

# ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑ

## Μαγματικών και Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων

Διάλεξη 9<sup>η</sup>

- ✓ **ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ**
- ✓ **ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ**

Ακαδημαϊκό Έτος 2019-2020

Διδάσκων: I. Ηλιόπουλος

## Εισαγωγή



Υγιής βασάλτης και  
εξαλλοιωμένος βασάλτης



## Ορισμός της έννοιας «μεταμόρφωση»

Η IUGS-SCMR πρότεινε τον ακόλουθο ορισμό:

“Η μεταμόρφωση αποτελεί μια **subsolidus** διεργασία που οδηγεί σε ορυκτολογικές ή/και ιστολογικές (π.χ. μέγεθος κόκκων) μετατροπές και συχνά και στη χημική σύσταση ενός πετρώματος.

Αυτές οι αλλαγές είναι προϊόν φυσικών ή/και χημικών συνθηκών που διαφέρουν από εκείνες που συνήθως επικρατούν στην επιφάνεια των πλανητών και στις περιοχές κάτω από αυτήν, όπου επικρατούν συνθήκες διαγένεσης-τσιμεντοποίησης. Μπορούν να συνυπάρχουν με την μερική τήξη.”

3

## Τα όρια της μεταμόρφωσης

Το **χαμηλής θερμοκρασίας (LT)** όριο τοποθετείται εντός των ορίων της **διαγένεσης**

- Οι δύο διεργασίες είναι δύσκολο να διακριθούν
- Ορισμένοι ζεόλιθοι θεωρούνται ως διαγενετικοί και άλλοι ως μεταμορφικοί – αρκετά αυθαίρετη η διάκριση
- Η μεταμόρφωση ξεκινά γύρω στους 100-150°C για τους πλέον ασταθείς τύπους **πρωτολίθων**
- Χαρακτηρίζεται από τη δημιουργία ορυκτών όπως *laumontite*, *analcime*, *heulandite*, *carpholite*, *paragonite*, *prehnite*, *pumpellyite*, *lawsonite*, *glaucothane* ή *stilpnomelane*

4

## Τα όρια της μεταμόρφωσης

- Το **υψηλής θερμοκρασίας** όριο μεταβαίνει εντός των ορίων του **τήγματος**
- Εντός των ορίων του τήγματος στερεά και ρευστά συνυπάρχουν
- Τι γίνεται με τους ξενόλιθους, ρεσιτίτες και τα άλλα εγκλείσματα?
- Οι **μιγματίτες** (“αναμειγμένα πετρώματά”) δείχνουν βαθμιαία μετάβαση

5

## Τα όρια της μεταμόρφωσης

“Perhaps we should acquiesce and leave both the high and low boundaries of metamorphism as vague as they are in nature.

I see no reason why metamorphic petrologists cannot work in conjunction with those who study diagenesis or with igneous petrologists where their areas of expertise overlaps.”

*John D. Winter, 2001*

6

## Τα είδη των μεταμορφικών αλλαγών

- Μετατροπές φάσεων (λόγω χημικών αντιδράσεων)
- Ιστολογικές μετατροπές (λόγω ανακρυστάλλωσης)
- Όλες συμβαίνουν σε στερεά κατάσταση!
- Ισοχημική μεταμόρφωση
- Μετασωμάτωση

7

## Γιατί μελετάμε τα μεταμορφωμένα πετρώματα;

- Κατανόηση της ιστορίας τους
- Δυσκολότερο από ότι σε ιζηματογενή - μαγματικά
- Κυρίως μέσω έμμεσων μεθόδων
- Πιθανή η ύπαρξη διαφορετικών απόψεων για την πετρογένεση
- Ορυκτολογικές παραγενέσεις - εργαστηριακές μελέτες *versus* ιστολογικές παρατηρήσεις - τεκτονική
- Πειραματική πετρολογία → ώθηση στη μελέτη μεταμορφωμένων πετρωμάτων

8

## Που μπορεί να ρίξει φως η μελέτη των μεταμορφωμένων πετρωμάτων

The screenshot shows a news article from Brown University. The main headline is "Research may explain mysterious deep earthquakes in subduction zones". The article is dated February 2, 2016, and is categorized under "News". The article text discusses how researchers from Brown University have found evidence that water squeezed out of a mineral called lawsonite could trigger these mysterious quakes. It also mentions that subduction zones are some of the most seismically active areas on earth and that earthquakes in these spots can be devastating. The article includes a small image of a mineral sample and a link to "More Brain science".

## Που μπορεί να ρίξει φως η μελέτη των μεταμορφωμένων πετρωμάτων

- Συμπεράσματα για τις  $T$  που επικρατούσαν σε διάφορα βάθη του φλοιού ή και του ανώτερου μανδύα κατά το γεωλογικό παρελθόν μιας περιοχής
- Η επέκταση του πυθμένα και οι κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών  $\rightarrow$  οι θεμελιώδεις διεργασίες για τον ανασχηματισμό φλοιού και αν. μανδύα. Συνοδεύονται από μεγάλης κλίμακας μεταμόρφωση.
- Βοηθούν στην ανασύνθεση και της προ-μεταμορφικής ιστορίας μέσω της συστασιακής πληροφορίας που έχουν αποθηκεύσει (πρωτόλιθοι)

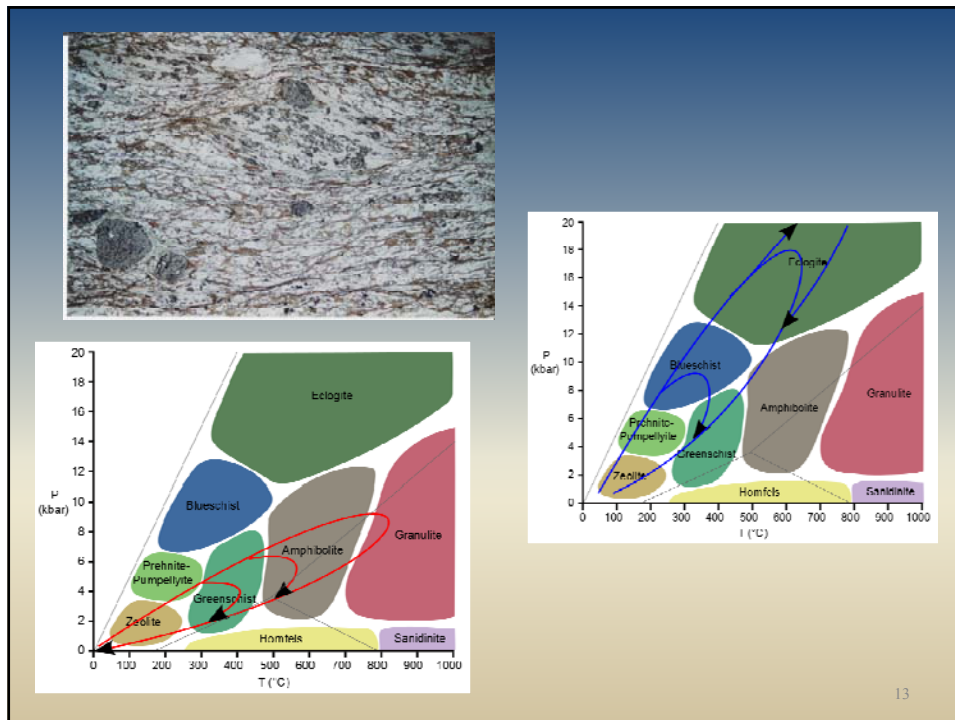
## Geo-metamorphism mailing list

The screenshot displays the JISCMAIL website for the 'GEO-METAMORPHISM' mailing list. The page is titled 'Geo-metamorphism mailing list' in pink text. The URL is <https://www.jiscmail.ac.uk/cgi-bin/webadmin?A0=geo-metamorphism>. The page features a navigation bar with 'Subscribers Corner' and 'Email Lists'. Below this, there is a 'GEO-METAMORPHISM Home Page' link and a 'LISTSERV Archives' link. The main content area is divided into several sections:

