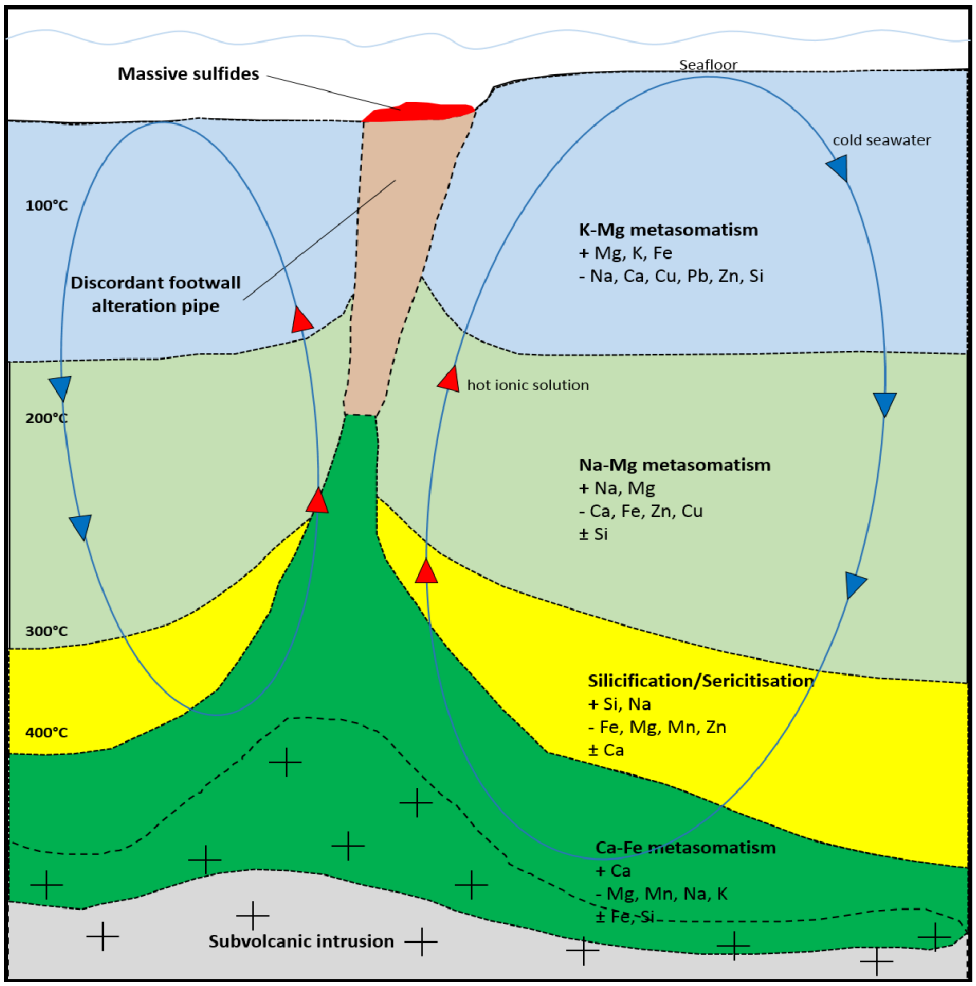
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
ωλογίας
.Θ

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ-ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ-ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

ΣΕΛΙΑ ΓΕΩΡΓΙΑ ΚΑΤΣΙΚΗ

# ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΣΤΟΝ ΩΚΕΑΝΙΟ ΦΛΟΙΟ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ




ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2021

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



ΣΕΛΙΑ ΓΕΩΡΓΙΑ ΚΑΤΣΙΚΗ
Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5545

# ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΣΤΟΝ ΩΚΕΑΝΙΟ ΦΛΟΙΟ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας,
Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας

**Επιβλέπουσα**

ΛΑΜΠΡΙΝΗ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"

© Σέλια Γεωργία Κατσίκη, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας – Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας, 2021
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΣΤΟΝ ΩΚΕΑΝΙΟ ΦΛΟΙΟ – *Διπλωματική Εργασία*

© Selia Georgia Katsiki, School of Geology, Dept. of Mineralogy – Petrology – Economic Geology, 2021
All rights reserved.
METASOMATIC PROCESSES WITHIN THE OCEANIC CRUST – *Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

*Εικόνα Εξωφύλλου: https://www.semanticscholar.org/paper/The-effect-of-hydrothermal-alteration-on-the-of-Burdett/b5f28897e877a5927b50abd1b4d7a376757ab058/figure/34*

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



**Περιεχόμενα**

Κατάλογος εικόνων ..... VII

Κατάλογος σχημάτων ..... VIII

Περίληψη- Abstract ..... 9

Πρόλογος ..... 10

1. Εισαγωγή ..... 11

1.1 Γενικά ..... 11

1.2 Σχέση μετασωμάτωσης – μεταμόρφωσης ..... 12

1.3 Είδη μετασωμάτωσης ..... 13

1.4 Ταξινόμηση μετασωματικών σχηματισμών ..... 14

1.5 Υδροθερμικά διαλύματα και υδροθερμικός κύκλος ..... 16

1.5.1 Υδροθερμικά διαλύματα ..... 16

1.5.2 Υδροθερμικός κύκλος ..... 18

2. Διαδικασίες μετασωμάτωσης στον ωκεάνιο φλοιό ..... 20

2.1 Ωκεάνιος φλοιός ..... 20

2.1.1 Δημιουργία ωκεάνιου φλοιού ..... 20

2.1.2 Δομή ωκεάνιου φλοιού ..... 21

2.1.3 Ρυθμός διάνοιξης των μεσοωκεάνιων ράχεων και μοντέλα ..... 21

2.1.4 Τύποι μετασωμάτωσης στον ωκεάνιο φλοιό ..... 23

2.2 Διηθητική μετασωμάτωση ..... 25

2.2.1 Επιδοτιτοποίηση (Epidotization) ..... 25

2.2.2 Χλωριτίωση, σερικιτίωση και πυριτίωση ..... 27

2.3 Διαχυτική μετασωμάτωση ..... 28

2.3.1 Ροδινγκιτίωση ..... 28

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.



2.3.2 Στεατίωση (Steatization) – Si μετασωμάτωση ..... 31

2.4 $CO_2$ μετασωμάτωση ..... 32

3. Κοιτάσματα μετασωμάτωσης στον ελληνικό χώρο ..... 35

3.1 Μετασωματικά κοιτάσματα στην περιοχή του Λαυρίου ..... 35

3.2 Μετασωματικά κοιτάσματα στην περιοχή της Κασσάνδρας ..... 37

3.3 Μετασωματικά κοιτάσματα στην περιοχή του Τρίκορφου ..... 39

4. Συμπεράσματα ..... 42

Βιβλιογραφία ..... 44

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ**

Εικόνα 1. Black smoker σε βάθος 2.980 μ., Μέσο-Ατλαντική ράχη (https://www.researchgate.net/figure/Black-smoker-hydrothermal-vent-at-2-980m-depth-Mid-Atlantic-Ridge_fig16_284419320) ..... 17

Εικόνα 2. White smoker (MARUM – Center for Marine Environmental Sciences, University of Bremen) ..... 17

Εικόνα 3. Επιδοτίτης (https://www.alexstrekeisen.it/english/meta/epidosite.php) ..... 25

Εικόνα 4. Ροδινγκίτης (Andoni Alvarez, Smithsonian Institution, https://www.si. edu/object/ nmnheducation_10024673) ..... 29

Εικόνα 5. Φλέβα ροδινγκίτη σε επαφή με σερπεντινίτη (Gómez-Pugnaire et al., 2019) ..... 30

Εικόνα 6. Λιστβενίτης (https://gr.depositphotos.com/stock-photos/listwaenite.html) ..... 34

Εικόνα 7. Δείγματα από κρυστάλλους στην περιοχή του Τρίκορφου (Voudouris et al., 2019) (a–d) Μπλε, πράσινος και πορτοκαλί κυανίτης μέσα σε μεταπηλίτες και χαλαζιακές φλέβες; (e,f) Mn-πλούσιος ανδαλουσίτης; (g–i) Ροζ-κόκκινος ζοϊσίτης/κλινοζοϊσίτης ..... 40

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.



**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

Σχήμα 1. Υδροθερμικός κύκλος (Andrea Koschinsky, Jacobs University, Bremen, Germany, https://www.researchgate.net/figure/Components-of-a-hydrothermal-circulation-cell-and-mineral-deposits-formed-model-produced_fig2_264310412) ..... 19

Σχήμα 2. Δημιουργία ωκεάνιου φλοιού (https://jeremyvosplatetectonicstimeline .weebly.com/sea-floor-spreading.htm) ..... 20

Σχήμα 3. Layer-cake model ωκεάνιου φλοιού («Penrose-type»), το οποίο προτάθηκε στις αρχές του 1970, βασισμένο σε οφιολιθικές έρευνες και θαλάσσια γεωφυσικά δεδομένα (Vine and Moores 1972, fig. 1) ..... 22

Σχήμα 4. Σχηματική απεικόνιση μεσοωκεάνιων ράχεων γρήγορου και αργού ρυθμού διάνοιξης και περιγραφή των κύριων χαρακτηριστικών τους (Bach & Früh-Green, 2010) ..... 23

Σχήμα 5. Ζώνες σχηματισμού επιδοτιτών (Gilgen et al., 2016) ..... 26

Σχήμα 6. Ζώνες δράσης της χλωριτίωσης, σερικιτίωσης και πυριτίωσης (Bach et al., 2013) ..... 28

Σχήμα 7. Μοντέλο ροδινγκιτίωσης (Gussone et al., 2020) ..... 31

Σχήμα 8. Μεταλλευτική περιοχή Λαυρίου
a) Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της περιοχής του Λαυρίου (τροποποιημένος από Marinos and Petraschek 1956; Gelaude and Van Kalmthout 1996; b) απλοποιημένος τεκτονικός χάρτης της περιοχής του Λαυρίου (τροποποιημένος από Papastavrou et al. 1987); c) τομή A–A' του κοιτάσματος της Καμάριζας (τροποποιημένος από Marinos and Petraschek 1956) ..... 36

Σχήμα 9. Γεωλογικός χώρος των Καινοζωικών μαγματικών πετρωμάτων και συναφή πορφυριτικά κοιτάσματα στην ενότητα του Βερτίσκου (Stergiou et al., 2021) ..... 38

Σχήμα 10. Μεταλλευτικά κέντρα στην περιοχή της Κασσάνδρας (https://www.eldoradogold.com/news-and-media/news-releases/press-release-details/2012/Eldorado-Gold-Corporation-Exploration-Update/default.aspx) ..... 39

Σχήμα 11. Γεωλογικός χάρτης Θάσου (Tarantola et al., 2019) ..... 41

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.



