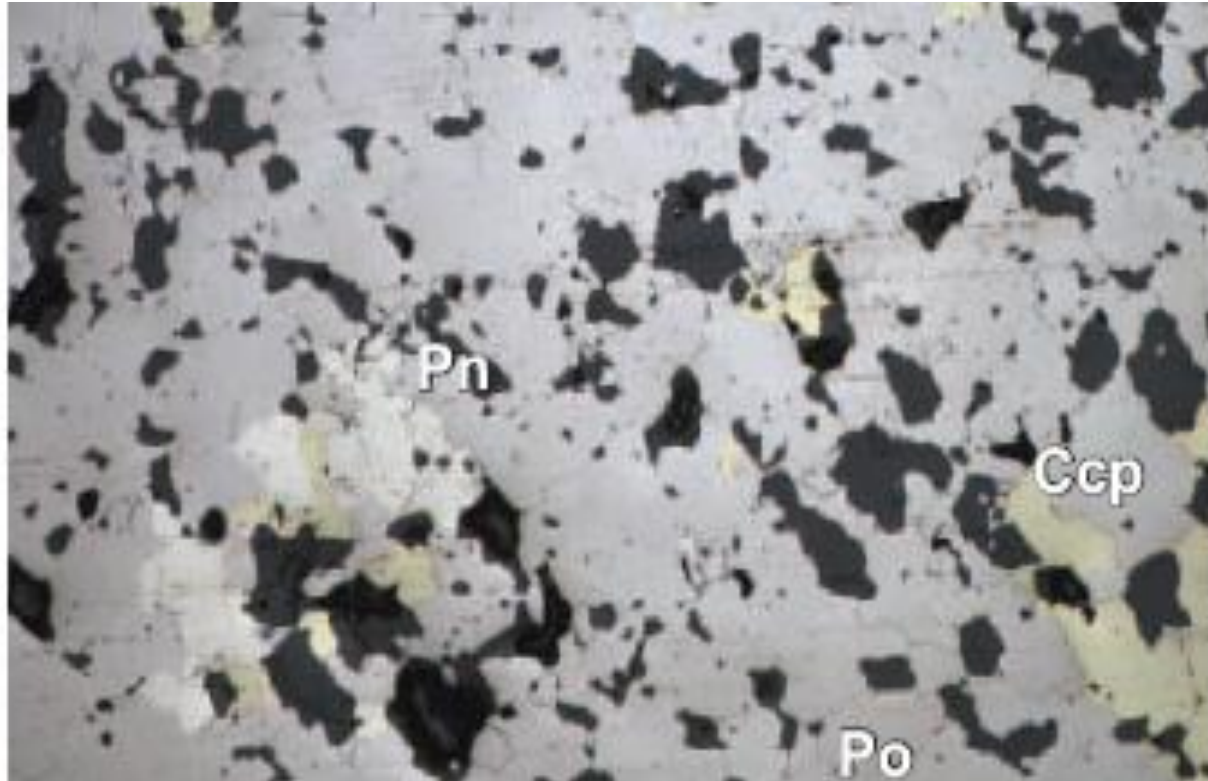


# Κύρια ορυκτά-συστατικά των θειούχων μεταλλευμάτων

- μαγνητοπυρίτης,
- πεντλανδίτης,
- χαλκοπυρίτης,
- σιδηροπυρίτης
- **PGM** (**P**latinum **G**roup **M**inerals)
- καθώς επίσης από δευτερογενή ορυκτά, προϊόντα οξείδωσης ή αναγωγής αυτών.



# Εικόνα από μεταλλογραφικό μικροσκόπιο.



Ρο=μαγνητοπυρίτης, Ccp=χαλκοπυρίτης,  
Ρη=πεντλανδίτης

Εικόνα 8

# Η σύσταση των κοματιτών:

- Δουνίτης (>40 %κ.β. MgO),
- Περιδοτιτικός κοματίτης (20-40% MgO),
- Βασαλτικός κοματίτης (12-20% MgO) έως βασάλτη (<10% MgO).

Χαρακτηριστική είναι η σκελετική ανάπτυξη κρυστάλλων ολιβίνη και κλινοπυρόξενου:  
spineliferous υφή