- Options:** Includes links for 'Subscribe or Unsubscribe' and 'Log In \*\*\* Get Password'.
- JISC Advance Services:** Lists various services such as JISC Digitalmedia, JISC Infonet, JISC Legal, JISC NetSkills, JISC Procureweb, and JISC Technis.
- Latest Messages:** Shows a list of recent emails with details like sender, subject, and date. For example, 'South American Symposium on Isotope Geology' by Mauricio Ibanez-Mejia on Fri, 23 Mar 2012.
- JISCMAIL Tools:** Provides links for 'Calendar | help', 'Discussion Room | help', 'Files Area | help', 'Make a Meeting | help', and 'Surveys | help'.
- RSS Feeds and Sharing:** Offers RSS feeds for JISC 1.0 and JISC 2.0, as well as Atom feeds and a 'Bookmark/Share' option.
- Search Archives:** Includes a search box for the mailing list archives and a search box for JISCMAIL open content.
- Metamorphic Studies Group:** A section describing the group's purpose and providing a calendar of events from March 2012 back to January 2011.

## Γιατί είναι χρήσιμη η μελέτη των μεταμορφωμένων πετρωμάτων

- Αναπόσπαστο τμήμα της διεπιστημονικής μελέτης της εξέλιξης της λιθόσφαιρας
- Εξέλιξη της γης μέσω της μελέτη της έκλυσης θερμότητας με τον χρόνο
- Αποτελούν **θερμικές «ανωμαλίες»** που η μελέτη τους βοηθά στην κατανόηση της λειτουργίας της γης
- Η καταγραφή της διαδρομής P-T-D-t και η συσχέτιση αυτών βάσει πετρωμάτων διαφορετικών ζωνών της ίδιας τεκτονικής ζώνης ή διαφορετικών ζωνών → τεκτονικές διεργασίες



13

## Γιατί είναι χρήσιμη η μελέτη των μεταμορφωμένων πετρωμάτων

- Η **αύξηση της πυκνότητας** που προκαλείται λόγω του μετασχηματισμού των φάσεων είναι υπεύθυνη για την κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών
- Αν το φαινόμενο είναι επεισοδιακό τότε μπορεί να πυροδοτήσει **σεισμικά γεγονότα** στις ζώνες καταβύθισης
- Η μελέτη των P-T-D-t στις ορογενετικές ζώνες → κατανόηση του σχηματισμού τους και **ανασύνθεσης του παλαιο-περιβάλλοντος** και **πρόβλεψη σχηματισμού νέων**

14

## Γιατί είναι χρήσιμη η μελέτη των μεταμορφωμένων πετρωμάτων

- Η συγκράτηση **πηκτικών συστατικών** κατά την ωκεάνια μεταμόρφωση και την σύγκλιση πλακών και η μετέπειτα απελευθέρωσή τους, συμβάλει στη διακίνησή τους επηρεάζοντας τη σύσταση τόσο του ωκεανού όσο και της ατμόσφαιρας.
- Ο **μαγματισμός** στα περιθώρια των πλακών, τόσο στον μανδύα όσο και στο φλοιό, οφείλεται εν μέρει στα ρευστά που απελευθερώνονται από τις αντιδράσεις στις ζώνες καταβύθισης

15

## Γιατί είναι χρήσιμη η μελέτη των μεταμορφωμένων πετρωμάτων

- Κατανόηση της συσχέτισης **γρανουλιτών-γρανιτών** και κατά συνέπεια της δημιουργίας μαγμάτων στις ηπειρωτικές περιοχές
- Η μηχανική και θερμική συμπεριφορά των ηπείρων καθορίζεται εν μέρει από τις μεταμορφικές αντιδράσεις και τον ρυθμό τους, και κυρίως εκείνες που ευθύνονται για την **μερική τήξη και τη δημιουργία μάγματος**
- Η μεταμορφική πετρολογία επιτρέπει την **επαλήθευση γεωφυσικών διασκοπήσεων** στον φλοιό και στον μανδύα αφού αυτό που καταγράφουν είναι οι μετασχηματισμοί φάσεων

16



## Γιατί είναι χρήσιμη η μελέτη των μεταμορφωμένων πετρωμάτων

- Οι μεταμορφικές διεργασίες είναι πολλές φορές υπεύθυνες για τη δημιουργία **κοιτασμάτων**
- Πολλά από τα **βιομηχανικά ορυκτά** και τους **πολύτιμους λίθους** έχουν μεταμορφική προέλευση. Μεταμορφικές τεχνικές οδηγούν στην πρόβλεψη πιθανόν αδαμαντοφόρων ζωνών
- Η **ορυκτοποίηση** ως μέθοδος δέσμευσης και αποθήκευσης CO<sub>2</sub> έχει τα θεμέλιά της σε μεταμορφικές αντιδράσεις και χρησιμοποιεί εν μέρει μεταμορφωμένα πετρώματα

17



THE GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA®  
SCIENCE • STEWARDSHIP • SERVICE

GSA home Log In

**Are Ants the Answer to CO<sub>2</sub> Sequestration?**  
*New GEOLOGY articles published online on 14 July 2014*

Boulder, Colo., USA – A 25-year-long study published in GEOLOGY on 14 July provides the first quantitative measurement of in situ calcium-magnesium silicate mineral dissolution by ants, termites, tree roots, and bare ground. This study reveals that ants are one of the most powerful biological agents of mineral decay yet observed. It may be that an understanding of the geobiology of ant-mineral interactions might offer a line of research on how to "geoengineer" accelerated CO<sub>2</sub> consumption by Ca-Mg silicates.

Researcher Ronald Dorn of Arizona State University...  
dissolution of calcium (Ca) and...

**livescience**  
TECH HEALTH PLANET EARTH SPACE STRANGE NEWS ANIMALS HISTORY HUMAN NATURE SHOP

TRENDS: Wearable Tech // Archaeology // Military & Spy Tech // Zika Virus // Our Amazing Planet // Best Fitness Trackers // Human Origins

**Can Ants Save the World from Climate Change?**  
By Becky Oskin, Senior Writer | August 01, 2014 07:56am ET

Ants may be some of Earth's most powerful biological climate brokers, a provocative new study claims.

The average ant lives and dies in less than a year, but a long-term experiment tracking the insects'

Science Newsletter: Subscribe  
enter email here submit

Follow Us  
f t in g+

## Γιατί είναι χρήσιμη η μελέτη των μεταμορφωμένων πετρωμάτων

- Η γνώση των αρχών της μεταμόρφωσης και των ορυκτών της βοηθά στον σχεδιασμό και σύνθεση νέων ορυκτών υψηλότερης προστιθέμενης αξίας
- Μερικές από τις αρχαιότερες ενδείξεις ζωής εντοπίζονται μέσα σε μεταμορφωμένα πετρώματα (π.χ. γραφίτης)

## Γιατί είναι χρήσιμη η μελέτη των μεταμορφωμένων πετρωμάτων

- Τεχνικές που για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη μεταμορφωμένων πετρωμάτων, τώρα χρησιμοποιούνται ευρέως και από άλλους κλάδους.
- Η συνεισφορά της μεταμορφικής πετρολογίας είναι μεγάλη και στην **αρχαιολογία**, όχι μόνο για την προέλευση πρώτων υλών αλλά και για την ανασύνθεση της αρχαίας κεραμικής τεχνολογίας

21

### 2. Future areas of research

Continued refinement of phase equilibria and methods of P-T estimation

Phase equilibrium modelling – pros and cons of different approaches (linear equation approach, G minimization approach). There is a need to calculate phase diagrams rapidly and automatically to allow experimentation in modelling natural rocks (different chemical systems; different bulk compositions)

Kinetics - why does a metamorphic rock look the way it does? how do metamorphic reactions actually proceed at the microscopic and atomic levels? are metamorphic reactions over-stepped? how fast do metamorphic reactions proceed?