**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα εργασία εξετάζει τις διαδικασίες μετασωμάτωσης στον ωκεάνιο φλοιό. Ο ωκεάνιος φλοιός υφίσταται εκτενείς χημικές τροποποιήσεις όταν αλληλοεπιδράει με το θαλασσινό νερό, οι οποίες παίζουν καθοριστικό ρόλο στη ρύθμιση της χημικής και ισοτοπικής σύστασης των ωκεανών και των πετρωμάτων τους. Οι αλλαγές αυτές είναι αποτέλεσμα της μετασωμάτωσης, μίας διαδικασίας που έχει την ικανότητα να αλλάζει την χημική και την ορυκτολογική σύσταση των πετρωμάτων. Για να γίνει κατανοητή η δράση της μετασωμάτωσης, είναι αναγκαίο να επεξηγηθούν οι αιτίες που την προκαλούν και τα κριτήρια που απαιτούνται για να ολοκληρωθεί η διαδικασία. Φαίνεται, λοιπόν, πόσο σημαντική είναι η λειτουργία των διαλυμάτων που προκαλούν τις μετασωματικές διαδικασίες, γνωστά και ως υδροθερμικά διαλύματα, καθώς επίσης και η διηθητική ή διαχυτική μεταφορά της ύλης, ο χώρος του ωκεάνιου φλοιού που επιδρούν και τα χημικά τους συστατικά. Έτσι, η μετασωμάτωση πέρα από μία διαδικασία ρύθμισης της χημικής σύστασης των ωκεανών και του ωκεάνιου φλοιού, θεωρείται ένας από τους βασικούς παράγοντες σχηματισμού κοιτασμάτων πολύτιμων μετάλλων, τόσο παγκοσμίως, όσο και στον ελληνικό χώρο. Καταλήγοντας, η παρούσα βιβλιογραφική έρευνα παρουσιάζει την πιθανή μελλοντική συμβολή των διαλυμάτων αυτών στην πρόκληση γεωδυναμικών γεγονότων, ενώ όσον αφορά τα μετασωματικά πετρώματα, η παρουσία τους είναι ένδειξη ύπαρξης πολύτιμων κοιτασμάτων.

*Λέξεις-κλειδιά:* μετασωμάτωση, υδροθερμικά διαλύματα, ωκεάνιος φλοιός, διάχυση, διήθηση, κοιτάσματα, πολύτιμα μέταλλα

**ABSTRACT**

The present study examines the metasomatic processes within the oceanic crust. The oceanic crust undergoes extensive chemical changes when it reacts with seawater, which play a decisive role in setting the chemical and isotopic composition of the oceans and their rocks. These changes are the result of metasomatism, a process that has the ability to alter the chemical and mineralogical composition of rocks. In order to understand the effect of metasomatism, it is necessary to explain the reasons that cause this process and the criteria that are required to complete it. Consequently, the function of fluids that cause all these metasomatic processes, also known as hydrothermal fluids, is very important. Additionally, of high importance are diffusional or infiltrational mass-transfer, the area of the oceanic crust that is affected and their chemical components. Thus, metasomatism beyond being a process that controls the chemical composition of oceans and oceanic crust, it is also considered one of the main factors for the formation of precious-metal ore deposits, both globally, and in the Greek area as well. To summarize, the present bibliographic survey presents the possible future contribution of these fluids to the rise of geodynamic events. As for metasomatic rocks, their presence is an indicator for the existence of precious ore deposits.

*Key-words:* metasomatism, hydrothermal fluids, oceanic crust, infiltration, diffusion, ore deposits, precious metals

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



**ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Η μετασωμάτωση, η διαδικασία κατά την οποία τα πετρώματα αλλάζουν σύσταση ενώ παραμένουν σε στερεή κατάσταση, αν και πολύ σπουδαία για την εξέλιξη πολλών πετρωμάτων και για τη γένεση κοιτασμάτων, παραμένει ανεπαρκώς αντιληπτή. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η αναλυτική περιγραφή των μηχανισμών της μετασωμάτωσης σε γενικότερο πλαίσιο, αλλά και η επεξήγηση των μετασωματικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στον ωκεάνιο φλοιό, που είναι και η βασική θεματική αυτής της εργασίας.

Η παρούσα εργασία είναι το αποτέλεσμα βιβλιογραφικής έρευνας και ξεκινάει με το 1$^{ο}$ κεφάλαιο, όπου αναφέρονται τα γενικά χαρακτηριστικά της μετασωμάτωσης. Στο 2$^{ο}$ κεφάλαιο γίνεται εκτενής ανάλυση των διαδικασιών μετασωμάτωσης στον ωκεάνιο φλοιό, στο 3$^{ο}$ κεφάλαιο περιγράφονται τα πιο σπουδαία μετασωματικά κοιτάσματα του ελληνικού χώρου και τέλος στο 4$^{ο}$ κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της πτυχιακής εργασίας.

Σ’ αυτό το σημείο, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην επιβλέπουσα καθηγήτρια κα. Λαμπρινή Παπαδοπούλου για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την πολύτιμη βοήθεια για την περάτωσή της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την αδερφή μου, Αλίνα, για την βοήθειά της ώστε να δομηθεί σωστά η πτυχιακή εργασία, και τη φίλη μου Αλέξια, για την στήριξή της.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Γενικά

Ο όρος «μετασωμάτωση» εισήχθη πρώτη φορά από τον C.F. Naumann στο σύγγραμμά του Lehrbuch der Mineralogie, το οποίο και εκδόθηκε το 1826. Η ετυμολογία του όρου προέρχεται από τις αρχαίες ελληνικές λέξεις «μετά» (= αλλαγή) και «σῶμα». Το 1925, ο Lindgren περιγράφει τη μετασωμάτωση «ως μια μοριακή διαδικασία ταυτόχρονης διάλυσης και εναπόθεσης, κατά την οποία υπό την παρουσία ρευστής φάσης ένα ορυκτό μετατρέπεται σε ένα άλλο διαφορετικής χημικής σύστασης». Σύμφωνα με τους harlo& Spera (2015), «η μετασωμάτωση αναφέρεται στη διαδικασία κατά την οποία ένα προϋπάρχον πυριγενές, ιζηματογενές ή μεταμορφωμένο πέτρωμα υποβάλλεται σε συστατικές και ορυκτολογικές τροποποιήσεις, οι οποίες έχουν σχέση με χημικές αντιδράσεις που προκαλούνται από την αντίδραση διαλυμάτων (επονομαζόμενα μετασωματικοί παράγοντες), τα οποία εισβάλλουν στον πρωτόλιθο». Πλέον, ο τρέχων και πιο αποδεκτός ορισμός για τη μετασωμάτωση - που δόθηκε από την International Union of Geological Sciences (IUGM) Subcommision on the Systematics of Metamorphic Rocks (SCMR) - την χαρακτηρίζει ως «μια μεταμορφική διαδικασία κατά την οποία η χημική σύσταση ενός πετρώματος ή μέρος αυτού αλλοιώνεται με διαβρωτικό τρόπο και η οποία περιλαμβάνει την εισαγωγή και/ή απομάκρυνση χημικών συστατικών, ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του πετρώματος με υδατικά ρευστά (διαλύματα). Κατά την διαδικασία της μετασωμάτωσης, το πέτρωμα παραμένει σε στερεή κατάσταση».

Η μετασωμάτωση θεωρείται μία πολύ σημαντική γεωλογική διεργασία, η οποία μελετήθηκε από πολλούς ερευνητές στο διάστημα αρκετών χρόνων (π.χ. Lindgren, Putnis, Alt, Zharikov, Korzhinskii, Harlov, Austrheim). Σε συνδυασμό με τεκτονικές και πυριγενείς διαδικασίες, οι διαδικασίες της μετασωμάτωσης έχουν παίξει κυρίαρχο ρόλο στο σχηματισμό τόσο του ηπειρωτικού και του ωκεάνιου φλοιού, όσο και του άνω μανδύα και στη συνεχόμενη εξέλιξή τους (Harlov & Austrheim, 2013). Πέρα από την ισχυρή επίδραση που έχει στη λιθόσφαιρα της Γης, η μετασωμάτωση είναι ένας από τους κύριους παράγοντες δημιουργίας μερικών από τα σημαντικότερα κοιτάσματα πολύτιμων μετάλλων παγκοσμίως (π.χ. Απλίκι (Κύπρος), Tem Piute (Nevada), Hokkaido (Ιαπωνία), Concepcion del Oro (Μεξικό)). Ωστόσο, για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η λειτουργία της μετασωμάτωσης, θα πρέπει να αναλυθούν οι βασικές κινητήριες δυνάμεις που προκαλούν τις χημικές και ορυκτολογικές αλλαγές στα πετρώματα.

Σύμφωνα με τον Zharikov et al. (1998), ο διαχωρισμός της μετασωμάτωσης από τις υπόλοιπες ενδογενείς διεργασίες της Γης, γίνεται με βάση ορισμένα χαρακτηριστικά, όπως:

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



i. την ιοντική αντικατάσταση των ορυκτών
ii. την διατήρηση του πετρώματος σε στερεή κατάσταση
iii. τις ουσιώδεις αλλαγές στη χημική σύσταση με την προσθήκη ή αφαίρεση σημαντικών συστατικών, πέραν του $H_2O$ και του $CO_2$
iv. τον σχηματισμό περιοχών ζώνωσης, οι οποίες αντιπροσωπεύουν την ισορροπία μεταξύ δύο λιθολογιών ή μεταξύ ενός πετρώματος και του διηθημένου διαλύματος

Η μετασωμάτωση προκύπτει όταν ένα ρευστό διάλυμα μεταναστεύει σε μία περιοχή, όπου θα βρεθεί εκτός ισορροπίας με τον νέο του ξενιστή (Yardley, 2013). Δύο είναι τα κύρια χαρακτηριστικά που απαιτούνται για να πραγματοποιηθεί η μετασωμάτωση: α) η μεταφορά ύλης, με τη βοήθεια ενός διαλύματος και β) η μεταγενέστερη ορυκτολογική επανεξισορρόπηση (Harlov & Austrheim, 2013). Θεωρητικά, όλα τα διαλύματα είναι ικανά να προκαλέσουν μετασωμάτωση όταν μεταναστεύουν από ένα είδος πετρώματος σε ένα άλλο, υπό τις κατάλληλες συνθήκες (Yardley, 2013). Η ροή ενός ρευστού διαλύματος εξαρτάται κατά πολύ μεγάλο βαθμό από την διαθεσιμότητα των ελεύθερων διόδων (Putnis & Austrheim, 2010), εννοώντας την ικανότητα τους να κινούνται κατά μήκος ρωγμών, πόρων, σχισμών, ρηγμάτων, ζωνών διάτμησης, ή λιθολογιών που είναι πιο διαπερατές από άλλες γύρω τους (Ran et al., 2019; Yardley, 2013).