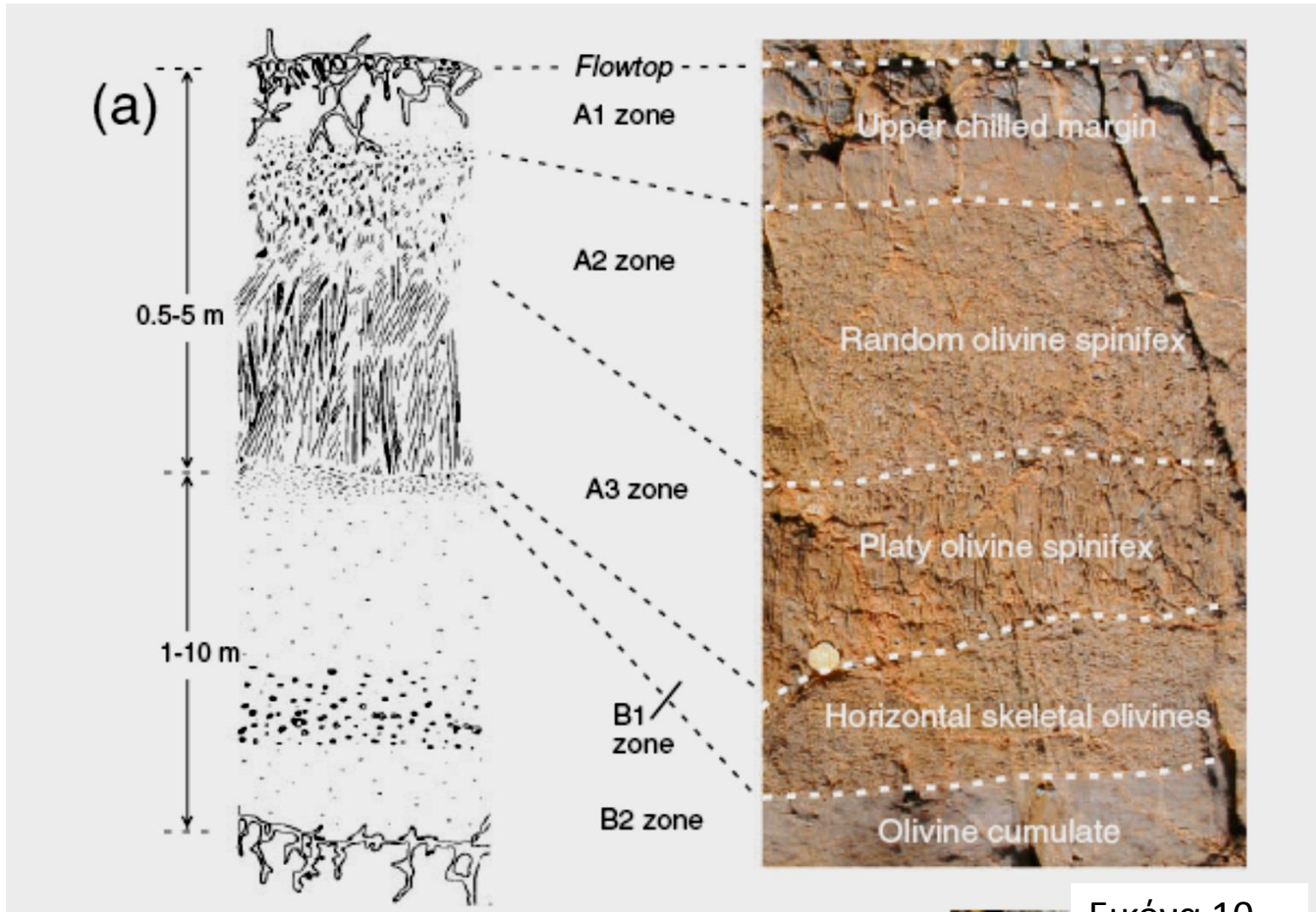
# Παραδείγματα Υφής spinifex



Εικόνα 9



# Υφή spinifex (1/5)



Εικόνα 10



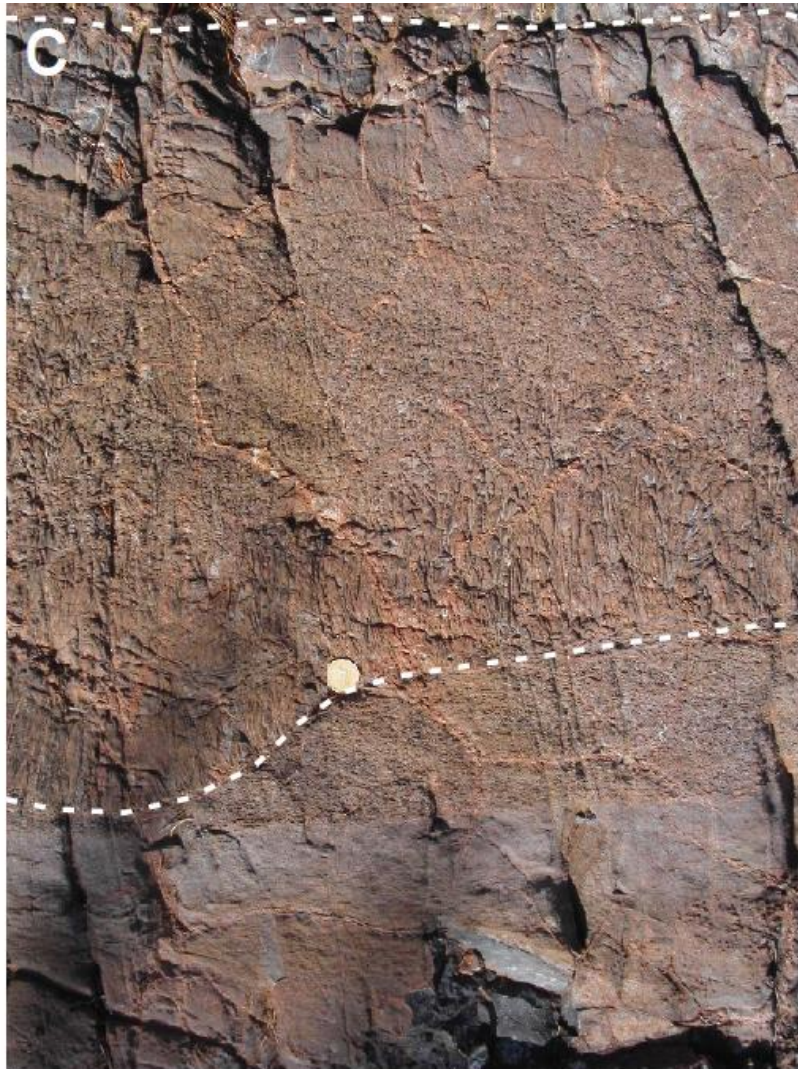
# Υφή spinifex (2/5)



Εικόνα 11



# Υφή spinifex (3/5)



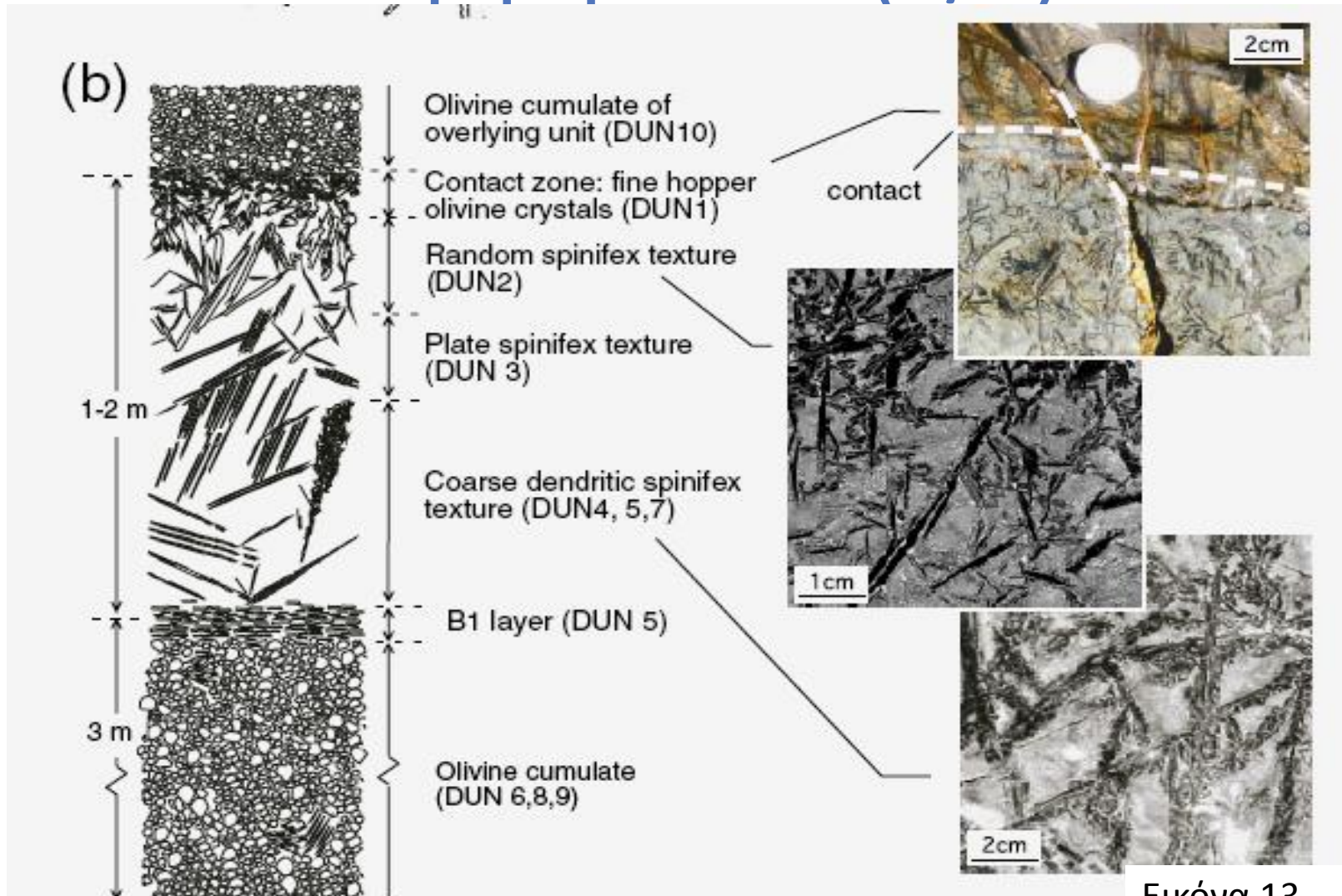
top of flow  
upper chilled zone

spinifex zone

olivine cumulate

Εικόνα 12

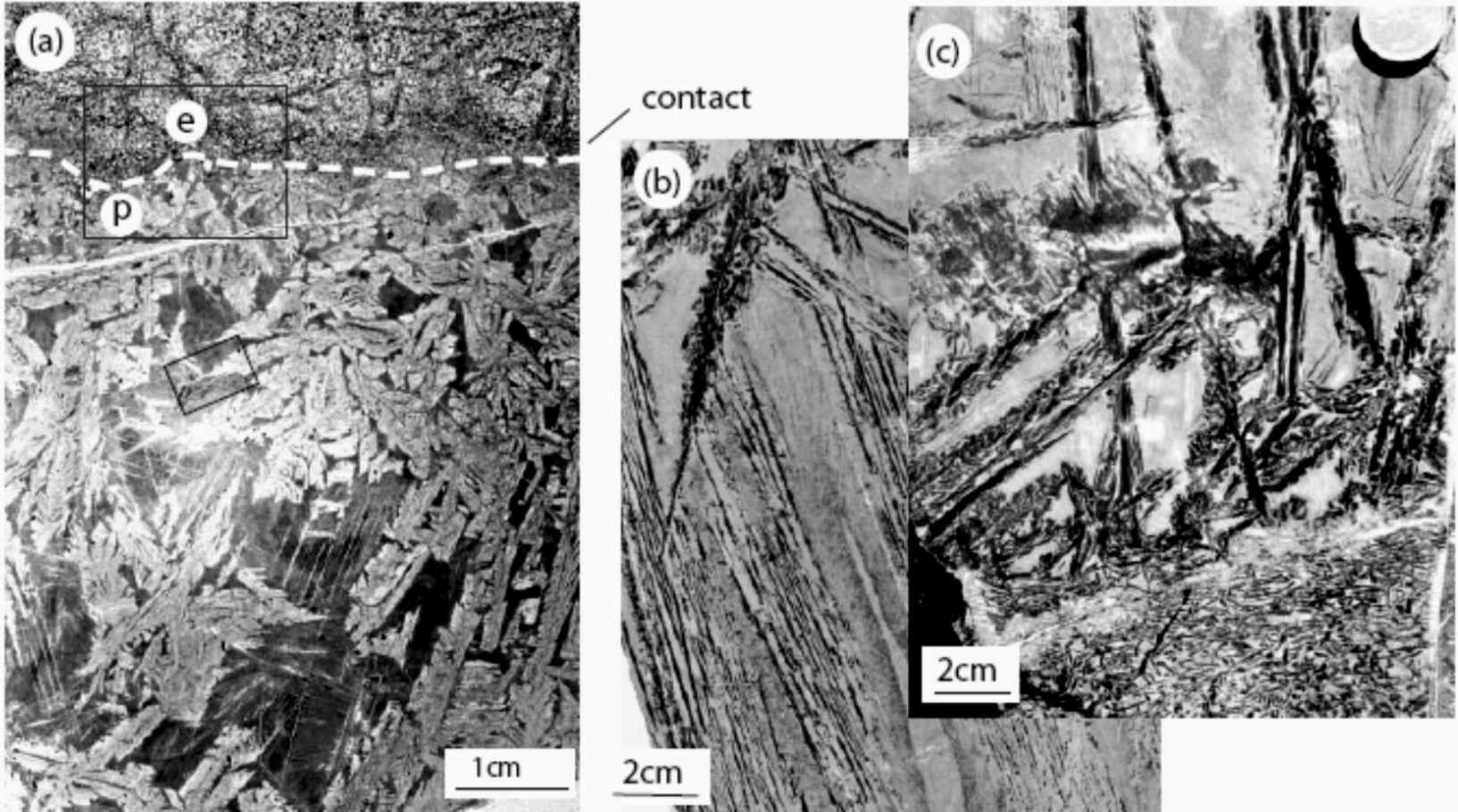
# Υφή spinifex (4/5)