Interplay between phase equilibria and kinetics (need to understand both better in order to make sense of the mineral assemblages and textures in metamorphic rocks)

22

Interplay between metamorphism, microstructures and deformation – P-T-D-t studies.

What are we dating ? - linking of metamorphic petrology and geochronology (accessory phase petrogenesis); spatially resolved dating

Constraining geodynamic models of lithosphere

Interplay between metamorphism, melting and deformation, bearing on continental rheology and geodynamics

Mechanisms of UHP metamorphism and exhumation

Interplay between seismic activity, fault movements, subduction, phase transitions, metamorphic devolatilization.

Grain boundary fluids and material transport

Imaging of minerals using variety of techniques

Interface with materials science - strategic minerals, microstructure, nanotechnology and nanoscale processes

Interface with space exploration?

23

## Κατηγορίες Μεταμόρφωσης

Υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις:

### 1. Με βάση τον παράγοντα μεταμόρφωσης

- Δυναμική Μεταμόρφωση
- Θερμική Μεταμόρφωση
- Δυναμο-θερμική Μεταμόρφωση

24

## Κατηγορίες Μεταμόρφωσης

### 2. Με βάση την εμφάνιση στην ύπαιθρο

- Μεταμόρφωση επαφής
  - Πυρομεταμόρφωση
- Καθολική Μεταμόρφωση
  - Ορογενετική Μεταμόρφωση
  - Μεταμόρφωση Ενταφιασμού
  - Μεταμόρφωση Ωκεάνιου πυθμένα
- Υδροθερμική Μεταμόρφωση
- Δυναμική Μεταμόρφωση
- Μεταμόρφωση από πρόσκρουση μετεωριτών

25

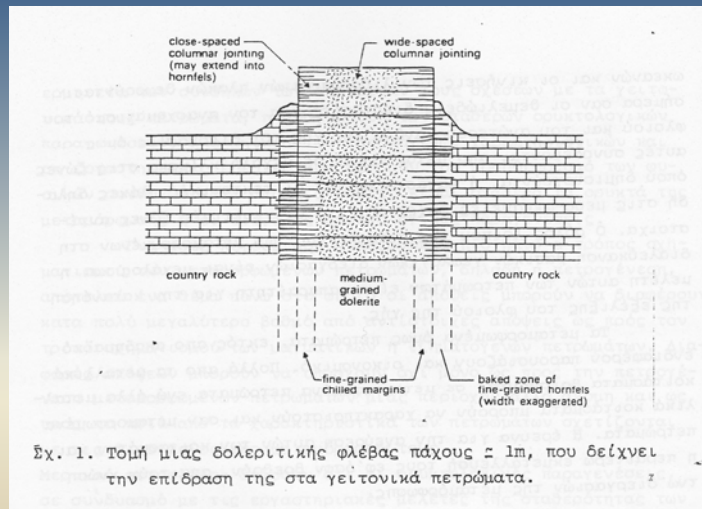
## Χαρακτηριστικά Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων

### Μεταμόρφωση Επαφής

Το μέγεθος και το σχήμα μιας μεταμορφικής άλω καθορίζονται από:

- Τη φύση του πλουτωνίτη
  - μέγεθος
  - σχήμα
  - προσανατολισμός
  - θερμοκρασία
  - σύσταση
- Τη φύση των γειτονικών πετρωμάτων
  - Σύσταση
  - βάθος και μεταμορφικός βαθμός πριν τη διείσδυση
  - Διαπερατότητα

26



27



Φαινόμενα επαφής μεταξύ γρανίτη Δ. Ικαρίας και γενεσιοσχιστολίθων της περιοχής.

28

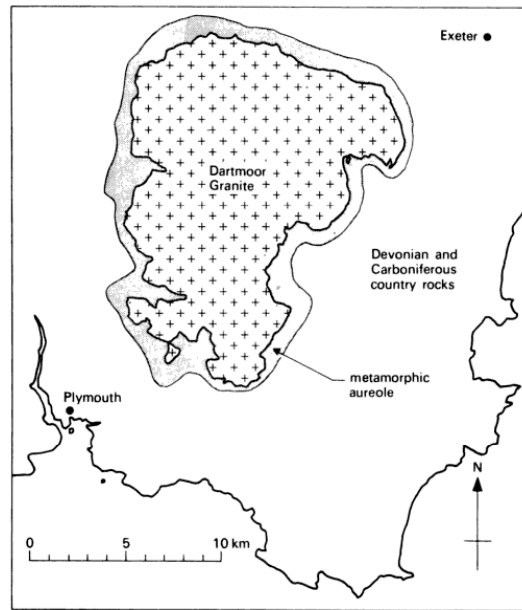


Figure 3.4 The contact aureole surrounding the Dartmoor Granite, Devon, England. Based upon British Geological Survey map sheets, with permission.

29

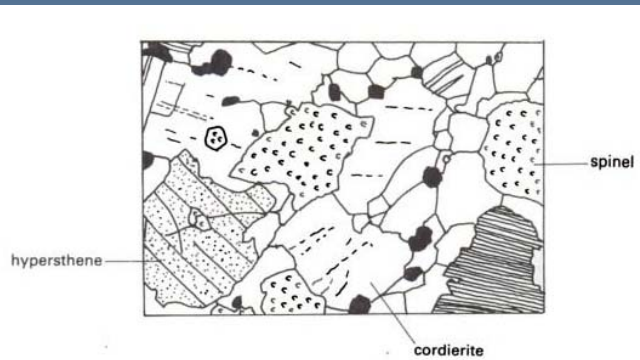


Figure 3.3 Hornfels showing equilibrium granoblastic texture with 120° triple junctions. Contact aureole of Sulitjelma gabbro, Norway. Scale bar 0.1 mm.