### 1.2 Σχέση μετασωμάτωσης-μεταμόρφωσης

Ο όρος «μεταμόρφωση» προέρχεται από τις αρχαίες ελληνικές λέξεις *μετά* (=αλλαγή) και *μορφή* και ορίζεται από την IUGS SSMR ως «μία διαδικασία που περιλαμβάνει αλλαγές στην ορυκτολογική σύσταση και/ή στις μικροδομές ενός πετρώματος, κατά βάση σε στερεή κατάσταση. Η διαδικασία αυτή οφείλεται στην προσαρμογή του πετρώματος σε φυσικές συνθήκες οι οποίες διαφέρουν από τις αρχικές συνθήκες κατά τις οποίες σχηματίστηκε το πέτρωμα και οι οποίες επίσης διαφέρουν από τις φυσικές συνθήκες που συνήθως επικρατούν στην επιφάνεια της Γης και στις ζώνες διαγένεσης. Η μεταμόρφωση μπορεί να συνυπάρχει με μερική τήξη και μπορεί επίσης να προκαλεί αλλαγές στη χημική σύσταση του πετρώματος».

Είναι φανερό πως υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της μεταμόρφωσης και της μετασωμάτωσης, αφού θεωρητικά η μετασωμάτωση ορίζεται ως μία μεταμορφική διεργασία που πάντοτε καταλήγει να προκαλεί αλλαγές στη χημική σύσταση του πετρώματος (Putnis & Austrheim, 2010), δηλαδή αποτελεί μία μορφή αλλοχημικής μεταμόρφωσης. Ωστόσο, από τη στιγμή που καμία αντίδραση δεν συντελείται χωρίς την προϋπόθεση μεταφοράς ύλης, το βασικό ερώτημα που προκύπτει είναι αν οι δύο αυτές διαδικασίες χρησιμοποιούν εντελώς διαφορετικούς μηχανισμούς αντίδρασης, δηλαδή αν

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



η μεταμόρφωση προκαλείται χωρίς την παρουσία ρευστής φάσης, σε αντίθεση με τη μετασωμάτωση, όπου η παρουσία διαλύματος είναι απαραίτητη. Σύμφωνα με τους Putnis & Austrheim (2010), δεν παρατηρείται κάποια βασική διαφορά στους μηχανισμούς αντίδρασης των δύο διαδικασιών και συμπληρώνεται πως και οι δύο διαδικασίες λαμβάνουν χώρα κάτω από μία σειρά αντιδράσεων διάλυσης-μεταφοράς-απόθεσης, οι οποίες στην περίπτωση της μετασωμάτωσης προκαλούν σημαντικές αλλαγές στη χημική σύσταση του πετρώματος. Και η μετασωμάτωση και η μεταμόρφωση συνεπάγονται την επανεξισορρόπηση των ορυκτολογικών συγκεντρώσεων μέσω της μεταφοράς ύλης, αλλά σε διαφορετική κλίμακα, δηλαδή κάθε μεταμορφική αντίδραση μπορεί να θεωρηθεί μετασωματική σε μικρότερη κλίμακα (Putnis & Austrheim, 2010).

Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι δύο διαδικασίες λαμβάνουν χώρα εντελώς ανεξάρτητα η μία από την άλλη. Για παράδειγμα, οι αποθέσεις μεταλλευμάτων, η αλλοίωση του ωκεάνιου πυθμένα, η αλλοίωση γειτονικών πετρωμάτων από θερμές πηγές ή από μετεωρικά διαλύματα, είναι αποκλειστικά μετασωματικές διαδικασίες που ελέγχονται από διαλύματα και δε θεωρούνται μεταμορφικές (Harlov & Austrheim, 2013). Οι περιπτώσεις σχηματισμού πετρωμάτων, όπου ανταλλάσσονται μόνο νερό και διοξείδιο του άνθρακα, δε κατατάσσονται σε μορφές μετασωμάτωσης, αλλά σε μορφές μεταμόρφωσης, ενώ αν εκτός από το $H_2O$ και το $CO_2$, υπάρχει η είσοδος ή η απομάκρυνση και άλλων συστατικών, τότε αυτές οι διαδικασίες θεωρούνται μετασωματικές (Zharikov et al., 1998). Με αυτόν τον τρόπο διαχωρίζονται οι δύο αυτές διαδικασίες και αυτά είναι τα γενικά αποδεκτά όρια μεταξύ της μετασωμάτωσης και της μεταμόρφωσης.

### 1.3 Είδη μετασωμάτωσης

Σύμφωνα με τον Korzhinskii (1968) υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι μεταφοράς της ύλης. Ο πρώτος τρόπος πραγματοποιείται μέσω της διάχυσης, κατά την οποία τα συστατικά ενός υλικού (ορυκτό, γυαλί, διάλυμα) κινούνται μέσω ενός στάσιμου διαλύματος στους πόρους, με κινητήρια δύναμη τη χημική δραστηριότητα που αναπτύσσεται μεταξύ του διαλύματος του πετρώματος και αυτού των πόρων (διαχυτική μετασωμάτωση). Ο δεύτερος τρόπος μεταφοράς της ύλης συμβαίνει μέσω της διήθησης. Τα συστατικά του διαλύματος μεταφέρονται μέσω ενός ρευστού από μία εξωτερική πηγή το οποίο προσθέτει και αφαιρεί ύλη, υπό την άσκηση πίεσης (διηθητική μετασωμάτωση). Βέβαια, η μετασωμάτωση μπορεί να προκληθεί μέσω της διάχυσης, μέσω της διήθησης, ή με συνδυασμό των δύο αυτών τρόπων (Korzhinskii, 1968). Αναλυτικότερη αναφορά των δυο βασικών αυτών ειδών μετασωμάτωσης θα γίνει στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



Αναφέρονται και κάποιοι ακόμη τύποι μετασωμάτωσης, οι οποίοι διαχωρίζονται με βάση την γεωλογική τους θέση (Zharikov et al., 1998):

- Η αυτομετασωμάτωση είναι ένα είδος μετασωμάτωσης που λαμβάνει χώρα στην κορυφή μαγματικών σωμάτων κατά την αρχή του μεταμαγματικού σταδίου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η αλβιτίωση γρανιτικών πλουτωνιτών και η σερπεντινίωση υπερβασικών πετρωμάτων.
- Η μετασωμάτωση ορίου (boundary metasomatism) είναι ένας τύπος μετασωμάτωσης που προκαλείται στο σημείο επαφής δύο ξεχωριστών πετρωμάτων.
- Η μετασωμάτωση επαφής εμφανίζεται στην επαφή ενός μαγματικού σώματος με ένα άλλο πέτρωμα.
- Η διμετασωμάτωση (bimetasomatism) είναι μία παραλλαγή της μετασωμάτωσης επαφής, η οποία προκαλεί αντικατάσταση και των δύο πετρωμάτων που έρχονται σε επαφή, εξαιτίας αμφίδρομης διήθησης διαφορετικών συστατικών κατά μήκος της επαφής.
- Η παραφλεβική (near-vein) μετασωμάτωση είναι ένα είδος διηθητικής μετασωμάτωσης, η οποία σχηματίζει συμμετρική μετασωματική ζώνωση σε κάθε πλευρά μιας διαχυτικής μετασωματικής φλέβας.
- Η περιοχική μετασωμάτωση καταλαμβάνει σημαντικές εκτάσεις. Συνήθως, σχηματίζει αλκαλικά μετασωματικά πετρώματα κατά το μαγματικό και το μεταμαγματικό στάδιο.

### 1.4 Ταξινόμηση μετασωματικών σχηματισμών

Όπως και για τους πυριγενείς σχηματισμούς, έτσι και για τους μετασωματικούς έγινε μία προσπάθεια ταξινόμησής τους. Ωστόσο, προκύπτουν δυσκολίες λόγω του ότι η σύσταση ενός μετασωματικού πετρώματος δεν εξαρτάται μόνο από τις συνθήκες θερμοκρασίας-πίεσης και από τη νέα σύσταση του πετρώματος, αλλά και από το είδος και το στάδιο της μετασωματικής διαδικασίας καθώς επίσης και από τη σύσταση του διαλύματος (Zharikov et al., 1998).

Με γνώμονα την γενετική αντίληψη, ο Zharikov et al. (1998) χώρισε τους σχηματισμούς σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Ζώνη μετασωμάτωσης: Ένα μετασωματικό πέτρωμα καθορισμένο από μία συγκεκριμένη ορυκτολογική παραγένεση.
- Φάση μετασωμάτωσης: Το σύνολο ορισμένων ζωνών μετασωμάτωσης που αναπτύχθηκαν υπό παρόμοιες φυσικοχημικές συνθήκες.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



- Οικογένεια μετασωμάτωσης: Το σύνολο σχετικών φάσεων μετασωμάτωσης τυπικών μίας ορισμένης πετρογενετικής διαδικασίας. Οι φάσεις διαφέρουν μεταξύ τους, ανάλογα με το αν εμφανίζονται ή εξαφανίζονται ορυκτολογικές παραγενέσεις ή ανάλογα με το αν διαφέρει κάποια φυσικοχημική παράμετρος των μετασωματικών ζωνών.