Εικόνα 13



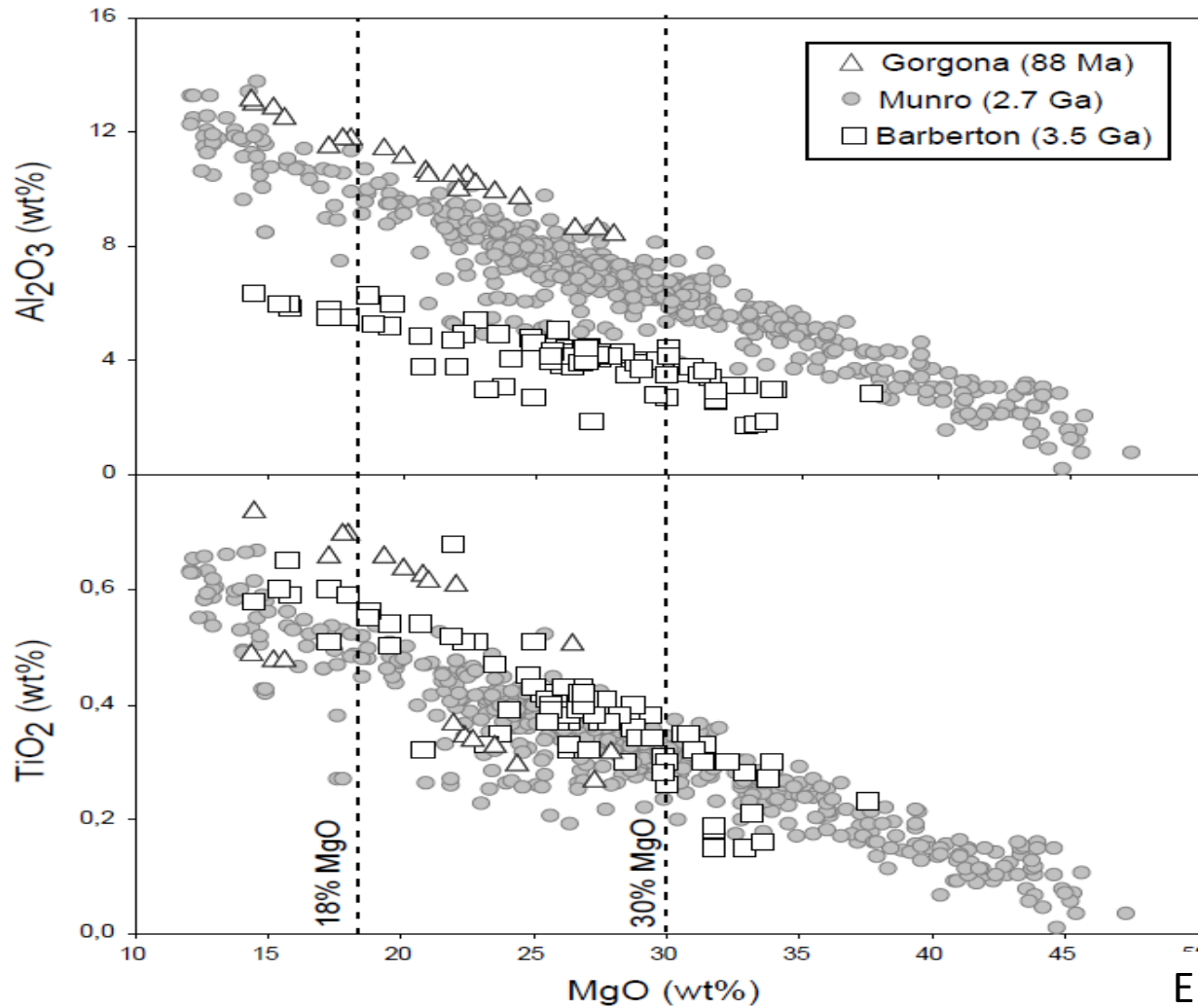
# Υφή spinifex (5/5)