30

## Χαρακτηριστικά Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων

### Μεταμόρφωση Επαφής

Το μέγεθος και το σχήμα μιας μεταμορφικής άλω καθορίζονται από:

- Τη φύση του πλουτωνίτη
  - μέγεθος
  - θερμοκρασία
  - σχήμα
  - σύσταση
  - προσανατολισμός
- Τη φύση των γειτονικών πετρωμάτων
  - Σύσταση
  - βάθος και μεταμορφικός βαθμός πριν τη διείδυση
  - Διαπερατότητα

31

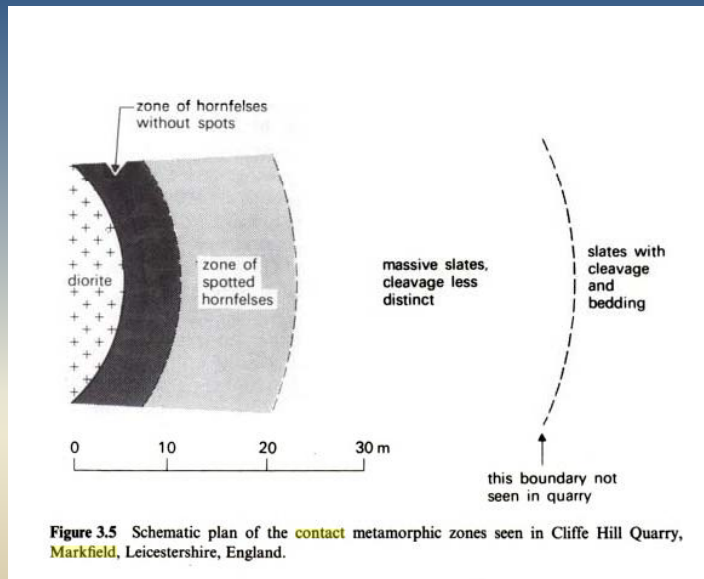
## Χαρακτηριστικά Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων

### Μεταμόρφωση Επαφής

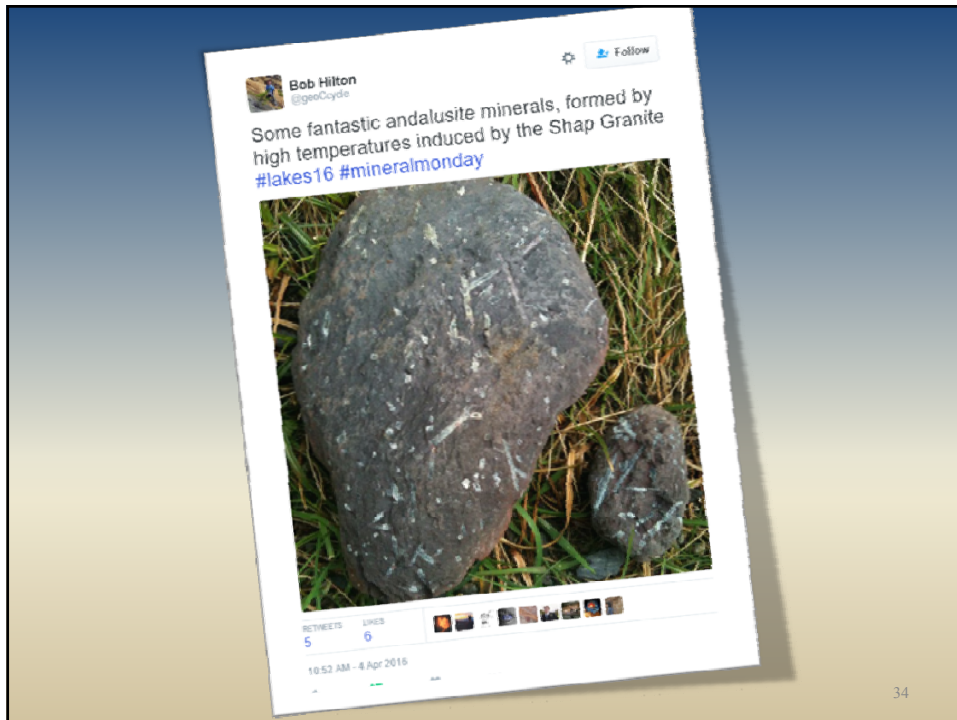
- Γρανιτικές (πιο έντονα φαινόμενα) – γαββρικές (λιγότερο έντονα)
- Σε μεγάλης έκτασης μεταμορφικές άλω → Σειρά προοδευτικής μεταμόρφωσης
- Ιδιαίτερα εντυπωσιακές σε πηλιτικής σύστασης πετρώματα

32





33



34

## Χαρακτηριστικά Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων

### Μεταμόρφωση Επαφής

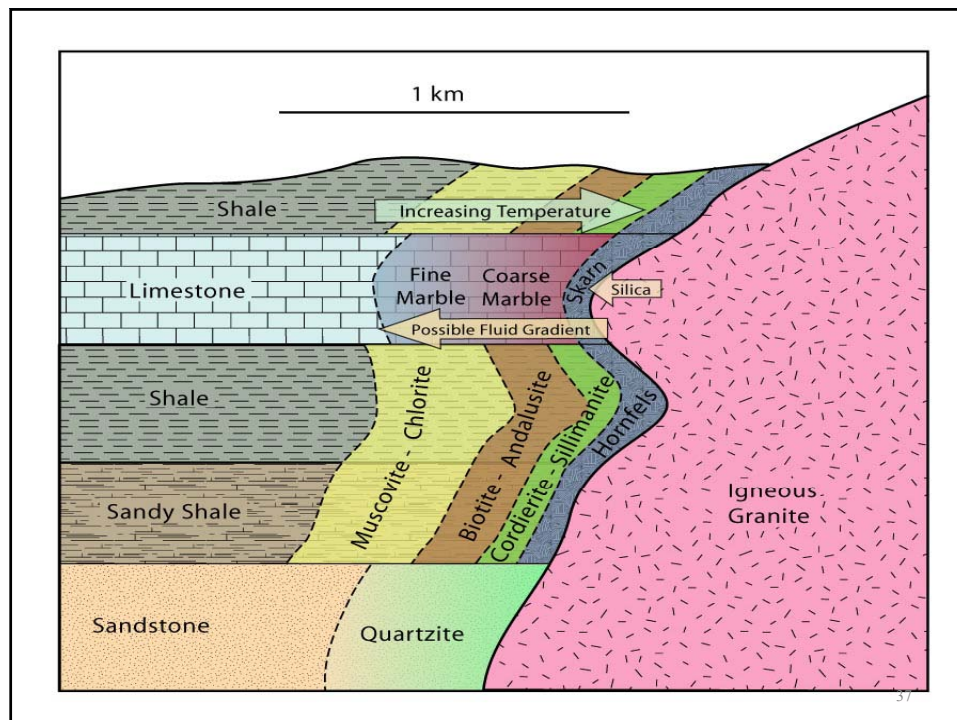
- Μετατροπή σε πιο συμπαγείς τύπους πετρωμάτων
- Σε απόσταση 5-25 m εμφάνιση σκούρων κηλίδων (κηλιδωτοί αργιλικοί σχιστόλιθοι)
- Στα τελευταία 5 m χαρακτηριστικοί **κερατίτες**
- «**Βαθμός μεταμόρφωσης**»

35

## Χαρακτηριστικά Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων

### Μεταμόρφωση Επαφής - Μετασωμάτωση

- Πολλές φορές όχι μόνο ανακρυστάλλωση αλλά και μεταβολή στη χημική σύσταση
- Μείωση πτητικών και μη πτητικών συστατικών ιζηματογενών πετρωμάτων
- Η μεταμόρφωση που συνοδεύεται από αλλαγή στη χημική σύσταση του πετρώματος → **μετασωμάτωση**
- Συνδέεται συνήθως με γρανιτικές διεισδύσεις
- Δημιουργεί γενικά πετρώματα με μικρό αριθμό ορυκτών → **skarn**
- Διαφορές μεταξύ έκτασης μεταμορφικών άλων που δημιουργούνται γύρω από γρανίτες ίδιου μεγέθους <sup>36</sup>



## Χαρακτηριστικά Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων

### Δυναμικής μεταμόρφωσης

- Πιο πολύπλοκες διεργασίες από ότι στα επαφής
- Σε μικρά βάθη: **τεκτονικά λατυποπαγή**
- Σε μεγαλύτερα βάθη: οι κινήσεις των τεμαχών συνοδεύονται από ανακρυστάλλωση
- Η φύση των πετρωμάτων που θα δημιουργηθούν εξαρτάται από την φύση των πετρωμάτων της περιοχής