Θα αναφερθούν εν συντομία οι μετασωματικές οικογένειες, ωστόσο, δεν θα γίνει εκτεταμένη ανάλυση της κάθε μετασωματικής οικογένειας, διότι δεν είναι ο σκοπός αυτής της εργασίας (για περισσότερα, βλ. Zharikov et al., 1998). Οι μετασωματικές οικογένειες χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

i. Φενίτης: Είναι μετασωματικά πετρώματα συηνιτικού χημισμού, πλούσια σε όξινα πλαγιόκλαστα με νατριούχους πυρόξενους και ενίοτε αμφίβολους, νεφελίνη ή απατίτη (Yardley, 2013)
ii. Skarn: Είναι αδρόκοκκα μετασωματικά πετρώματα, όπου επικρατούν πλούσια σε Ca ορυκτά (Yardley, 2013) και σχηματίζονται στην επαφή ενός πυριτικού και ενός ανθρακικού πετρώματος (Zharikov et al., 1998)
iii. Ροδινγκίτης: Συνίστανται από πλούσιο σε Ca γρανάτη, διοψίδιο, βολλαστονίτη, τρεμολίτη-ακτινόλιθο, βεζουβιανίτη, επίδοτο, τιτανίτη, μικροκλινή και Mg-χλωρίτη (Palandri & Reed, 2004). Κατά κύριο λόγο αντικαθιστά εγκλείσματα βασικών πετρωμάτων μέσα σε σερπεντινιωμένα υπερβασικά πετρώματα
iv. Greisen: Αναφέρεται σε αδρόκοκκα, μεσαίας θερμοκρασίας μετασωματικά πετρώματα με συγκεντρώσεις χαλαζία και λευκού μοσχοβίτη, μαζί με τοπάζιο, τουρμαλίνη, φθορίτη, οξείδια, (κασσιτερίτη, αιματίτη), βολφραμίτη, σουλφίδια του Fe, Cu, Mo και Bi, αλλά και Cu-Bi- Pb σουλφοάλατα (Pirajno, 2013)
v. Μπερεσίτης: Χαμηλής θερμοκρασίας μετασωματικά πετρώματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από την παρουσία χαλαζία, σερικίτη, ανκερίτη και πυριτικών ενώσεων που προέρχονται από την αντικατάσταση πυριγενών και ιζηματογενών πρωτόλιθων (Zharikov et al., 1998)
vi. Προπυλίτης: Είναι χαμηλής-μεσαίας θερμοκρασίας πέτρωμα με γρανοβλαστικό ιστό που σχηματίστηκε από την αλλοίωση βασικών ηφαιστειακών πετρωμάτων (ορισμός από SCMR)
vii. Δευτερογενείς χαλαζίτες: Είναι μετασωματικά πετρώματα τα οποία αντικαθιστούν γρανίτες, ηφαιστειακά και πιο σπάνια ιζηματογενή πετρώματα και συνίστανται κυρίως από χαλαζία (50-100 vol.%) και από Al-ορυκτά (Zharikov et al., 1998)
viii. Gumbeite: Είναι μεσαίας-χαμηλής θερμοκρασίας μετασωματικό πέτρωμα που αποτελείται από χαλαζία, ορθόκλαστο και ανθρακικά ορυκτά. Σχηματίζεται από την αλλοίωση γρανοδιορίτη ή συηνίτη και σχετίζεται άμεσα με φλέβες W-Cu ή Au-U (ορισμός από SCMR)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



ix. Ακεΐτης: Είναι χαμηλής θερμοκρασίας μετασωματικό πέτρωμα που συνίσταται κυρίως από αλβίτη με δευτερεύοντα ορυκτά τον αιματίτη και ανθρακικά ορυκτά και πιο σπάνια χλωρίτη και χαλαζία (Zharikov et al., 1998)

x. Αργιλλισίτης: Είναι χαμηλής θερμοκρασίας πέτρωμα που αποτελείται κυρίως από αργιλικά ορυκτά και πιο σπάνια από πυριτικά, ανθρακικά και σουλφίδια του σιδήρου. Σχηματίζεται από την υδροθερμική εξαλλοίωση πυριγενών αλλά και ιζηματογενών πετρωμάτων (Zharikov et al., 1998)

## 1.5 Υδροθερμικά διαλύματα και υδροθερμικός κύκλος

### 1.5.1 Υδροθερμικά διαλύματα

Πρώτη φορά το 1977 έγινε γνωστό ότι ρευστά διαλύματα αναδύονταν από τον ωκεάνιο πυθμένα κατά μήκος του παγκοσμίου συστήματος μεσοωκεάνιων ράχεων (Galapagos Rift, Corliss et al., 1979). Από εκείνη τη στιγμή, άλλαξε ριζικά η αντίληψη για την κυκλοφορία των στοιχείων μέσα στους ωκεανούς και τη λιθόσφαιρα, αλλά και η αντίληψη για τη δημιουργία της ζωής. Τα υδροθερμικά διαλύματα απέκτησαν κυρίαρχο ρόλο στη ρύθμιση της χημείας των ωκεανών και στη δημιουργία νέων οικοσυστημάτων μέσα σε αυτούς (Von Damm, 2019).

Τα υδροθερμικά διαλύματα σχηματίζονται καθώς το θαλασσινό νερό μεταβάλλεται μέσω αλληλεπιδράσεων της θερμότητας και του γήινου φλοιού (Gartman et al., 2014), με αποτέλεσμα να διασπώνται διάφορα στοιχεία, ενώσεις ή αέρια (Sharma & Srivastava, 2014). Δύο είναι οι βασικοί παράγοντες που απαιτούνται για την δημιουργία υδροθερμικών διαλυμάτων: 1$^{ον}$) μία ρευστή φάση και 2$^{ον}$) μία πηγή θερμότητας (Sharma & Srivastava, 2014). Αυτή η ρευστή φάση μπορεί να προέρχεται από διάφορες πηγές όπως μαγματικές, μεταμορφικές αντιδράσεις, μετεωρικό ή θαλασσινό νερό, ενώ η θερμότητα μπορεί να αποκτηθεί μέσω μαγματικών συστημάτων, γεωθερμικών βαθμίδων, ραδιογενούς θερμότητας ή μεταμορφικών αντιδράσεων (Sharma & Srivastava, 2014).

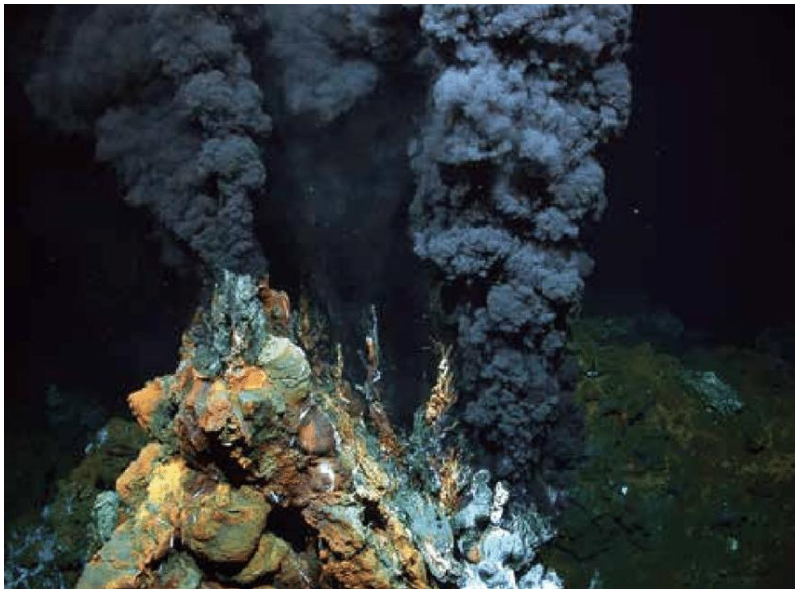
Σύμφωνα με την Von Damm (2019) συνήθως τα υδροθερμικά διαλύματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στα υψηλής θερμοκρασίας ή εστιασμένης ροής (focused flow) διαλύματα και στα χαμηλής θερμοκρασίας ή διαχυτικής ροής διαλύματα. Τα υψηλής θερμοκρασίας διαλύματα, γενικά πάνω από 200-250$^{o}$C, εμφανίζονται ως εστιασμένες, ισχυρές ροές νερού που εξέρχονται από δομές, οι οποίες είτε αποτέθηκαν από τα ίδια τα υδροθερμικά διαλύματα όταν αυτά αλληλοεπέδρασαν με κρύο, αλκαλικό, θαλασσινό νερό, είτε σχηματίστηκαν από την απόθεση εξαιτίας ανάμειξης υδροθερμικών διαλυμάτων με θαλασσινό νερό, είτε από τον συνδυασμό αυτών των δύο διαδικασιών. Κατά την ανάδυση των υδροθερμικών διαλυμάτων υψηλής θερμοκρασίας,

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

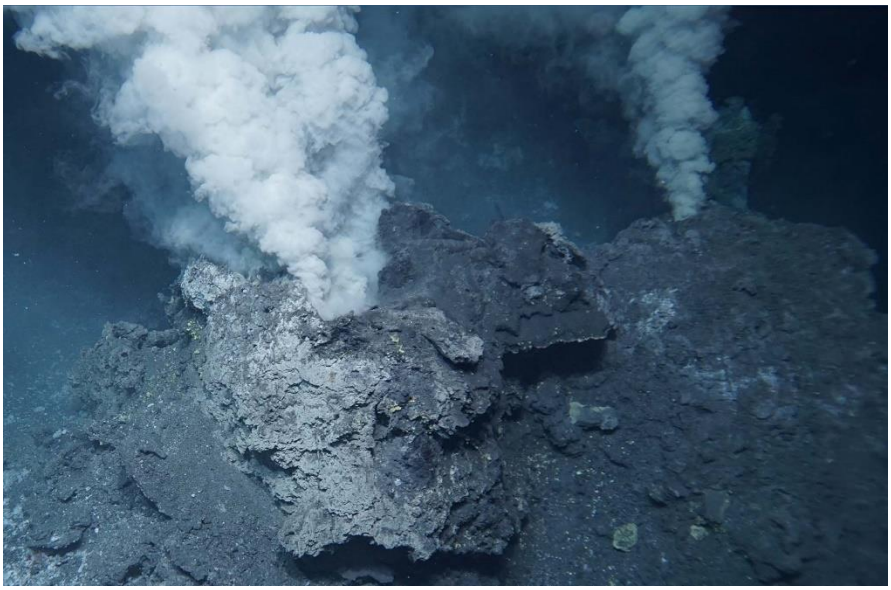
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



σχηματίζονται τα θεαματικά συστήματα των black και white smokers (Εικ.1, 2), όπου στην επαφή τους με κρύο θαλασσινό νερό, αποθέτουν ορυκτά μαύρων μεταλλικών σουλφιδίων και οξειδίων σε θερμοκρασίες 400$^{o}$C, ενώ σε θερμοκρασίες 200-330$^{o}$C αποτίθενται λευκά μη μεταλλικά ορυκτά, αντίστοιχα (Fowler, 2012). Τα black smokers συγκροτούνται κυρίως από μεταλλικά σουλφίδια και θειϊκές ενώσεις, αν και άλλα ορυκτά είναι επίσης παρόντα σε μικρότερες συγκεντρώσεις.