Εικόνα 14

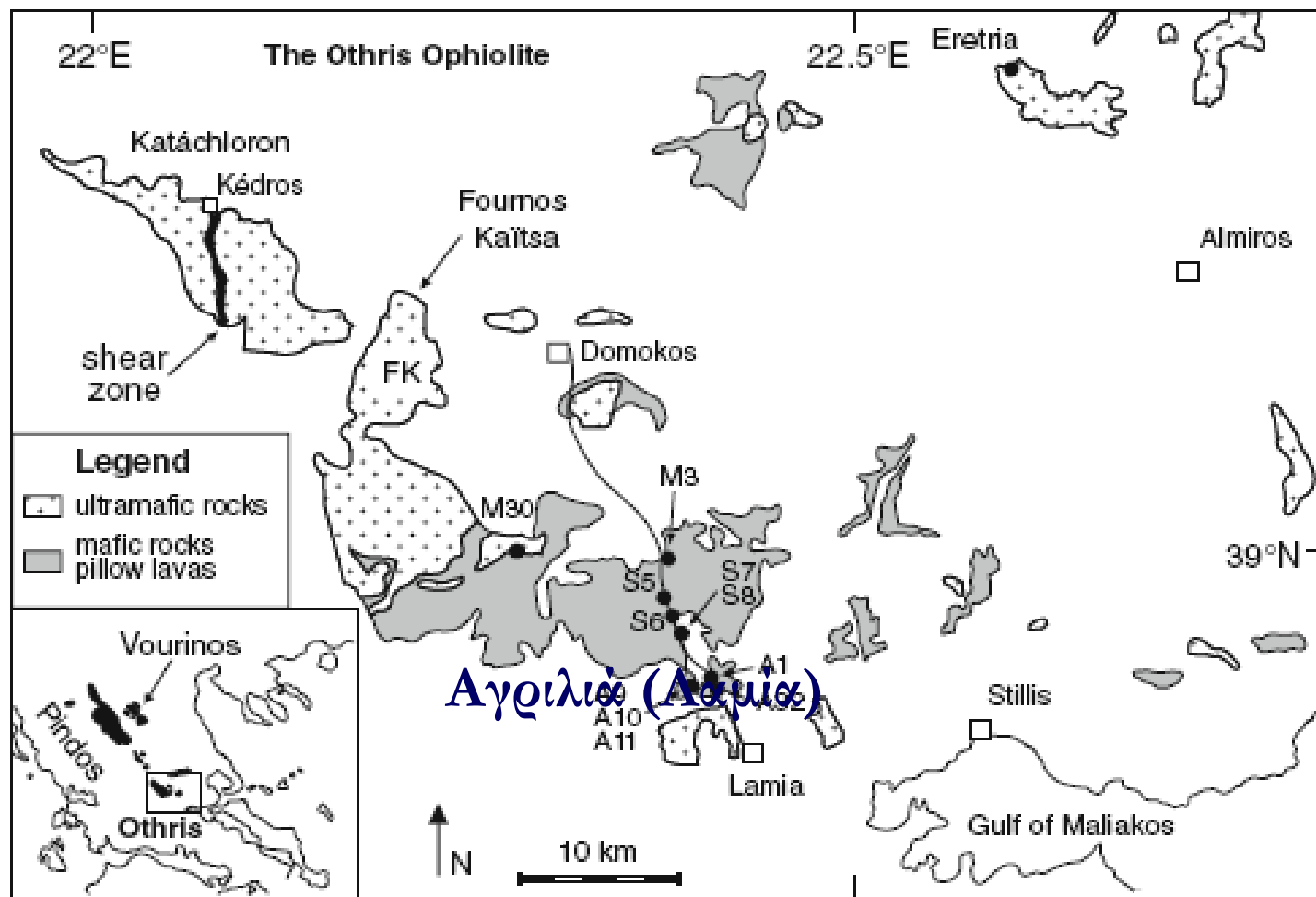


# Σύγκριση της χημικής σύστασης κοματιτών



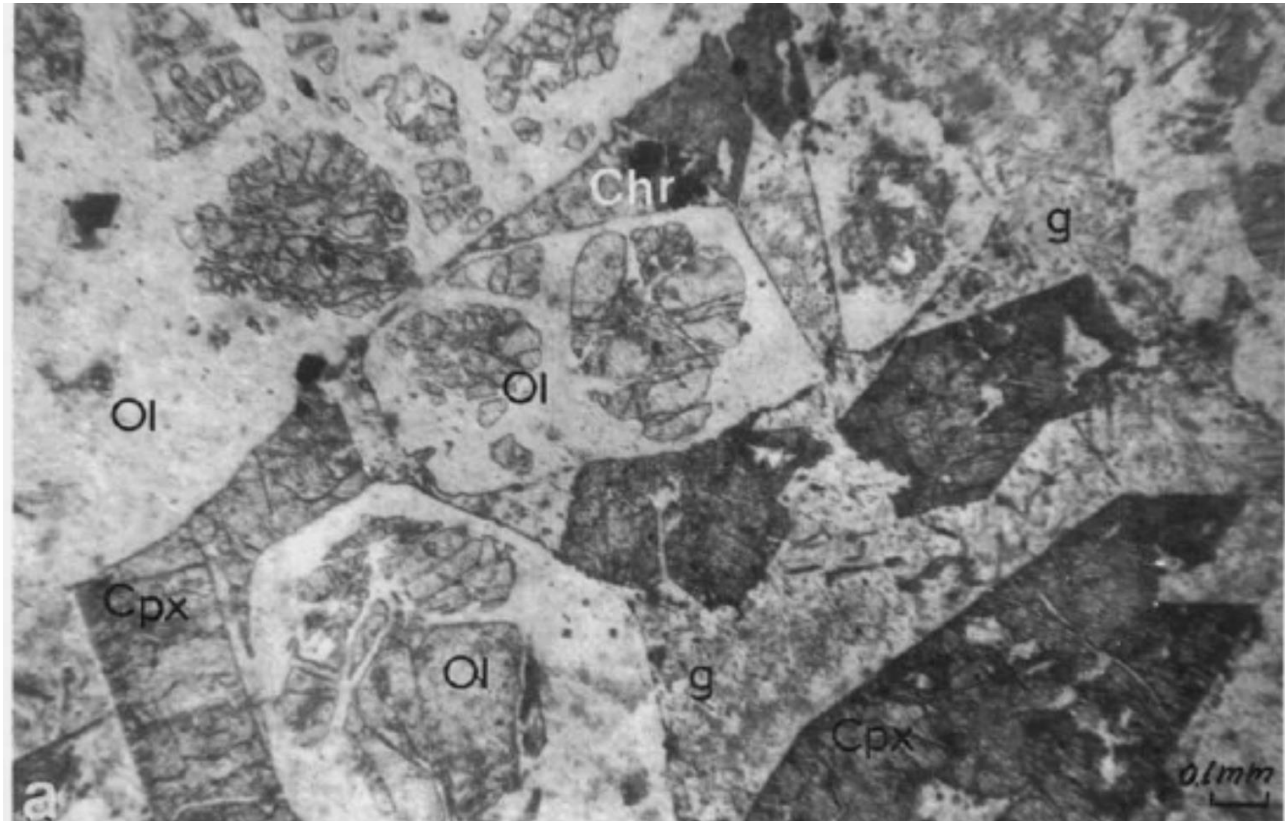
Εικόνα 15

# Υπερβασικές κοματιτικές λάβες Τριαδικής ηλικίας στο οφιολιθικό σύμπλεγμα της Όθρυος Αγριλιά (Λαμία)



Εικόνα 16

# Υπερβασική λάβα Αγριλιάς, πετρογραφικό μικροσκόπιο (1/2)

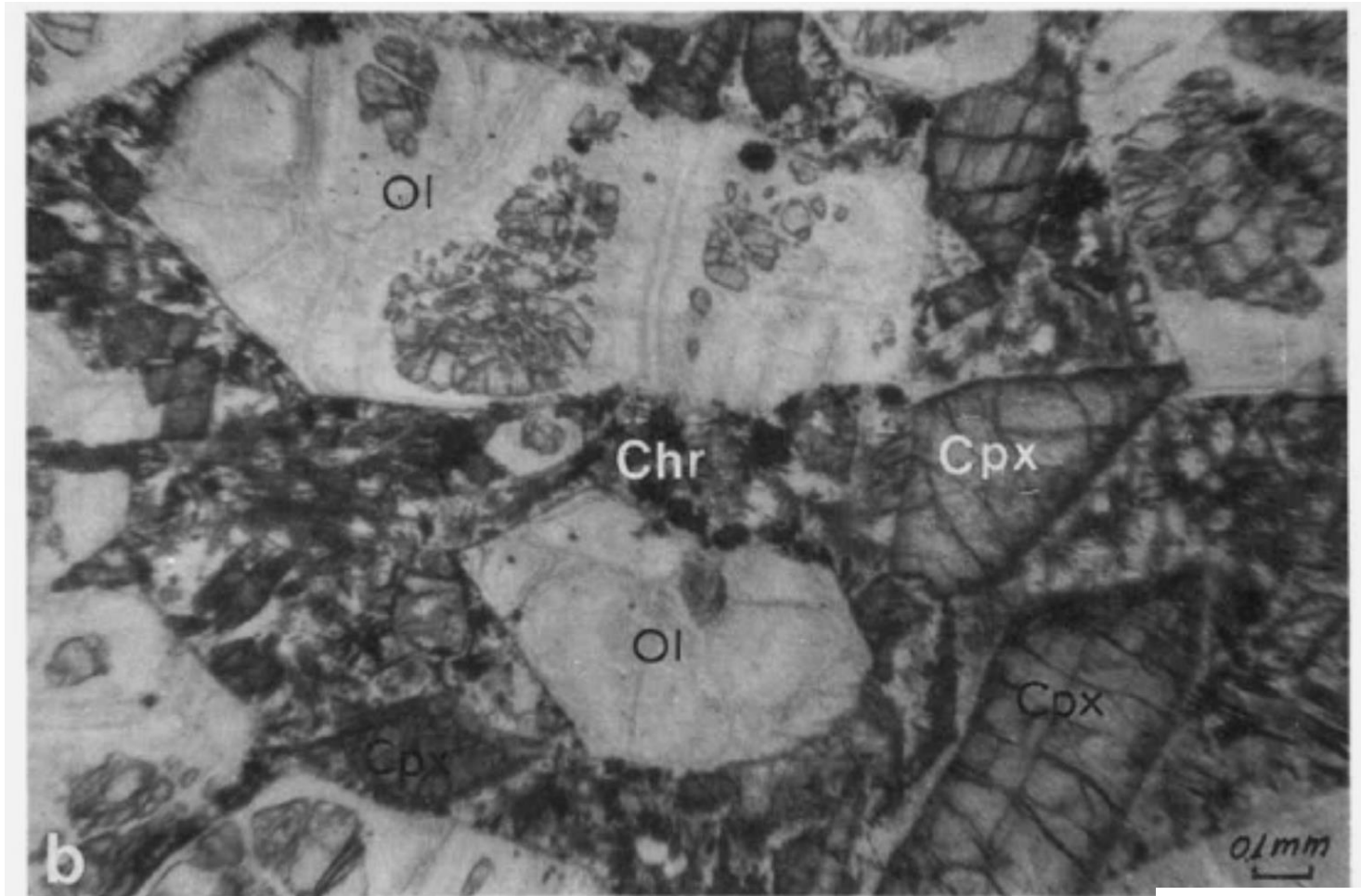


OI=ολιβίνης, Cpx=κλινοπυρόξενος, Chr=χρωμίτης g=άμορφη μάζα (γυαλί)

Εικόνα 17



# Υπερβασική λάβα Αγριλιάς, πετρογραφικό μικροσκόπιο



Εικόνα 18

# Χημική σύσταση υπερβασικής λάβας Αγριλιάς

	1	2	2a	3
SiO <sub>2</sub>	47,40	49,98	56,32	35,90
TiO <sub>2</sub>	0,38	0,14	0,16	0,20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,16	6,38	7,69	11,62
FeO	9,31	7,12	8,02	15,06
MgO	31,12	19,45	21,92	20,76
MnO	0,14	0,30	0,33	0,08
CaO	4,55	4,94	5,56	0,79
Na <sub>2</sub> O	0,21	0,00	0,00	0,07
K <sub>2</sub> O	0,10	0,00	0,00	0,08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07	-	-	-
Total	99,44	88,31	100,00	84,56

$$KD = \left[ \frac{MgO}{FeO} \right]_{liquid} \left[ \frac{FeO}{MgO} \right]_{olivine}$$