## Χαρακτηριστικά Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων

### Δυναμικής μεταμόρφωσης

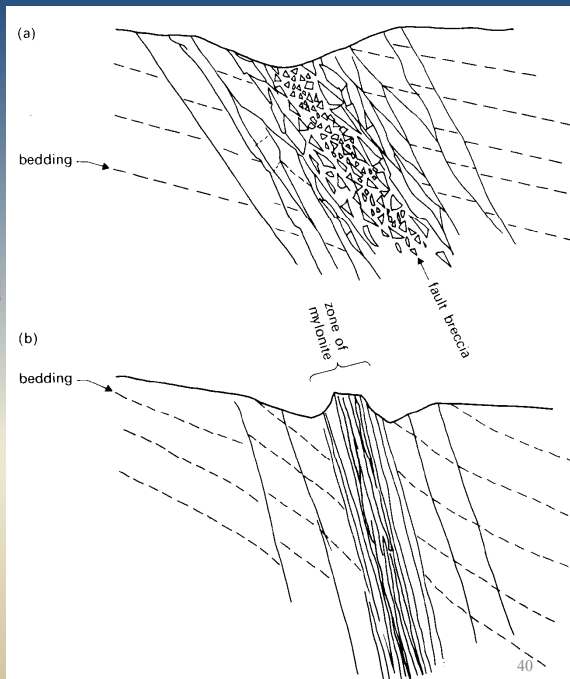
- Συμπαγή και ανθεκτικά πετρώματα (π.χ. χαλαζίτης) → **μυλονίτης** (μικροκρυσταλλικά πετρώματα)
- Άργιλοι, αργιλ. σχιστόλιθοι ή σχιστόλιθοι πλούσιοι σε φυλλόμορφα → **φυλλονίτης**

39

**(a) ρηχή**  
ρηγματογόνος ζώνης  
με δημιουργία  
τεκτονικού  
λατυποπαγούς

**(b) Ελαφρά βαθύτερη**  
ρηγματογόνος ζώνης  
(που αποκαλύφθηκε  
μέσω διάβρωσης) →  
**μυλονίτης**

από: Mason (1978) *Petrology of the Metamorphic Rocks*. George Allen & Unwin, London.



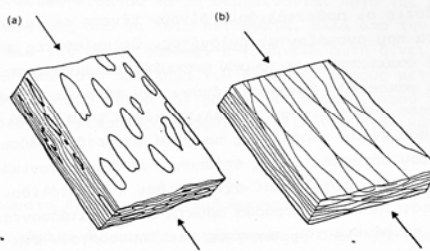
40

# Χαρακτηριστικά Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων

## Δυναμικής μεταμόρφωσης

- Συμπαγή και ανθεκτικά πετρώματα (π.χ. χαλαζίτης) → **μυλονίτης** (μικροκρυσταλλικά πετρώματα)
- Άργιλοι, αργιλ. σχιστόλιθοι ή σχιστόλιθοι πλούσιοι σε φυλλόμορφα → **φυλλονίτης**
- **φολίωση**
- **γράμμωση**

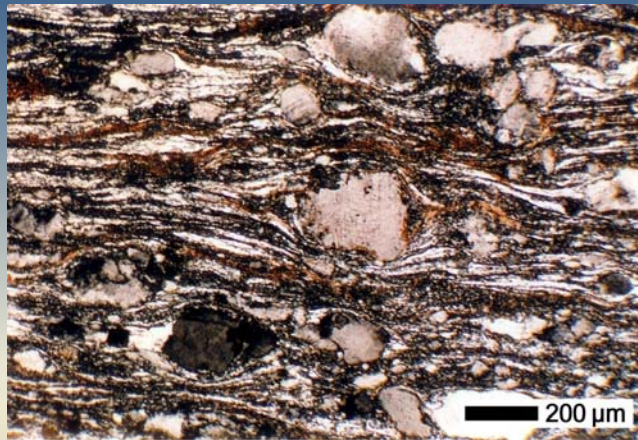
41



Σχ. 3. Σχηματική απεικόνιση δειγμάτων (α) μυλονίτη και (β) φυλλονίτη που παρουσιάζουν φολίωση και γράμμωση. Η γράμμωση στο μυλονίτη προσδιορίζεται από τον προτιμητέο προσανατολισμό των φακοειδών θραυσμάτων του πετρώματος. Η γράμμωση στον φυλλονίτη προσδιορίζεται από τις τομές των υποπαράλληλων επιφανειών σχιστότητας.

(από: Καταγός, 2012)

42



Μυλωνιτοποιημένος γρανίτης Δυτικής Ικαρίας (λεπτή τομή, X nicols. Από: *Ηλιόπουλος, 2006*)

43



Φυλλονίτης (από <http://www.geologyrocks.co.uk/system/files/images/OystMyelonite.jpg>)

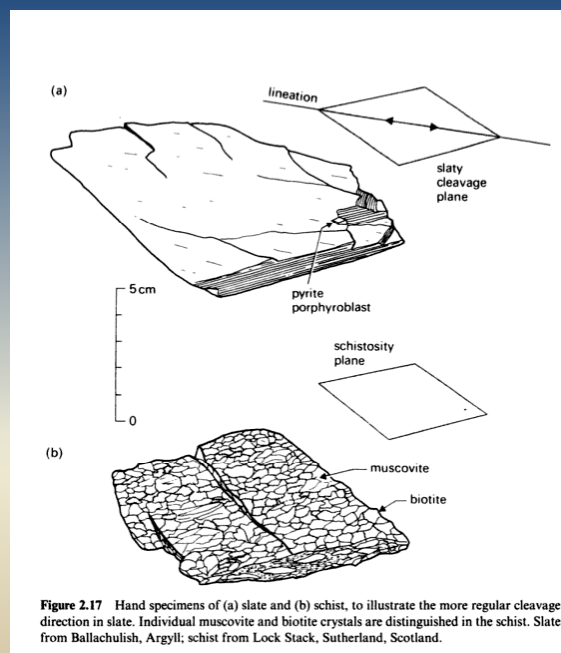
44

## Χαρακτηριστικά Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων

### Καθολικής μεταμόρφωσης

- Οι διεργασίες δεν μπορούν να προσδιορισθούν μόνο από τις υπαίθριες σχέσεις
- Κύριο χαρακτηριστικό: **ο προτιμητέος προσανατολισμός**
- **Φολίωση**: προσανατολισμος // επίπεδο
- **Γράμμωση**: προσανατολισμος // διεύθυνση
- **Σχισμός αργιλικού σχιστόλιθου**
- **Σχιστότητα**
- **Γνευσιακή δομή**

45



**Figure 2.17** Hand specimens of (a) slate and (b) schist, to illustrate the more regular cleavage direction in slate. Individual muscovite and biotite crystals are distinguished in the schist. Slate from Ballachulish, Argyll; schist from Lock Stack, Sutherland, Scotland.