**Εικόνα 1.** Black smoker σε βάθος 2.980 μ., Μέσο-Ατλαντική ράχη
(https://www.researchgate.net/figure/Black-smoker-hydrothermal-vent-at-2-980m-depth-Mid-Atlantic-Ridge_fig16_284419320)



**Εικόνα 2.** White smoker
(MARUM – Center for Marine Environmental Sciences, University of Bremen)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



Τα χαμηλής θερμοκρασίας διαλύματα (35-100°C) αποθέτουν μεγάλο μέρος του μεταλλικού φορτίου τους κάτω από τον θαλάσσιο πυθμένα, γι' αυτό και δεν παρατηρείται καπνός ή συγκεκριμένες δομές που να σχετίζονται με τη ροή τους (Von Damm, 2019). Λόγω της έλλειψης συγκεκριμένης δομής , η ροή τους δεν είναι τόσο οργανωμένη και συχνά αναφέρεται ως «διαχυτική». Φυσικά, υπάρχουν εμφανίσεις όπου τα δύο είδη διαλυμάτων εμφανίζονται δίπλα δίπλα και πιο ειδικά, παρατηρείται εξέλιξη των χαμηλής θερμοκρασίας διαλυμάτων σε υψηλής θερμοκρασίας διαλύματα κατά το διάστημα αρκετών χρόνων.

**1.5.2 Υδροθερμικός κύκλος**

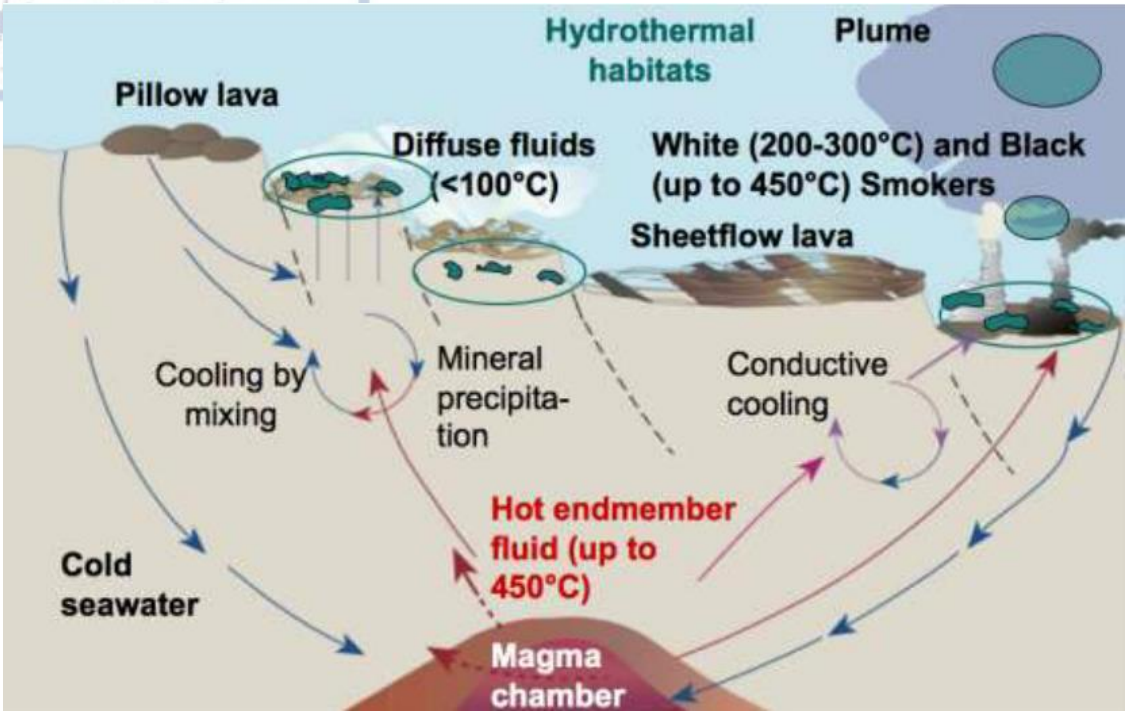
Σύμφωνα με τους German & Von Damm (2003), ο υδροθερμικός κύκλος προκαλείται όταν θαλασσινό νερό διαχέεται καθοδικά μέσα στον τεκτονισμένο ωκεάνιο φλοιό κατά μήκος του συστήματος των μεσοωκεάνιων ράχεων (Σχ.1). Το θαλασσινό νερό, πρώτα θερμαίνεται και ύστερα υποβάλλεται σε χημικές τροποποιήσεις μέσω αντιδράσεων με τα πετρώματα που έρχεται σε επαφή, ενώ ταυτόχρονα συνεχίζει την καθοδική του κίνηση φτάνοντας σε θερμοκρασίες που μπορεί να ξεπεράσουν τους 400°C. Σε αυτές τις θερμοκρασίες τα διαλύματα αναπτύσσουν πολύ ισχυρές τάσεις άνωσης, με τελικό προορισμό την ανάδυσή τους με μεγάλη ταχύτητα προς τον ωκεάνιο πυθμένα, όπου και διοχετεύονται (German & Von Damm, 2003). Ως αποτέλεσμα, έχουμε τον σχηματισμό των υδροθερμικών διαλυμάτων που είναι υπεύθυνα για την πρόκληση αλλοιώσεων και μετασωματικών διαδικασιών στα πετρώματα του ωκεάνιου φλοιού. Εκτός του κεντρικού άξονα, η κυκλοφορία των υδροθερμικών διαλυμάτων συνεχίζεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (20-65°C) και ρυθμούς κυκλοφορίας, καταλαμβάνοντας κυρίως τον ανώτερο διαπερατό φλοιό (Fowler, 2012).

Συνειδητοποιούμε, λοιπόν, πως τα διαλύματα έχουν την ικανότητα να διεισδύουν μέσα σε πολλούς διαφορετικούς τύπους πετρωμάτων, διαπερατούς ή μη, και ίσως να μην περιορίζονται μόνο στο να θεωρούνται βασικοί παράγοντες στη συντέλεση χημικών αντιδράσεων, αλλά να φτάσουν στο σημείο να θεωρούνται κινητήριοι μηχανισμοί γεωδυναμικών διαδικασιών (Putnis & Austrheim, 2010). Στο κεφάλαιο που έπεται θα συζητηθούν οι διαδικασίες μετασωμάτωσης που λαμβάνουν χώρα στον ωκεάνιο φλοιό, όπου τα υδροθερμικά διαλύματα έχουν κύριο λόγο στις χημικές και ορυκτολογικές μεταβολές που προκαλούνται.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"






**Σχήμα 1.** Υδροθερμικός κύκλος (Andrea Koschinsky, Jacobs University, Bremen, Germany, https://www.researchgate.net/figure/Components-of-a-hydrothermal-circulation-cell-and-mineral-deposits-formed-model-produced_fig2_264310412)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



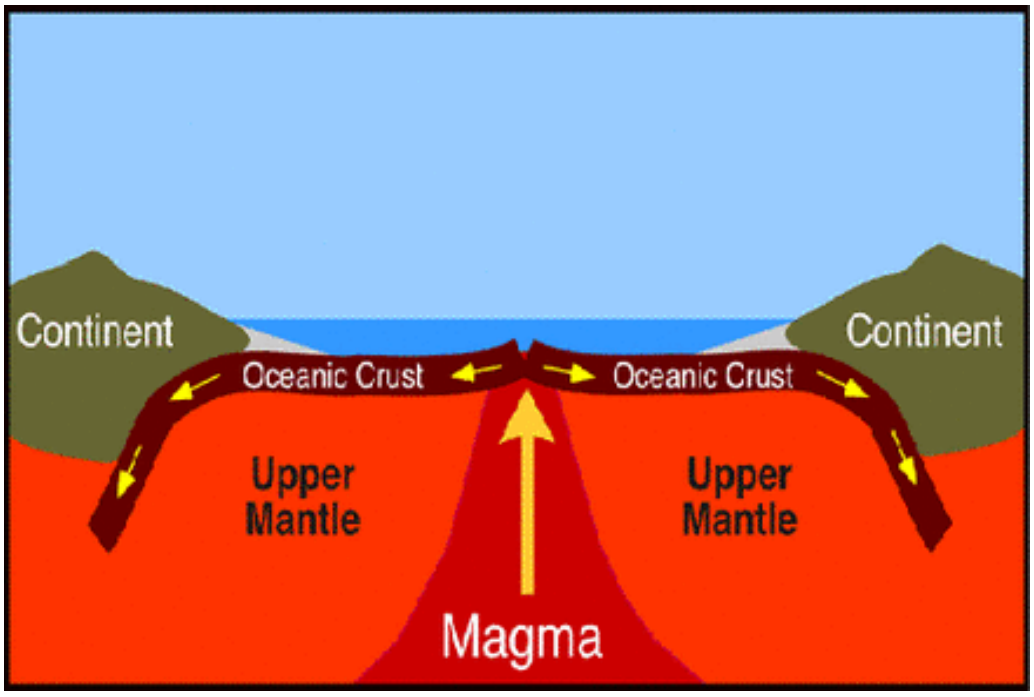
# 2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΣΤΟΝ ΩΚΕΑΝΙΟ ΦΛΟΙΟ

## 2.1 Ωκεάνιος φλοιός

Όπως ήδη αναφέρθηκε τα υδροθερμικά διαλύματα είναι υπεύθυνα για μεγάλο ποσοστό αλλαγών στον ωκεάνιο πυθμένα και φλοιό. Για να γίνουν πιο σαφείς οι περιοχές που επηρεάζονται από τις διαδικασίες της μετασωμάτωσης, είναι απαραίτητο να γίνει μια αναφορά στη δομή και τη λειτουργία της ωκεάνιας λιθόσφαιρας.