Πίνακας 1





# Γεωτεκτονικό περιβάλλον σχηματισμού των υπερβασικών λαβών

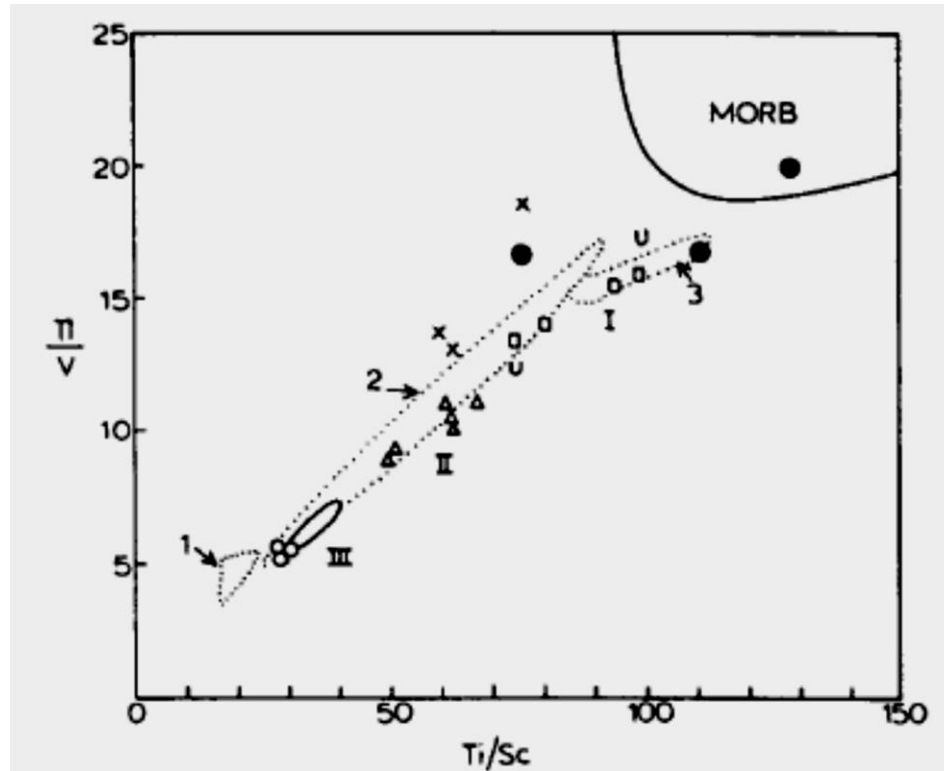


Fig. 5. Variation of Ti/V and Ti/Sc in komatiitic lavas from Agrilia Formation (solid circles). Data for mid-ocean ridge basalts (MORB), Bonin Island (1), Cape Vogel (2), Munro Township (3), New Caledonia (x) and Troodos lavas (three groups, I-III), from Cameron (1985).

Εικόνα 19

# Σχηματισμός κοιτασμάτων Ni–Cu±PGE ερωτήματα:

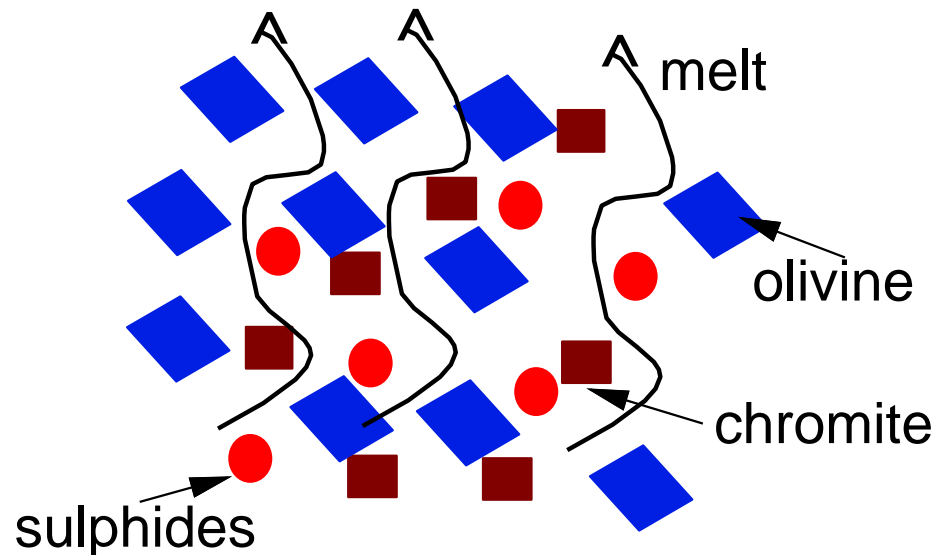
- Αιτία διαχωρισμού του θειούχου από το πυριτικό?
- Πώς συγκεντρώνονται τα θειούχα και σχηματίζουν μετάλλευμα ?
- Διεργασίες εμπλουτισμού των μετάλλων ?



# Μοντέλο γένεσης κοιτασμάτων (1/3)

1. Έντονος βαθμός μερικής τήξης ώστε να ελευθερωθούν μέταλλα ή να λιώσουν ορυκτές φάσεις

## Partial Melting Step



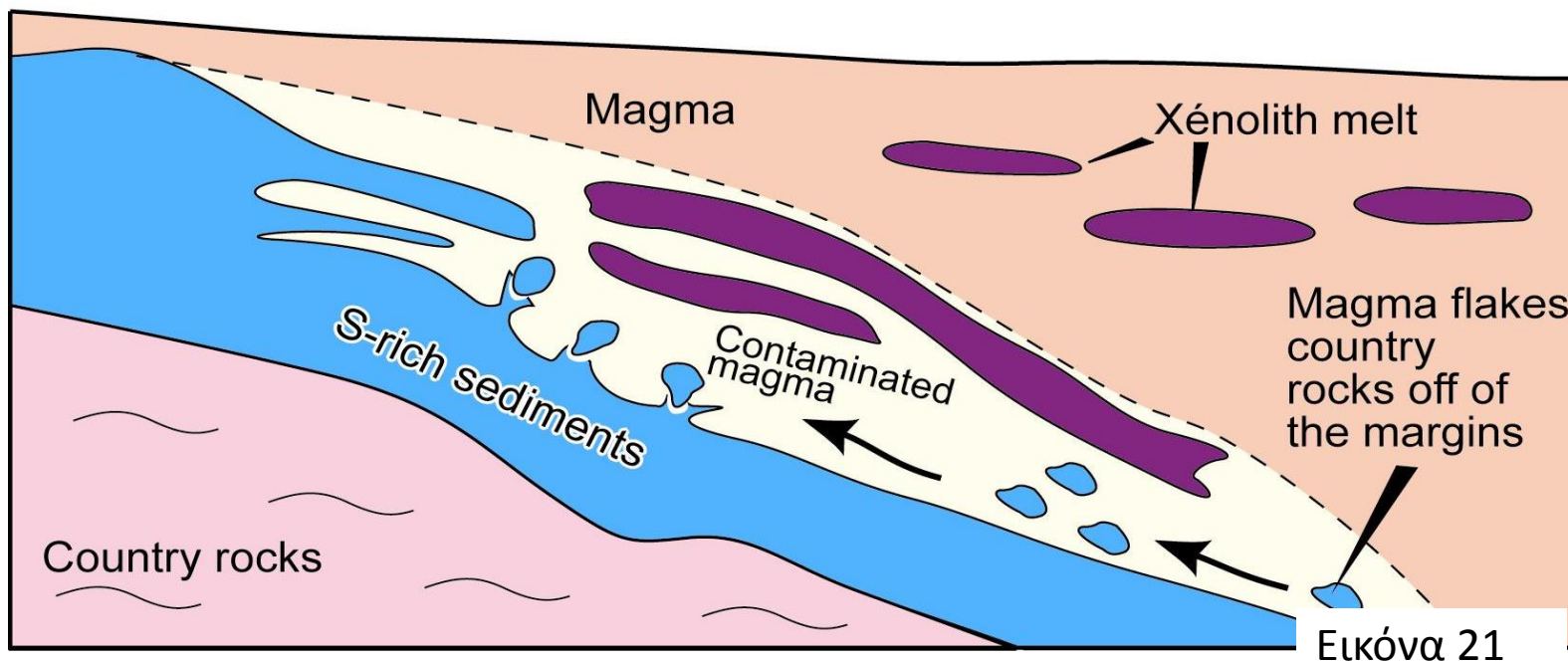
Εικόνα 20

# Μοντέλο γένεσης κοιτασμάτων (2/3)

## 2. Μεταφορά μάγματος

## 3. Αφομοίωση - Κορεσμός σε θείο

ο κορεσμός σε S επιτυγχάνεται από μόλυνση του μάγματος λόγω αντίδρασης-αφομοίωσης με πετρώματα του γήινου φλοιού.