(από: Καταγής, 2012)

46



Αμφιβολιτικός γνεύσιος στη Νήσο Ικαρία  
(Ηλιόπουλος, 2006)

47

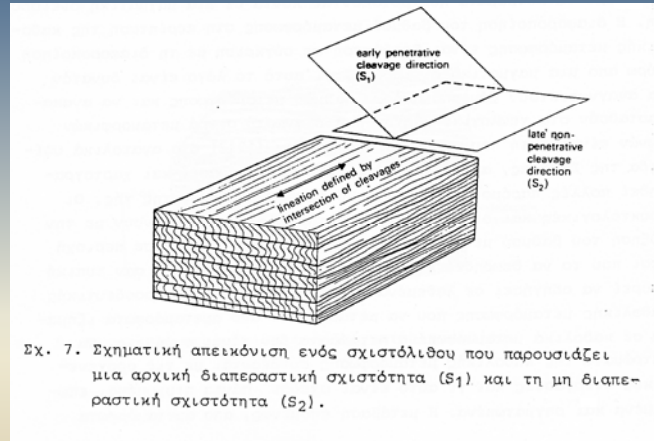
## Χαρακτηριστικά Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων

### Καθολικής μεταμόρφωσης

- Διαπεραστική ή μη διαπεραστική δομή

48





Σχ. 7. Σχηματική απεικόνιση ενός σχιστόλιθου που παρουσιάζει μια αρχική διαπεραστική σχιστότητα ( $S_1$ ) και τη μη διαπεραστική σχιστότητα ( $S_2$ ).

(από: Καταγός, 2012)

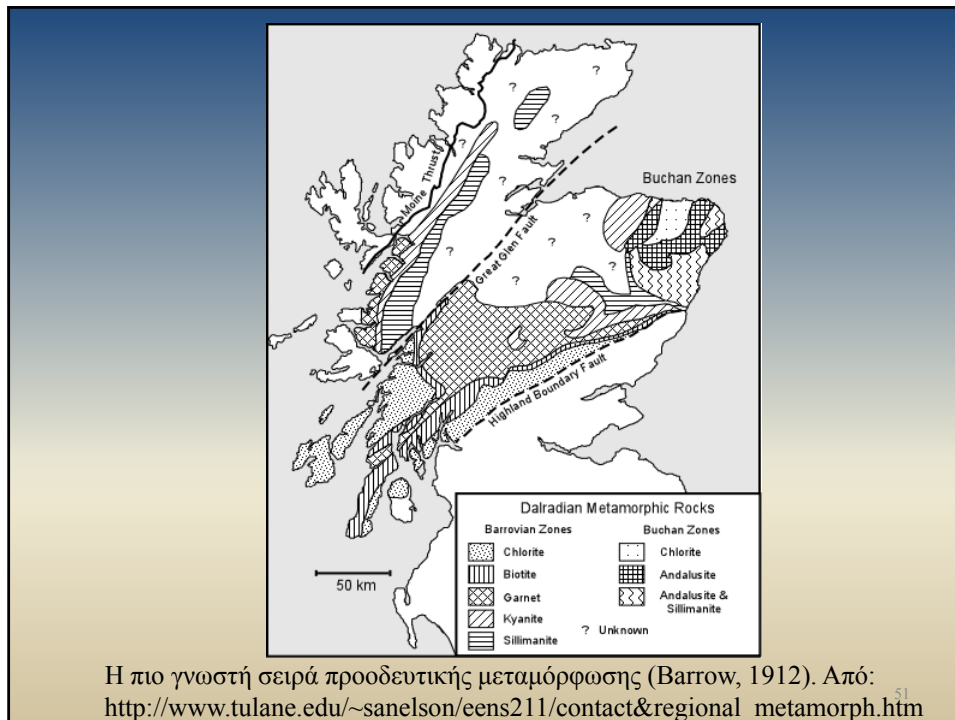
49

## Χαρακτηριστικά Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων

### Καθολικής μεταμόρφωσης

- Διαπεραστική ή μη διαπεραστική δομή
- Διαφοροποίηση ως προς το μέγεθος των ορυκτολογικών συστατικών και των κόκκων
- **Βραδύτερη** ως προς την αντίστοιχη της μεταμόρφωσης επαφής
- **Μεγαλύτερης έκτασης** → αναπαριστώνται εύκολα στο χάρτη (Barrow, 1912)

50



Η πιο γνωστή σειρά προοδευτικής μεταμόρφωσης (Barrow, 1912). Από: [http://www.tulane.edu/~sanelson/eens211/contact&regional\\_metamorph.htm](http://www.tulane.edu/~sanelson/eens211/contact&regional_metamorph.htm)

## Χαρακτηριστικά Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων

### Καθολικής μεταμόρφωσης

- Διαπεραστική ή μη διαπεραστική δομή
- Διαφοροποίηση ως προς το μέγεθος των ορυκτολογικών συστατικών και των κόκκων
- **Βραδύτερη** ως προς την αντίστοιχη της μεταμόρφωσης επαφής
- **Μεγαλύτερης έκτασης** → αναπαριστώνται εύκολα στο χάρτη (Barrow, 1912)
- Κυριότερο κριτήριο βαθμού μεταμόρφωσης η **αύξηση του μεγέθους των κόκκων**
- Σε περιοχές πολύ υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης → γρανιτικές και πηγματιτικές φλέβες

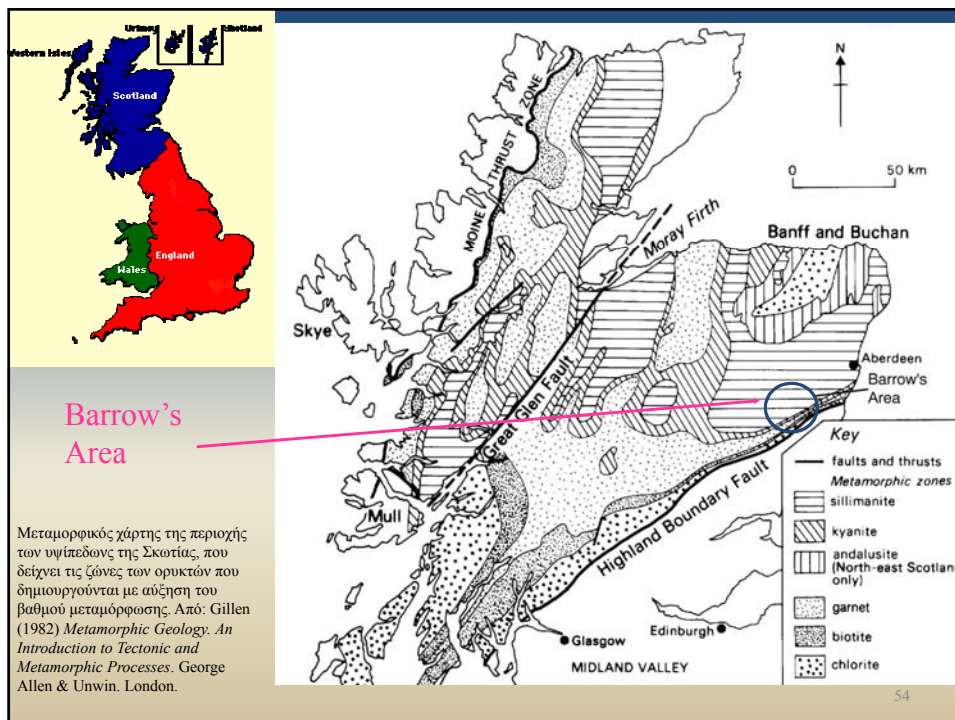
52

## Χαρακτηριστικά Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων

### Καθολικής μεταμόρφωσης

- Αναπαράσταση διαφορών βαθμού μεταμόρφωσης σε χάρτη υπό μορφή ζωνών
- Πλέον αξιόπιστη μέθοδος: καταγραφή ορυκτολογικών μεταβολών σε πετρώματα συγκεκριμένης χημικής σύστασης (π.χ. πηλιτικών)
- Με βάση εμφάνιση ή εξαφάνιση χαρακτηριστικών ορυκτών
- Σχήμα μεταμορφικών ζωνών του Barrow
- Ζώνες χλωρίτη, βιοτίτη, γρανάτη, σταυρόλιθου, κυανίτη, σιλλιμανίτη