### 2.1.1 Δημιουργία του ωκεάνιου φλοιού

Ο ωκεάνιος φλοιός είναι το ανώτερο στρώμα της Γης κάτω από τους ωκεανούς. Διαχωρίζεται από τον υποκείμενο μανδύα μέσω της ασυνέχειας Moho (Lewis, 1983). Περίπου το 60% της επιφάνειας της Γης αποτελείται από ωκεάνιο φλοιό (Cogley, 1984) και η πλειοψηφία αυτού δημιουργείται στις μεσοωκεάνιες ράχεις, δηλαδή εκεί όπου υπάρχει απόκλιση λιθοσφαιρικών πλακών. Με την απόκλιση των λιθοσφαιρικών πλακών, προκαλείται η άνοδος του μανδυακού μάγματος και η ψύξη του, με τελικό αποτέλεσμα τον σχηματισμό της ωκεάνιας λιθόσφαιρας (Σχ.2).




**Σχήμα 2.** Δημιουργία ωκεάνιου φλοιού
(https://jeremyvosplatetectonicstimeline.weebly.com/sea-floor-spreading.htm)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



Αφού σχηματιστεί ο ωκεάνιος φλοιός, αυτός μετακινείται εκατέρωθεν του κεντρικού άξονα της μεσοωκεάνιας ράχης. Έτσι, απομακρύνεται από τον κεντρικό άξονα και κατευθύνεται προς κάποιο ηπειρωτικό περιθώριο, όπου θα βυθιστεί και θα ανακυκλωθεί, επιστρέφοντας τροποποιημένος στον μανδύα. Γι' αυτό και ο ωκεάνιος φλοιός χαρακτηρίζεται από σχετικά μικρές ηλικίες (60-167 εκ. χρόνια) (Cognè & Humler, 2006; Koppers et al., 2003), με εξαίρεση την Ανατολική Μεσόγειο, όπου χρονολογείται ωκεάνιος φλοιός έως και 270 εκ. χρόνων (Müller et al., 2008). Ο ωκεάνιος φλοιός, σε αντίθεση με τον ηπειρωτικό, δείχνει μεγαλύτερη ομοιογένεια ως προς το πάχος και τη σύσταση (Perfit, 2001).

### 2.1.2 Δομή του ωκεάνιου φλοιού

Το πάχος του ωκεάνιου φλοιού υπολογίζεται στα 6-7 χλμ. (Fowler, 2020). Σύμφωνα με τον LaFemina (2015), ο ωκεάνιος φλοιός σε γενικές γραμμές αποτελείται από τρία βασικά στρώματα. Από πάνω προς τα κάτω, το πρώτο στρώμα αποτελούν τα πελαγικά-ημιπελαγικά ή ηφαιστειογενή ιζήματα, τα οποία εκτείνονται για περίπου 0,5 χλμ. Το δεύτερο στρώμα χωρίζεται σε δύο υποστρώματα: Το πρώτο υπόστρωμα (2A) αποτελείται από τις βασαλτικές λάβες (pillow lavas) και το πάχος του φτάνει τα 0,5 χλμ. Το δεύτερο υπόστρωμα (2B) αποτελείται από ένα σύμπλεγμα διαβασικών φλεβών, το οποίο εκτείνεται για 1,5 χλμ. περίπου. Συνολικά, το δεύτερο στρώμα έχει πάχος 2 χλμ. κατά προσέγγιση. Το τρίτο και τελευταίο στρώμα φτάνει τα 5χλμ. σε πάχος και το συνιστούν βασικά πλουτωνικά πετρώματα, κυρίως γάββροι, και υπερβασικά πετρώματα. Η παραπάνω διάταξη αντιπροσωπεύει το layer-cake model, ή αλλιώς το μοντέλο του Penrose (Anonymous, 1972) (Σχ.3). Αυτό είναι το πιο αποδεκτό μοντέλο σήμερα, ωστόσο επιδέχεται κάποιες τροποποιήσεις ανάλογα με το ρυθμό διάνοιξης της μεσοωκεάνιας ράχης.

### 2.1.3 Ρυθμός έκτασης των μεσοωκεάνιων ράχεων και μοντέλα

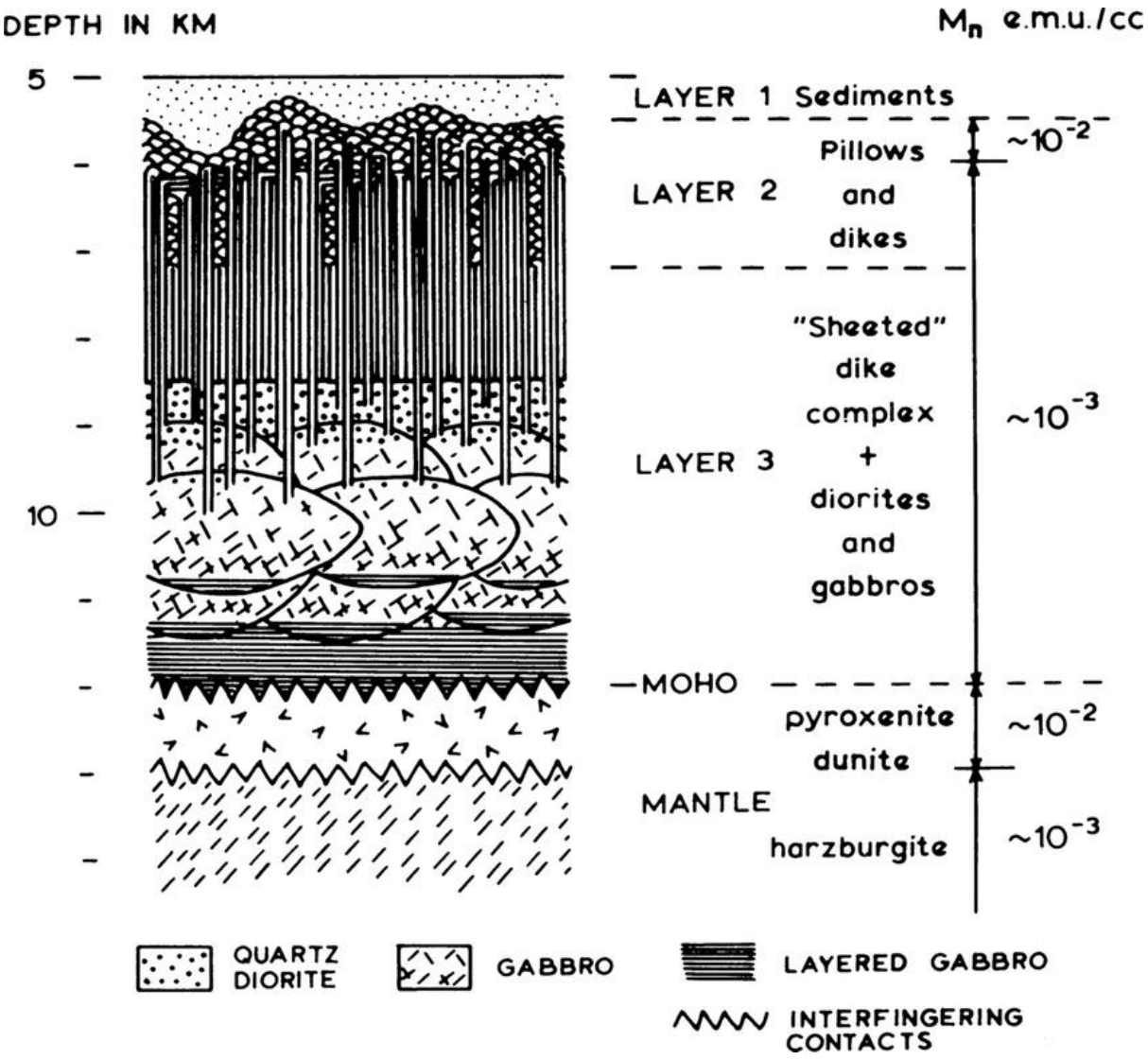
Ανάλογα με το ρυθμό διάνοιξης των μεσοωκεάνιων ράχεων, παρουσιάζονται διαφορές στη μορφολογία της ωκεάνιας λιθόσφαιρας (Σχ.4). Στις μεσοωκεάνιες ράχεις όπου παρατηρείται γρήγορος ρυθμός διάνοιξης (>8 εκ./έτος), η μορφολογία του φλοιού είναι ομαλή και σχετικά αδιατάρακτη (White & Klein, 2013). Γενικά, δεν παρατηρείται αξονική ρηξιγενής κοιλάδα, αλλά συνήθως υπάρχει ένα πιο στενό τεκτονικό βύθισμα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο φλοιός ακολουθεί το κλασικό μοντέλο του Penrose (Anonymous, 1972). Ωστόσο, το μοντέλο αυτό δεν είναι συμβατό με όλους τους τύπους των μεσοωκεάνιων ράχεων και ειδικότερα με αυτές που εμφανίζουν πιο αργό ρυθμό διάνοιξης, δηλαδή <4 εκ./έτος (White & Klein, 2013). Στις μεσοωκεάνιες ράχεις αργού ρυθμού διάνοιξης κυριαρχεί ρηξιγενής τοπογραφία. Στο όριο των λιθοσφαιρικών πλακών συναντάται

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



μία αξονική ρηξιγενής κοιλάδα με πλάτος 5-20 χλμ. και βάθος περίπου 1 χλμ. (Klein, 2013). Μέσα σε αυτήν συνήθως σχηματίζονται ηφαιστειακές ράχες από υψώματα pillow λαβών και συγκεντρώσεις pillow λοφίσκων. Σύμφωνα με τους Perfit & Chadwick (1998), οι ηφαιστειακές εκρήξεις στις μεσοωκεάνιες ράχες αργού ρυθμού διάνοιξης είναι πιο σπάνιες, αλλά και πιο έντονες απ' ό,τι στις ράχες γρήγορου ρυθμού διάνοιξης.