Εικόνα 21

# Γραφτικός σχιστόλιθος



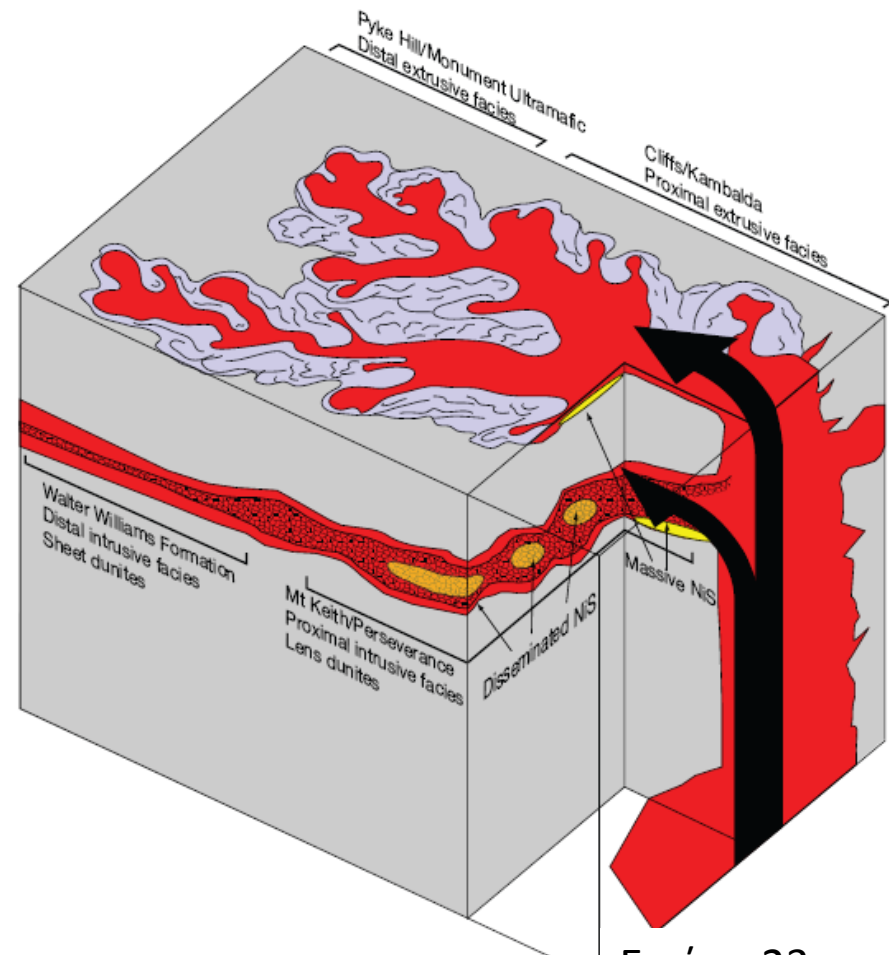
Εικόνα 22



# Αποχωρισμός θειούχου τήγματος σε κοματιτικές

Τα μεγάλα κοιτάσματα Ni-Cu-(PGE) θεωρούνται ότι σχηματίζονται κοντά σε αγωγούς μάγματος (σύνδεση στον χώρο).

π.χ. Τα κοιτάσματα Kambalda στην περιοχή Kalgoorlie ή Cliffs.

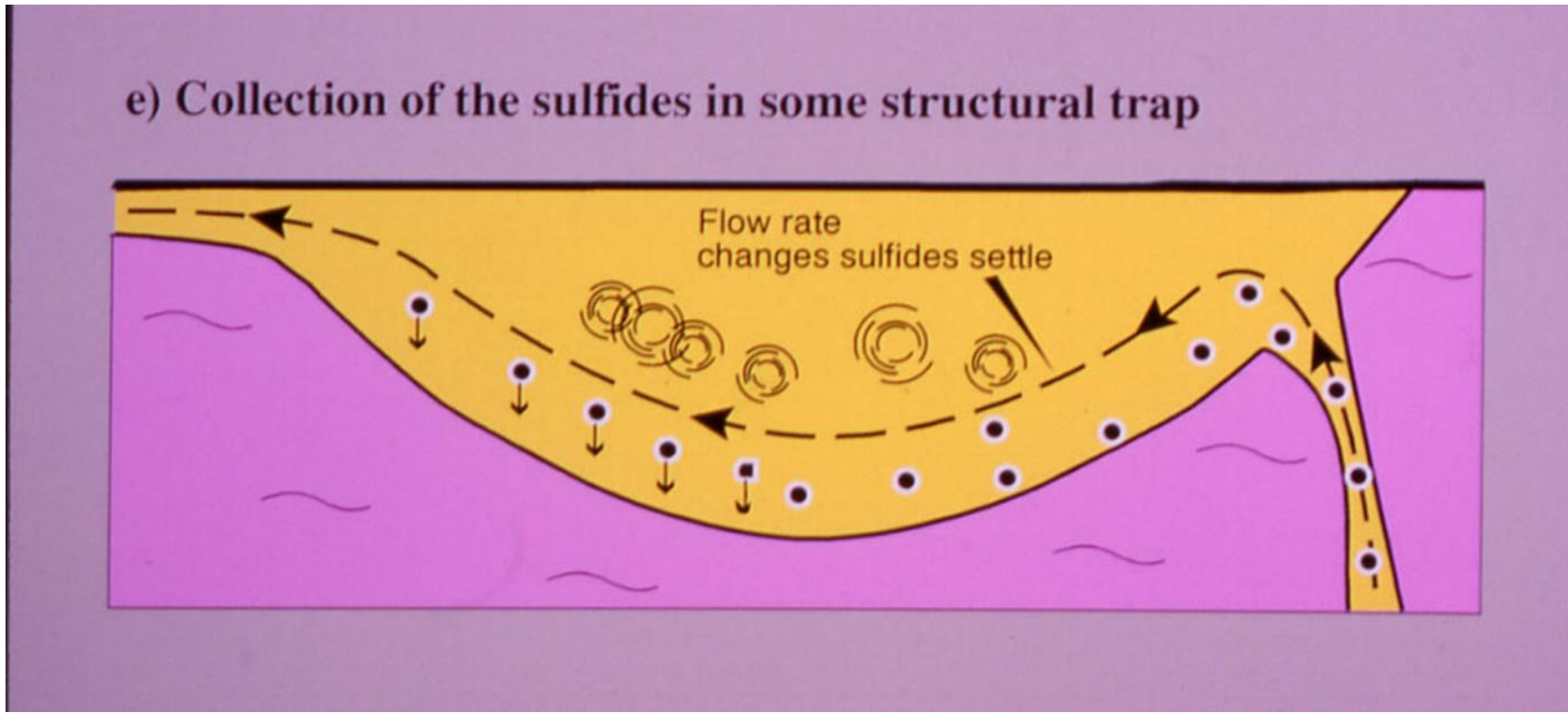


Εικόνα 23



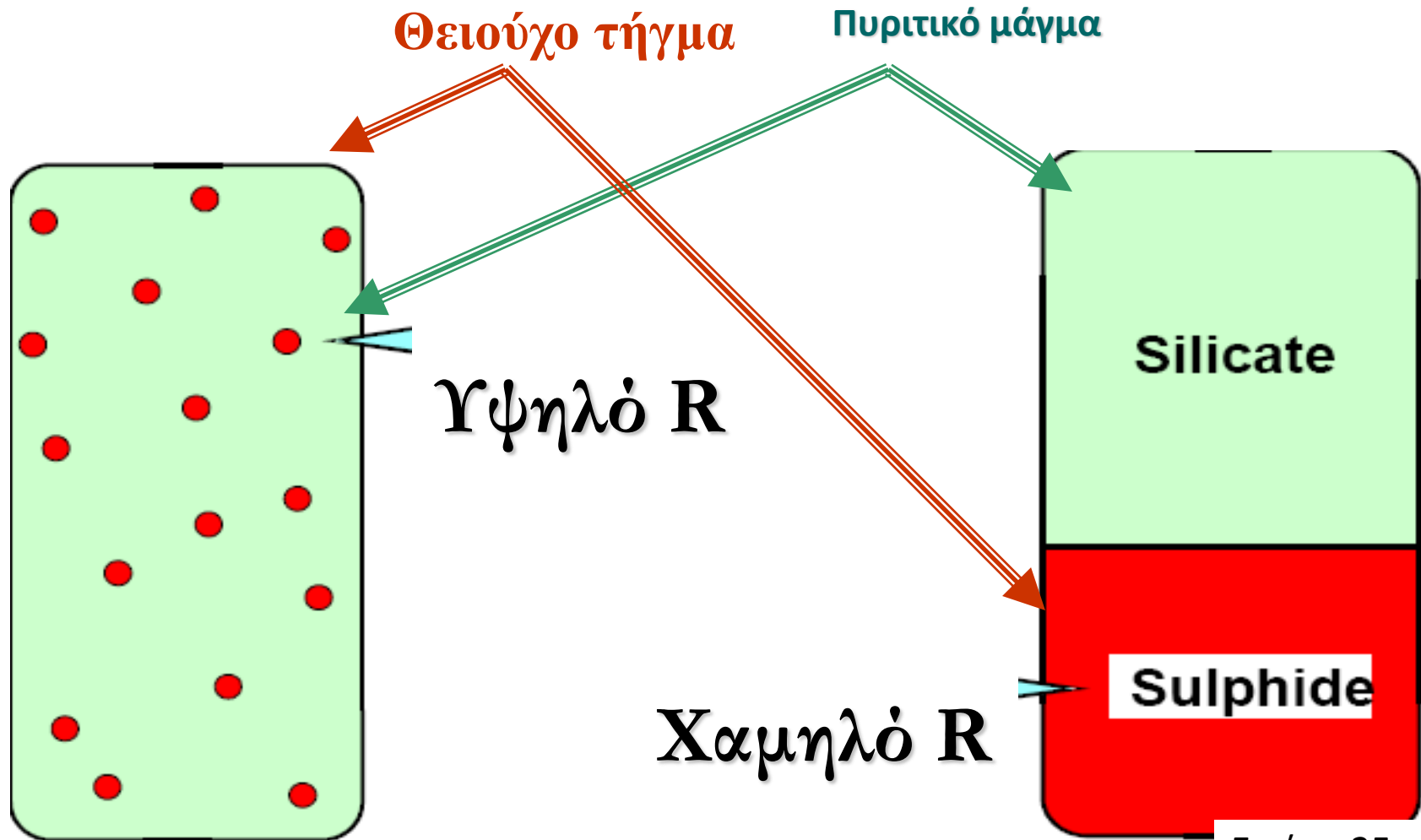
# Μοντέλο γένεσης κοιτασμάτων (3/3)