53



## Άλλες κατηγορίες μεταμόρφωσης

### Μεταμόρφωση ωκεάνειου πυθμένα

- 0,5-2 km: Επιφανειακή βασαλτική στοιβάδα
- >2 km: απομαγνητισμένη στοιβάδα → μεταμορφωμένα πετρώματα
- Κυρίως βασαλτικής και υπερβασικής σύστασης
- Όμως:  $T$  ωκεάνειου φλοιού σχετικά χαμηλή για να προκαλέσει μεταμορφική ανακρυστάλλωση

55

## Άλλες κατηγορίες μεταμόρφωσης

### Μεταμόρφωση ωκεάνειου πυθμένα

- 0,5-2 km: Επιφανειακή βασαλτική στοιβάδα
- >2 km: απομαγνητισμένη στοιβάδα → μεταμορφωμένα πετρώματα
- Κυρίως βασαλτικής και υπερβασικής σύστασης
- Όμως:  $T$  ωκεάνειου φλοιού σχετικά χαμηλή για να προκαλέσει μεταμορφική ανακρυστάλλωση
- Συμβαίνει κάτω από τα υψώματα των μεσοωκεάνειων ράχων όπου η γεωθερμική βαθμίδα είναι σχετική υψηλή.

56

## Άλλες κατηγορίες μεταμόρφωσης

### Μεταμόρφωση ενταφιασμού (Burial)

- Προτάθηκε από τον Coombs (1961)
- Για να περιγράψει πετρώματα που έχουν υποστεί μερική ή ολική ορυκτολογική και ιστολογική αναδιοργάνωση χωρίς να συνδέονται με μαγματικές διεισδύσεις ή με τεκτονικές διεργασίες
- Μια ορυκτολογική παραγένεση μπορεί να σχηματισθεί σε σημαντικά διαφορετικά βάθη σε διαφορετικές περιοχές → σημαντικότερη η επίδραση της T παρά της P.

57

## Άλλες κατηγορίες μεταμόρφωσης

### Μεταμόρφωση ενταφιασμού (Burial)

- Απαντάται συχνά σε περιοχές παχέων ηφαιστειοκλαστικών σειρών αλλά και σε περιοχές με αργιλικά ιζήματα
- Οι μητρικοί ιστοί συνήθως διατηρούνται γιατί η γένεση των νέων ορυκτών γίνεται κυρίως μέσα στους προϋπάρχοντες κρυστάλλους
- Σε ιδιαίτερα παχιές ιζηματογενείς σειρές μπορεί να παρατηρηθεί και ζώνωση στις παραγενέσεις
- Τυπικές περιοχές: Νότιος Νέα Ζηλανδία, κόλπος της Βεγγάλης, κόλπος του Μεξικού.

58



Από: Woods Hole Oceanographic Institution "OCEANUS"  
 (<http://www.whoi.edu/oceanus/viewImage.do?id=5764&aid=2510>)

59

## Άλλες κατηγορίες μεταμόρφωσης

### Μεταμόρφωση ενταφιασμού (Burial)

- Bengal Fan → πάχος ιζηματων > 22 km
- Extrap. (18-22°C/km) → 250-300°C at the base (P ~ 0.6 GPa)
- Τα παθητικά περιθώρια συχνά μεταπίπτουν σε ενεργά
- Έτσι περιοχές μεταμόρφωσης ενταφιασμού μετατρέπονται σε περιοχές ορογενετικής καθολικής μεταμόρφωσης

60

## Άλλες κατηγορίες μεταμόρφωσης

### Μεταμόρφωση από πρόσκρουση μετεωριτών

- Δημιουργείται από έναν πολύ σύντομο παλμό δυναμικής πίεσης.
- Εμφανίζεται σε περιοχές πρόσκρουσης μετεωριτών, πυρηνικών ή χημικών εκρήξεων, και σε πειράματα για δημιουργία κρατήρων
- P, T, τάσεις, ψύξη επιδεικνύουν διαφορές τάξης μεγέθους σε σχέση με τις ενδογενείς διαδικασίες
- Οι τάσεις που αναπτύσσονται είναι 5 φορές μεγαλύτερες από εκείνες σε ένα ισχυρό σεισμό.

61

## Άλλες κατηγορίες μεταμόρφωσης

### Μεταμόρφωση από πρόσκρουση μετεωριτών

- Διαρκούν όμως μερικά μόνο δευτερόλεπτα
- Δημιουργούν χαρακτηριστικά ορυκτά (στισοβίτης, διαμάντι)
- Αρχικά ορυκτά συμπιέζονται έως και στο μισό του όγκου τους σε πιέσεις  $\sim 100\text{GPa}$
- Αποτελέσματα και διεργασίες: παραμόρφωση, μετατροπή φάσεων, διάλυση, τήξη και εξάχνωση.

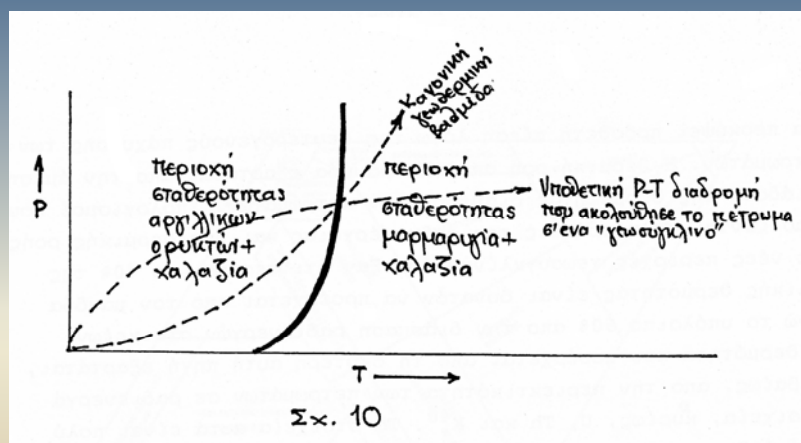
62

## Που γίνεται η μεταμόρφωση;

- Κυρίως σε περιοχές παχιάς ιζηματογένεσης σε ηπειρωτικά περιθώρια.
- Αύξηση **P** λόγω υπερκείμενων και **T** λόγω θερμικής ροής από τον μανδύα (40%) και από τη διάσπαση ραδιενεργών ορυκτών (60%).
- **P** εξαρτώνται από το ρυθμό ιζηματογένεσης και ηφαιστειότητας και τη χρονική διάρκεια της συσσώρευσης.
- Η Θερμική ροή από το μανδύα εξαρτάται από την άμεση διάδοση της **T** μέσω των πετρωμάτων.
- $U$ ,  $Th$  και  $K^{40}$  πιο άφθονα στα φελσικά πετρώματα.