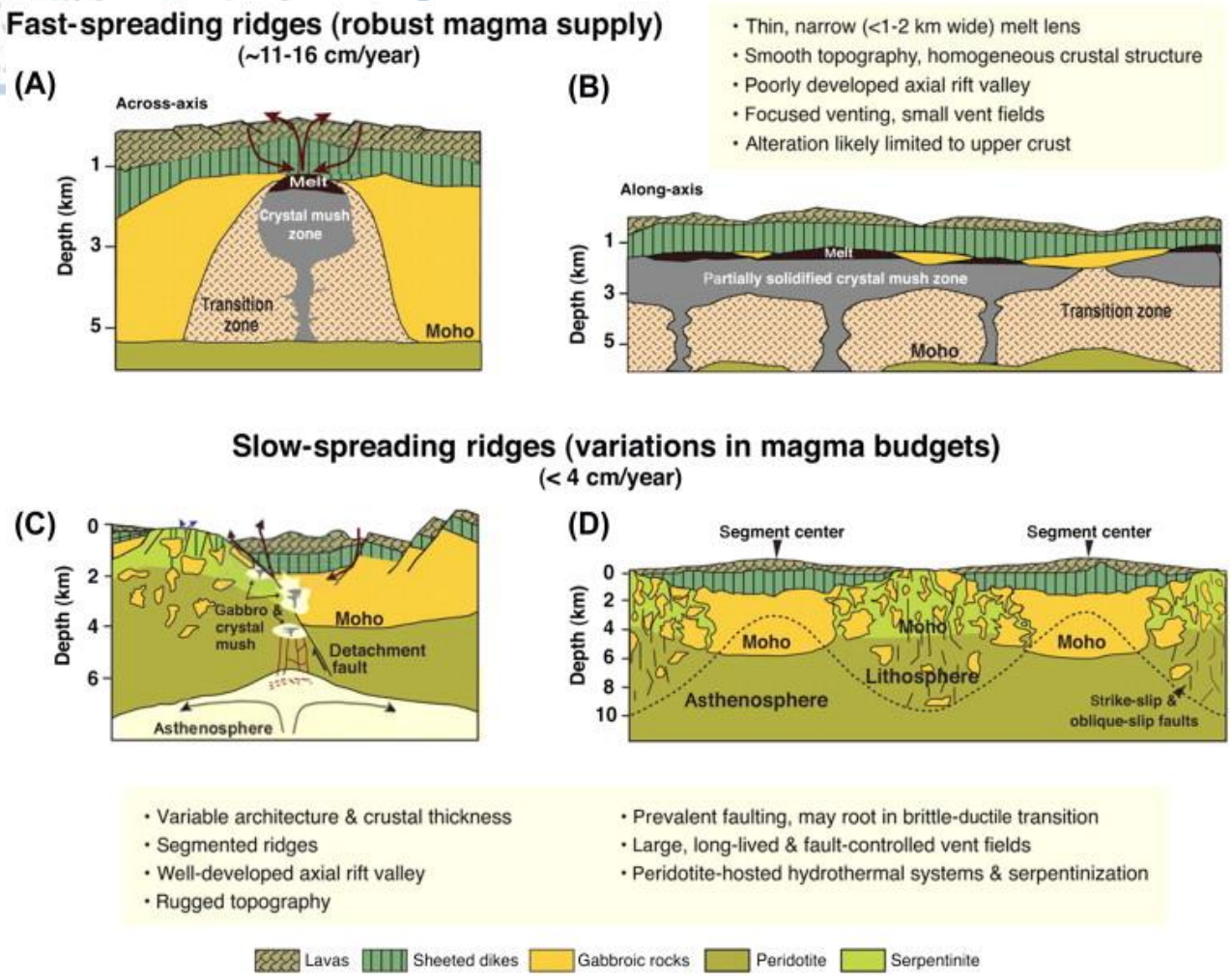



**Σχήμα 3.** Layer-cake model ωκεάνιου φλοιού («Penrose-type»), το οποίο προτάθηκε στις αρχές του 1970, βασισμένο σε οφιολιθικές έρευνες και θαλάσσια γεωφυσικά δεδομένα (Vine and Moores 1972, fig. 1)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"






**Σχήμα 4.** Σχηματική απεικόνιση μεσοωκεάνιων ράχεων γρήγορου και αργού ρυθμού διάνοιξης και περιγραφή των κύριων χαρακτηριστικών τους (Bach & Früh-Green, 2010)

### 2.1.4 Τύποι μετασωμάτωσης στον ωκεάνιο φλοιό

Αφού έγινε μια αρκετά λεπτομερής αναφορά στη δομή της ωκεάνιας λιθόσφαιρας, θα είναι πλέον πιο εύκολο να γίνουν κατανοητές οι διαδικασίες που την μεταβάλλουν. Οι διαδικασίες μετασωμάτωσης στον ωκεάνιο φλοιό υπάγονται σε δύο βασικές κατηγορίες: στην διαχυτική μετασωμάτωση και στην διηθητική μετασωμάτωση (Korzhinskii, 1957). Η διαχυτική μετασωμάτωση σχετίζεται με τη διάχυση μιας διαλυμένης ουσίας μέσω ενός στάσιμου διαλύματος (ρευστού) (Zharikov et al., 1998). Η κινητήρια δύναμη για την πραγματοποίηση της διάχυσης είναι η μεταβολή του χημικού δυναμικού μεταξύ του πετρώματος και των διαλυμάτων που υπάρχουν στους πόρους των πετρωμάτων, χωρίς να απαιτείται η κίνηση ενός ρευστού διαλύματος μέσα στο πέτρωμα (Zharikov et al., 1998).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



Αντίθετα, η διηθητική μετασωμάτωση πραγματοποιείται με τη μεταφορά υλικού σε διάλυση, το οποίο εισχωρεί μέσα στο μητρικό πέτρωμα (Zharikov et al., 1998). Εδώ, η κινητήρια δύναμη είναι η πίεση και η μεταβολή της συγκέντρωσης μεταξύ του διηθούμενου διαλύματος και του διαλύματος του πετρώματος-πόρων (Zharikov et al., 1998).

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι η διάχυση εμφανίζεται εκεί όπου οι λιθολογίες, τοποθετημένες η μία δίπλα στη άλλη, προκαλούν έντονες χημικές αντιδράσεις μεταξύ των ρευστών των πόρων των δύο λιθολογιών (Bach et al., 2013). Συνεπώς, η διαχυτική μετασωμάτωση λαμβάνει χώρα κυρίως σε μεσοωκεάνιες ράχες αργού ρυθμού διάνοιξης, εκεί δηλαδή, όπου παρατηρείται έντονη ανομοιογένεια των λιθολογιών του ωκεάνιου φλοιού (βλ. παράγραφο 2.1.3.). Τα διαχυτικά μετασωματικά πετρώματα σχηματίζουν σχετικά λεπτά ζωνώδη σώματα κατά μήκος ρωγμώσεων, φλεβών και επιφανειών επαφής των πετρωμάτων και η σύσταση των ορυκτών μπορεί να μεταβάλλεται βαθμιαία κατά μήκος κάθε μετασωματικής ζώνης (Zharikov et al., 1998).

Η διηθητική μετασωμάτωση λαμβάνει χώρα σε όλους τους τύπους λιθολογιών, αλλά γίνεται πιο αισθητή εκεί όπου υπάρχει πολύ υψηλή ροή ρευστών (Bach et al., 2012). Σε αντίθεση με τη διαχυτική μετασωμάτωση, η διηθητική, εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των υδροθερμικών διαλυμάτων με τα πετρώματα της ωκεάνιας λιθόσφαιρας, είναι η πιο αποτελεσματική και μεγαλύτερης κλίμακας διαδικασία καθορισμού των χημικών συστάσεων τόσο του ωκεανού όσο και της ωκεάνιας λιθόσφαιρας (Bach et al., 2013). Παρατηρείται πιο έντονα σε μεσοωκεάνιες ράχες γρήγορου ρυθμού διάνοιξης, όπου η μορφολογία του ωκεάνιου φλοιού είναι πιο ομαλή (βλ. παράγραφο 2.1.3.). Τα διηθητικά μετασωματικά πετρώματα, γενικά, καταλαμβάνουν πολύ μεγαλύτερους όγκους από τους διαχυτικούς και η σύσταση των ορυκτών παραμένει ίδια κατά μήκος κάθε μετασωματικής ζώνης (Zharikov et al., 1998).

Συνεπώς, οι διαδικασίες μετασωμάτωσης στον ωκεάνιο φλοιό χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Αυτές που προκύπτουν από τη διαχυτική μετασωμάτωση και αυτές που δημιουργούνται από τη διηθητική. Βασικές διαδικασίες της διηθητικής μετασωμάτωσης είναι: 1) η επιδοτιτοποίηση (epidotization) και 2) η χλωριτίωση, η σερικιτίωση και η πυριτίωση, ενώ στη διαχυτική μετασωμάτωση βασικές διαδικασίες είναι: 1) η ροδινγκιτίωση και 2) η στεατίωση (steatization), η μετατροπή φεμικών ορυκτών σε τάλκη. Ωστόσο, υπάρχει και μία διαδικασία η οποία απαιτεί τον συνδυασμό της διήθησης και της διάχυσης και αυτή είναι η ανθρακοποίηση (carbonation) του σερπεντινίτη ($CO_2$ μετασωμάτωση)(Harlov & Austrheim, 2013). Όλες οι παραπάνω διαδικασίες μετασωμάτωσης του ωκεάνιου φλοιού θα περιγράφουν αναλυτικά παρακάτω, όντας το κεντρικό θέμα αυτής της εργασίας.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



**2.2 Διηθητική μετασωμάτωση**

**2.2.1 Επιδοτιτοποίηση (Epidotization)**

Οι επιδοτίτες είναι έντονα μετασωματικά πετρώματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από αντικατάσταση των κύριων πυριγενών ορυκτών τους από επίδοτο και χαλαζία ± χλωρίτη ± ακτινόλιθο ± ιλμενίτη ± μαγνητίτη ± σουλφίδια (Richardson et al., 1987; Alt, 1995; Banerjee et al., 2000). Η επιδοτιτοποίηση (epidotization) προκαλεί τροποποιήσεις πρασινοσχιστολιθικής φάσης (Bach et al., 2013) και λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες μεταξύ 300-400°C (Seyfried et al., 1988; Richardson et al., 1987; Schiffman et al., 1987). Κύριο χαρακτηριστικό των πετρωμάτων αυτών είναι το φιστικί-πράσινο χρώμα τους (Richardson et al., 1987; Nehlig et al., 1994) και η απουσία της κρυσταλλικής υφής των πυριγενών πετρωμάτων (Εικ.3) (Gilgen et al., 2016; Valsami & Cann, 1992; Richardson et al., 1987).