## 5. Συγκέντρωση των θειούχων



Εικόνα 24

# Συντελεστής R

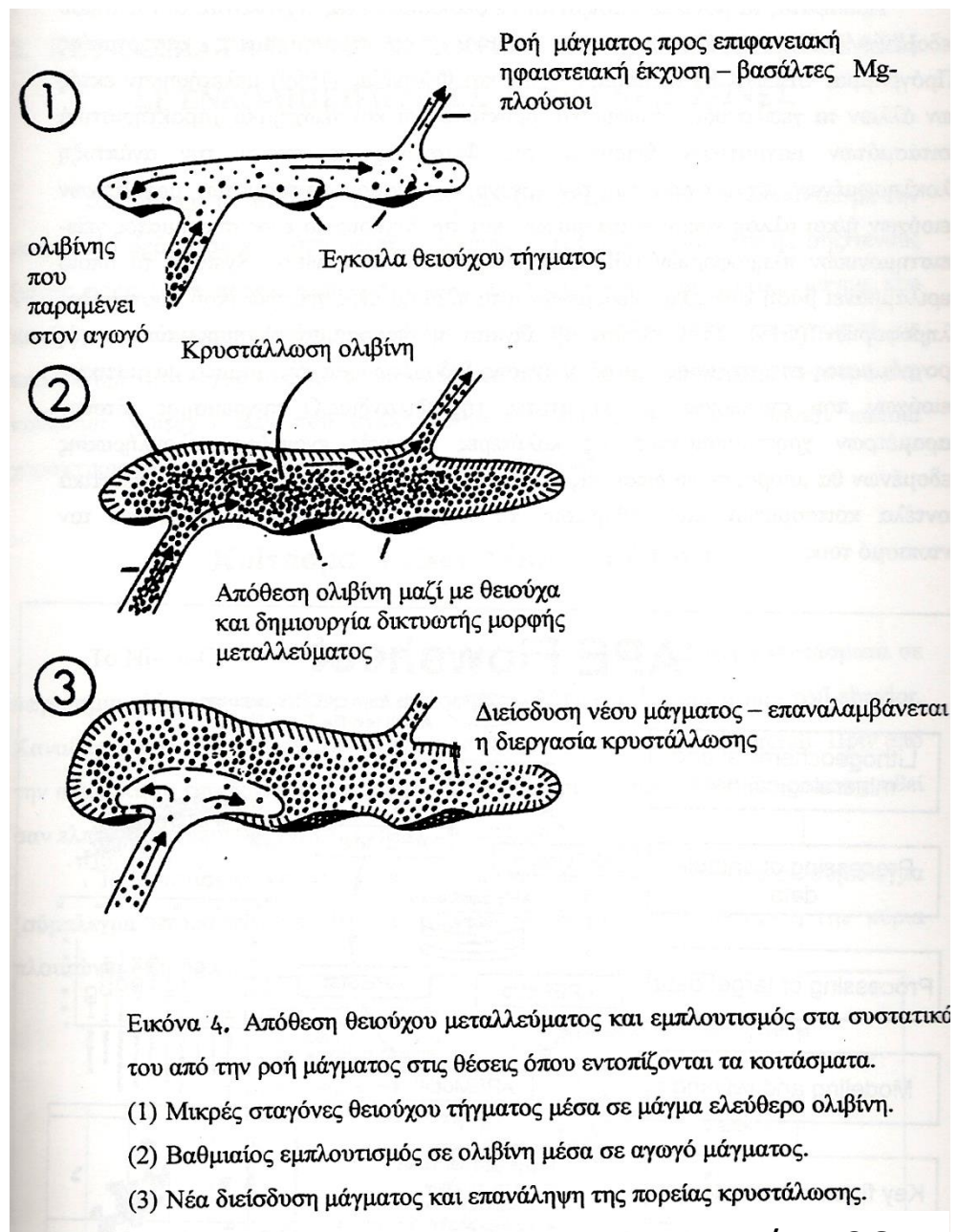


Εικόνα 25



Όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος του πυριτικού μάγματος με το οποίο βρίσκεται σε ισορροπία το θειούχο τήγμα

τόσο μεγαλύτερη είναι η μέση περιεκτικότητα σε μεταλλικά συστατικά.



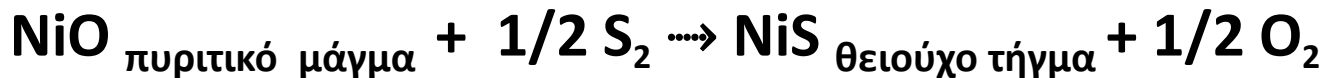
Εικόνα 26

# Τα μέταλλα Fe, Ni, Cu και Co

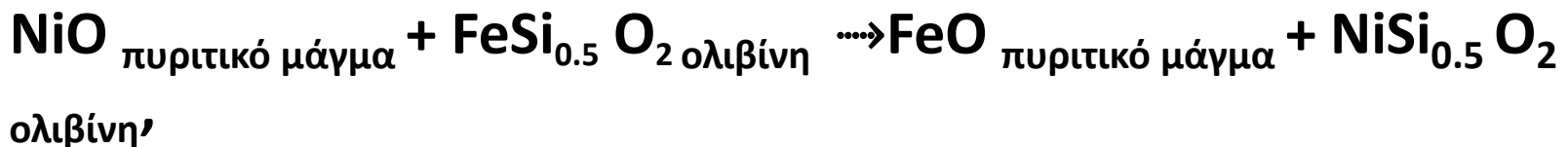
Θεωρούνται ότι συνδέονται με

- το O στο πυριτικό μάγμα και
- το S σε θειούχο τήγμα.

Με βάση την αντίδραση (π.χ. για το Ni):



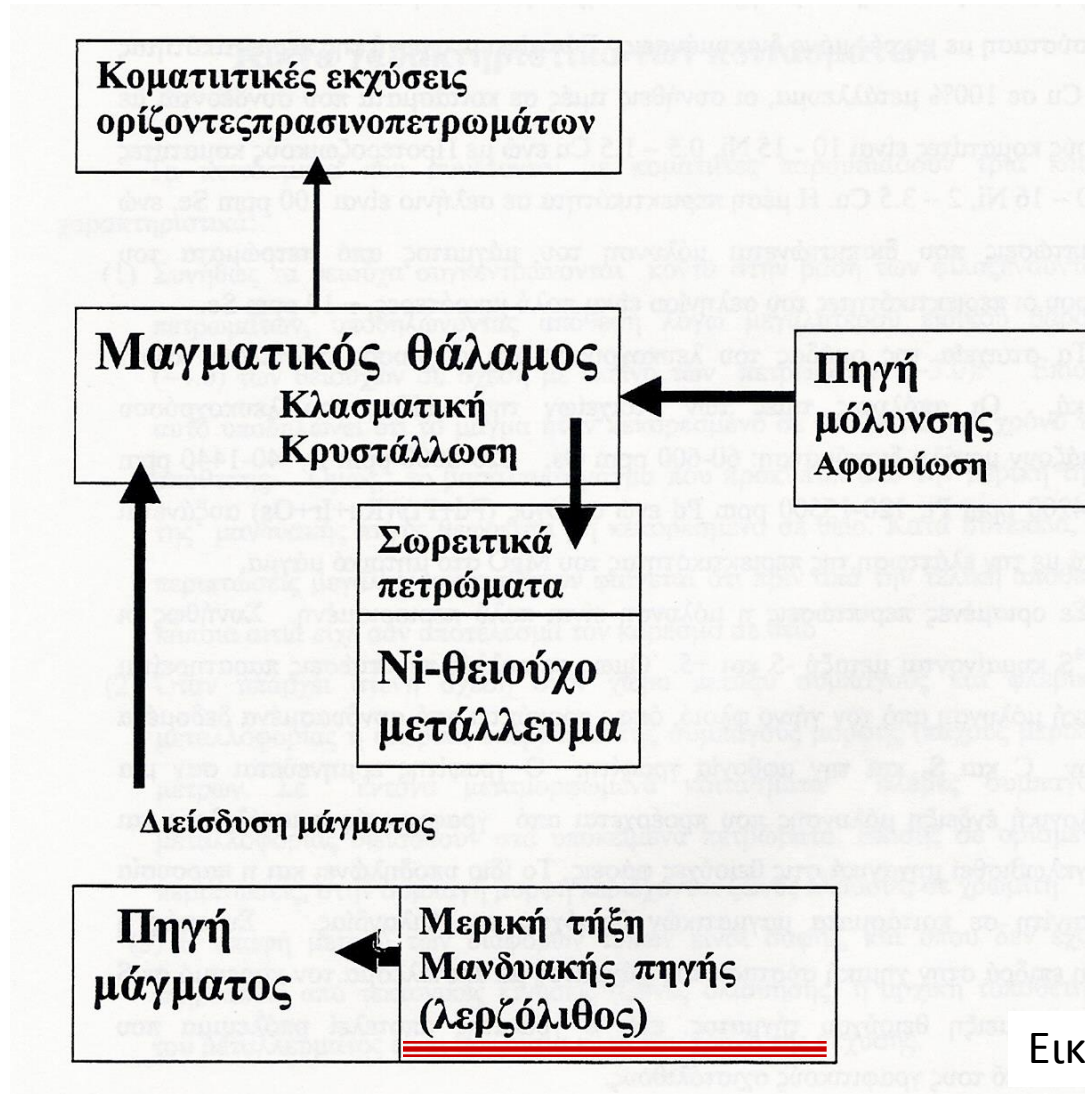
και την προτίμηση του Ni επίσης στον ολιβίνη:



το Ni κατανέμεται μεταξύ θειούχων ορυκτών και ολιβίνη τα οποία συνυπάρχουν.



# Μοντέλο μαγματικού συστήματος



Εικόνα 26

Δηλαδή, **προϋπόθεση** για τον σχηματισμό ενός μεταλλοφόρου σώματος είναι  
όλες οι διεργασίες που δρουν σ' ένα **σημαντικό  
όγκο μάγματος**,  
για να σχηματισθούν  
**σημαντικά αποθέματα**  
και να δικαιολογήσουν το κόστος της  
λειτουργίας ενός μεταλλείου.



# Παράγοντες που ελέγχουν το δυναμικό του μάγματος σε Ni–Cu±PGE

- Αφθονία μεταλλικών συστατικών στο μάγμα. Μεγάλα μαγματικά συστήματα Ni–πλουσίου μάγματος,
- Πηγή θείου ώστε να επιτευχθεί κορεσμός στο μάγμα κατά την τελική τοποθέτηση (αφομοίωση πετρωμάτων).
- Δυνατότητα του μάγματος να αντιδράσει με άλλα πετρώματα:
  - ✓ **θερμοκρασία, πυκνότητα μάγματος,**
  - ✓ **περιεκτικότητα σε πτητικά συστατικά,**
  - ✓ **δίοδοι που διευκολύνουν την τοποθέτηση του μάγματος.**



# Κύριες διεργασίες που ελέγχουν την συγκέντρωση των μεταλλικών συστατικών στο κλάσμα των θειούχων (tenor)

1. Βαθμός κλασματικής κρυστάλλωσης (%MgO) του πυριτικού μάγματος στη φάση του αποχωρισμού,
2. Ο Συντελεστής R (πυριτικό μάγμα/θειούχο τήγμα)
3. Μετα-μαγματικές διεργασίες



# Τέλος Ενότητας

Κοιτάσματα μαγματικών θειούχων

# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





Σημειώματα

# Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Μαρία Οικονόμου, Καθηγήτρια. «Μοντέλα γένεσης κοιτασμάτων. Κοιτάσματα μαγματικών θειούχων». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/GEOL15>.



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (1/6)

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

## **Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες**

Εικόνα 1: Χρήσεις του νικελίου. Copyright Seeking Alpha 2015. Σύνδεσμος:  
<http://seekingalpha.com>

Εικόνα 2: Κοιτάσματα θειούχων Δ.Αυστραλίας. Copyright Society of Economic Geologists 2015. Πηγή: Formation of magmatic nickel-sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum-group element contents. *In* Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J. and Richards, J.P. (eds.) Economic Geology 100th Anniversary Volume, (2005) p. 179-213.

Εικόνα 3: Μεταλλοφορία μαγματικών θειούχων σε υπερβασικά τμήματα κοματιτιτών. Copyright Society of Economic Geologists 2015. Πηγή: Formation of magmatic nickel-sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum-group element contents. *In* Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J. and Richards, J.P. (eds.) Economic Geology 100th Anniversary Volume, (2005) p. 179-213.





# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (2/6)

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

## **Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες**

Εικόνα 4-7: Ιστολογικά χαρακτηριστικά μεταλλευμάτων μαγματικών θειούχων. Copyright 2015 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. Πηγη: Komatiite hosted Ni-Cu-Co-PGE sulfide deposits. Short course Xi'an China 2009. Σύνδεσμος: <http://www.csiro.au/>

Εικόνα 9: Παράδειγμα spinifex υφής. Copyright San Diego State University, Department of Geological Sciences. Σύνδεσμος: <http://www.geology.sdsu.edu/>

Εικόνα 10,13: Υφή spinifex. Copyright 2015 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. Σύνδεσμος: <http://www.csiro.au/>

Εικόνα 11: Υφή spinifex. Spinifex υφή μακροσκοπικά και μικροσκοπικά. Copyright Millstream Mines. Σύνδεσμος: <http://millstreammines.com/>



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (3/6)

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

## **Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες**

ΕΙΚΟΝΑ 12,14: Spinifex υφη. Copyright 2015 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. Πηγή: Komatiite hosted Ni-Cu-Co-PGE sulfide deposits. Short course Xi'an China 2009. Σύνδεσμος: <http://www.csiro.au/>

Εικόνα 15: Διάγραμμα σύγκρισης χημικής σύστασης κοματιτών. Copyright Allen and Unwin, 1998. Πηγή: The magnesium content of komatiitic liquids. In: N.T. Arndt and E.G. Nisbet (Eds), Komatiites, pp. 479-494. Edited by N.T. Arndt and E.G. Nisbet

Εικόνα 19: Γεωτεκτονικό περιβάλλον σχηματισμού των υπερβασικών λαβών. Copyright Elsevier. Πηγή Platinum -group elements and gold in komatiitic rocks from the Agrilia Formation, Othrys ophiolite complex, Greece, Chemical Geology , 77(1989), pp. 149 – 158.



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (4/6)

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

## **Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες**

Εικόνα 20: Σχήμα μερικής τήξης μάγματος. Copyright Geological Association of Canada 2011. Πηγή: The fractionation of Ni, Cu, and the noble metals in silicate and sulphide liquids. *In Dynamic Processes in Magmatic Ore Deposits and Their Application in Mineral Exploration. Edited by R.R. Keays. Geological Association Canada, Short Course Notes XIII, p. 69-106.*

Εικόνα 21: Μοντέλο γένεσης κοιτασμάτων μαγματικών θειούχων. Copyright Society of Economic Geologists 2015. Πηγή: Secular Variation of Magmatic Sulfide Deposits and Their Source Magmas by Naldrett A.J.. *Econ. Geology*, 105 (2010), 669–688.

Εικόνα 22: Γραφτικός σχιστόλιθος Copyright 2015 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. Πηγη: Komatiite hosted Ni-Cu-Co-PGE sulfide deposits. Short course Xi'an China 2009. Σύνδεσμος: <http://www.csiro.au/>



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (5/6)

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

## **Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες**

Εικόνα 23: Αποχωρισμός θειούχου τήγματος σε κοματιτικές εκχύσεις. Copyright Society of Economic Geology, 2015. Σύνδεσμος: <http://economicgeology.org>. Πηγή: District to Camp Controls on the Genesis of Komatiite-Hosted Nickel Sulfide Deposits , Agnew-Wiluna Greenstone Belt, Western Australia: Insights from the Multiple Sulfur Isotopes, by Fiorentini et al. 2012. In Economic Geology 107:781-796

Εικόνα 24: Μοντέλο γένεσης κοιτασμάτων. Copyright Society of Economic Geology, 2015. Σύνδεσμος: <http://economicgeology.org>. Πηγή: District to Camp Controls on the Genesis of Komatiite-Hosted Nickel Sulfide Deposits , Agnew-Wiluna Greenstone Belt, Western Australia: Insights from the Multiple Sulfur Isotopes, Economic Geology 107(2012), pp. 781-796



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (6/6)

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

## **Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες**

Εικόνα 25: Διάγραμμα κατανομής R. Copyright Western Mining Services LLC & Wsteren Mining services (Australia) Pty Ltd, 2015. Πηγή: Introduction to nickel sulphide exploration, by J. Hronsky, 2007