63

## Επίδραση συνθηκών περιβάλλοντος στα ορυκτά ενός πετρώματος



(από: Καταγιάς, 2012)

64



## Παράγοντες Μεταμόρφωσης

- Ένα μεταμορφωμένο πέτρωμα σχηματίζεται από μια σειρά αντιδράσεων μεταξύ των ορυκτών του μητρικού πετρώματος
- Όσο αυξάνεται η  $T$  τόσο θα ελαττώνεται το ποσό του  $CO_2$  και του  $H_2O$  που μπορεί να συμμετέχει στη δομή των νέων ορυκτών
- Κατά τη μεταμόρφωση θα υπάρχει πάντα μια ρευστή φάση που θα αποτελείται από πτητικά συστατικά
- Παρουσία ρευστή φάσης διευκολύνει τον βαθμό κρυστάλλωσης. Αδύνατες μερικές αντιδράσεις χωρίς την παρουσία  $H_2O$

65

## Παράγοντες Μεταμόρφωσης

### Θερμοκρασία

- Όρια  $T$  : 250 – 750 °C
- Γεωθερμική βαθμίδα διαφέρει από περιοχή σε περιοχή του φλοιού αλλά και μεταξύ χρονικών περιόδων

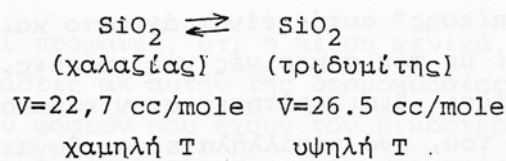
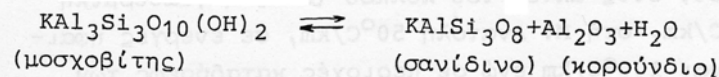
Περιοχή / Γεωλογικό περιβάλλον	Γεωθερμική βαθμίδα
ακτές του κόλπου του Μεξικού	30 °C/km
Μέση Ανατολή	50 °C/km
ενεργές ηφαιστειακές περιοχές	100 °C/km
περιοχές κατάδυσης λιθοσφαιρικών πλακών	10 °C/km
ηπειρωτικές περιοχές	20-25 °C/km

66

## Παράγοντες Μεταμόρφωσης

### Θερμοκρασία

- Βασικός παράγοντας γιατί ρυθμίζει την πορεία των αντιδράσεων
- Αύξηση της T ευνοεί το σκέλος της αντίδρασης με τη μεγαλύτερη εντροπία



- Εξήγηση της προοδευτικής αφυδάτωσης με την αύξηση της T.

67

## Παράγοντες Μεταμόρφωσης

### Πίεση

- Τα διάφορα είδη δυνάμεων που επενεργούν στις επιφάνειες των πετρωμάτων
- Καθολική μεταμόρφωση: 2-8 kbar
- Σημαντικότερη η  $P_L$  (πίεση φορτίου)
- **Γεωβαρομετρική βαθμίδα:** 250-300 bars/km (ανάλογα με την πυκνότητα των υπερκείμενων στρωμάτων)
- Μέση Γ.Β. 285 bars/km → 20 km 5,5-6,0 kbs  
35 km 10 kbs
- Υδροστατικός χαρακτήρας

68

## Παράγοντες Μεταμόρφωσης

### Πίεση

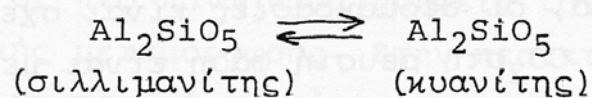
- Στις περισσότερες συνθήκες μεταμόρφωσης τα πτητικά συστατικά  $\rightarrow$  ρευστή αέριο φάση
- $P_f = P_L$
- Αύξηση της  $T \rightarrow H_2O$  και  $CO_2 \rightarrow P_f > P_L$

69

## Παράγοντες Μεταμόρφωσης

### Πίεση

- Αντίθετη η επίδρασή της στις αντιδράσεις από ότι για την  $T$ . Ευνοεί δημιουργία φάσεων με μικρό  $V$ .
- Π.χ. σε μεταπηλιτικά πετρώματα

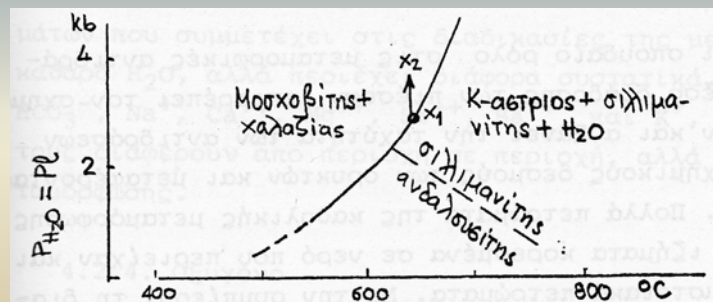
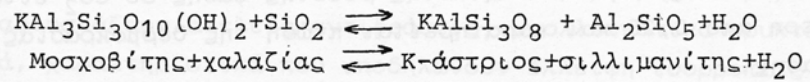


70

## Παράγοντες Μεταμόρφωσης

### Πίεση

- Οι μεταμορφικές αντιδράσεις που εκλύουν  $H_2O$  και  $CO_2$  εξαρτώνται πολύ από την P.



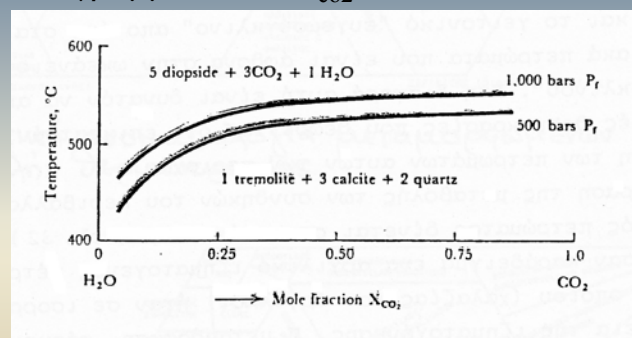
(από: Καταγιάς, 2012)

71

## Παράγοντες Μεταμόρφωσης

### Πίεση

- Εφόσον συνυπάρχουν  $CO_2$  και  $H_2O$  προτιμότερα τα διαγράμματα T - X<sub>CO<sub>2</sub></sub>



(από: Καταγιάς, 2012)

72

## Παράγοντες Μεταμόρφωσης

### Νερό

- Δρα σαν μέσο διάδοσης των πιέσεων
- Επιτρέπει τον σχη/σμό των ένυδρων ορυκτών
- Αυξάνει την ταχύτητα των αντιδράσεων (καταστρέφοντας τους χημικούς δεσμούς των ορυκτών και μεταφέροντας τα χημικά συστατικά)
- Καθολική μεταμόρφωση: Τα ιζήματα παραμένουν κορεσμένα καθόλη τη διάρκεια της μεταμόρφωσης, ενώ τα ηφαιστειακά πετρώματα μπορεί να κορεστούν μόνο στους υψηλότερους βαθμούς
- Μεταμόρφωση επαφής: αρχικά όλα ήδη ακόρεστα
- $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Sr}^{++}$ ,  $\text{Ba}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ <sup>73</sup>

## Παράγοντες Μεταμόρφωσης

### Οξυγόνο

- Δεν θεωρείται ως κύρια φάση όμως ο ρόλος του στο σχη/σμό των διαφόρων ορυκτών είναι μεγάλος.
- Υψηλή  $P_{\text{O}_2}$  :  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$
- $\text{Fe}^{3+}$  αδυνατεί να μπει στα περισσότερα Fe-Mg πυριτικά ορυκτά (βιοτίτης, αλμανδίνης, κορδιερίτης)
- Μπορεί να φιλοξενηθεί μόνο σε λίγα ορυκτά:  $\text{Fe}^{2+}\text{O} \cdot \text{Fe}_2^{3+}\text{O}_3$ ,  $\text{Ca}_2(\text{Fe}^{3+}\text{Al})_2\text{OSiO}_4\text{Si}_2\text{O}_7\text{OH}$ ,  $\text{Ca}_3\text{Fe}_2^{3+}\text{Si}_3\text{O}_{12}$ .
- Τα ορυκτά υποχρεώνονται να γίνουν πλουσιότερα σε Mg

74