**Εικόνα 3.** Επιδοτίτης
(https://www.alexstrekeisen.it/english/meta/epidosite.php)

Η γένεση των επιδοτιτών δεν είναι ακόμη ξεκάθαρη και παραμένει αμφίβολη έως και σήμερα. Τα περισσότερα δείγματα επιδοτιτών που έχουν βρεθεί σχηματίζονται σε περιβάλλοντα ζωνών υποβύθισης ωκεάνιας λιθόσφαιρας. Παραδείγματα τέτοιων επιδοτιτών συναντάμε στους οφιόλιθους του Τροόδους (Richardson et al., 1987), του Josephine (Harper et al., 1988), του Semail (Nehlig et al., 1994), της Πίνδου (Valsami & Cann, 1992).

Ωστόσο, η πρόσφατη έρευνα στο εμπρόσθειο τόξο στην περιοχή Tonga (Banerjee et al., 2000) τοποθετεί τους επιδοτίτες και σε εμπροσθοτόξειο περιβάλλον, με το δείγμα αυτό να είναι το μόνο επαληθευμένο μέχρι σήμερα. Αν και έχουν βρεθεί ελάχιστα τέτοια πετρώματα σε σημερινά ωκεάνια περιβάλλοντα, ο Banerjee et al. (2000) ισχυρίζεται πως τα εμπρόσθεια τόξα ίσως να είναι τα

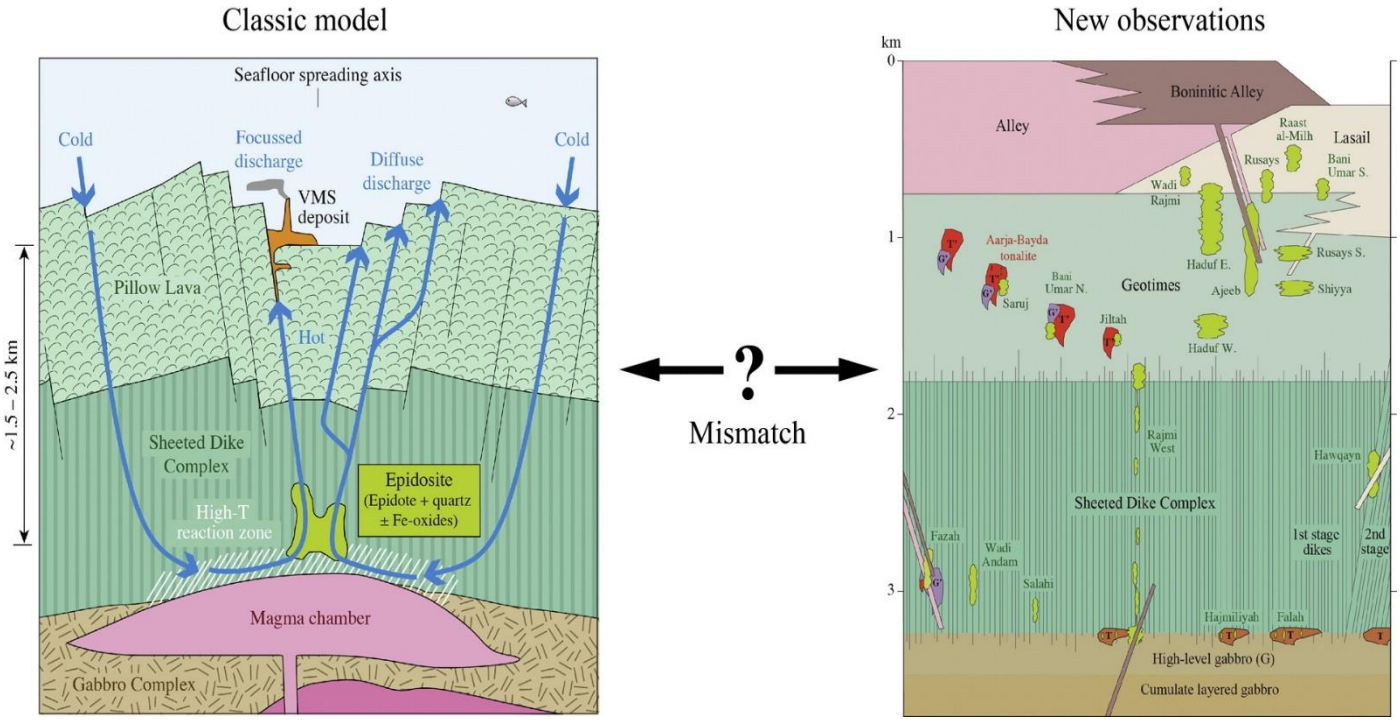
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



σύγχρονα περιβάλλοντα σχηματισμού των επιδοτιτών. Παρατηρώντας τις ομοιότητες ανάμεσα στους νέους και τους παλιούς επιδοτίτες και την απουσία τους από τις μεσοωκεάνιες ράχες, συμπεραίνουμε ότι το τεκτονικό περιβάλλον παίζει σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό τους (Banerjee et al., 2000).

Οι επιδοτίτες εμφανίζονται συνήθως α) στη βάση του συστήματος πολλαπλών φλεβών, όπου αντικαθιστούν διαβάσες, βασάλτες και γάββρους, και β) γύρω από πλαγιογρανίτες, συμπεριλαμβανομένων εμφανίσεων γύρω από τοναλίτες-τροντγκεμίτες και γρανοδιορίτες (Banerjee et al., 2000). Ο Banerjee et al. (2000), βασιζόμενος στις παραπάνω παρατηρήσεις, χώρισε τους επιδοτίτες σε επιδοτίτες τύπου Α και σε επιδοτίτες τύπου Β, αντίστοιχα. Παρά την έμφαση που δίνεται στο σύμπλεγμα των φλεβών ως την κύρια ζώνη σχηματισμού των επιδοτιτών, πολλοί επιδοτίτες έχουν επίσης βρεθεί και στα ανώτερα ηφαιστειογενή στρώματα των οφιόλιθων (Σχ.5) (Gilgen et al., 2016).




**Σχήμα 5.** Ζώνες σχηματισμού επιδοτιτών (Gilgen et al., 2016)

Σύμφωνα με τον Richardson et al. (1987), αναπτύσσονται συχνότερα ως στενές λωρίδες (5-20μ.) μέσα στο σύμπλεγμα των διαβασικών φλεβών. Το σύνολο των λωρίδων συνιστούν τις επιδοτιτικές ζώνες, οι οποίες έχουν πλάτος εκατοντάδων μέτρων και εκτείνονται παράλληλα με την

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



παράταξη των διαβασικών φλεβών (Alt, 1995; Harper et al., 1988; Richardson et al., 1987). Επίσης, μπορούν να βρεθούν και σαν φακοί μερικών χιλιοστών - εκατοστών μέσα στο σύμπλεγμα των φλεβών (π.χ. οφιόλιθοι του Semail, Nehlig et al., 1994).

Σε αντίθεση με το μητρικό πέτρωμα (διαβάσες), οι επιδοτίτες είναι εμπλουτισμένοι σε Ca και σε Sr, ενώ παρατηρείται έντονη μείωση σε Mg, Na, K, αλλά και σε Cu και Zn (Nehlig et al., 1994; Valsami & Cann, 1992; Harper et al. 1988; Schiffman et al., 1987; Richardson et al., 1987). Ιδιαίτερη σημασία έχει δοθεί στην έντονη ελάττωση Cu και Zn που παρατηρείται στους επιδοτίτες, διότι άμεσα συσχετίζονται με τις πολύ σημαντικές αποθέσεις ηφαιστειογενών σουλφιδίων (VMS) σε αυτά τα περιβάλλοντα (Gilgen et al., 2016). Αφού, λοιπόν, παίζουν έναν τόσο σπουδαίο ρόλο στη γέννηση κοιτασμάτων, αυτόματα η παρουσία τους σε οφιόλιθους είναι ένας δείκτης ένδειξης επεισοδίων υψηλής θερμοκρασίας και συνάμα ένδειξη ύπαρξης τέτοιων σουλφιδίων (Richardson et al., 1987).

### 2.2.2 Χλωριτίωση, σερικιτίωση και πυριτίωση

Οι τρεις αυτές υδροθερμικές εξαλλοιώσεις λαμβάνουν χώρα στο ανώτερο τμήμα των υδροθερμικών ζωνών (upflow zones), δηλαδή σχηματίζονται πάνω από τους επιδοτίτες, όπου επικρατούν ορυκτά όπως, ο χλωρίτης, οι μαρμαρυγίες και ο χαλαζίας (Bach et al., 2013). Σε αυτές τις ζώνες υπάρχει αφθονία σε Mg, Mn, Cu, Zn, Pb, U, S και σε $CO_2$, αλλά παρατηρείται μία έντονη μείωση σε Ca (Bach et al., 2003). Όλα τα παλιά αλλά και τα σύγχρονα συστήματα υδροθερμικών ζωνών (upflow zones) έχουν περίπου μία κυλινδρική δομή με διάφορες μετασωματικές ζώνες (Σχ.6). Η δομή αυτή πάντα ξεκινάει με μία εξωτερική ζώνη χλωριτίωσης, την οποία διαθέτουν όλα τα συστήματα. Στο εσωτερικό μέρος, επικρατούν η πυριτίωση και η θείωση. Ωστόσο, σε κάποια παραδείγματα παρατηρείται και μία ζώνη σερικιτίωσης (με παρουσία ιλλίτη ή παραγωνίτη), η οποία βρίσκεται ανάμεσα στις ζώνες χλωριτίωσης και πυριτίωσης (Bach et al., 2013).

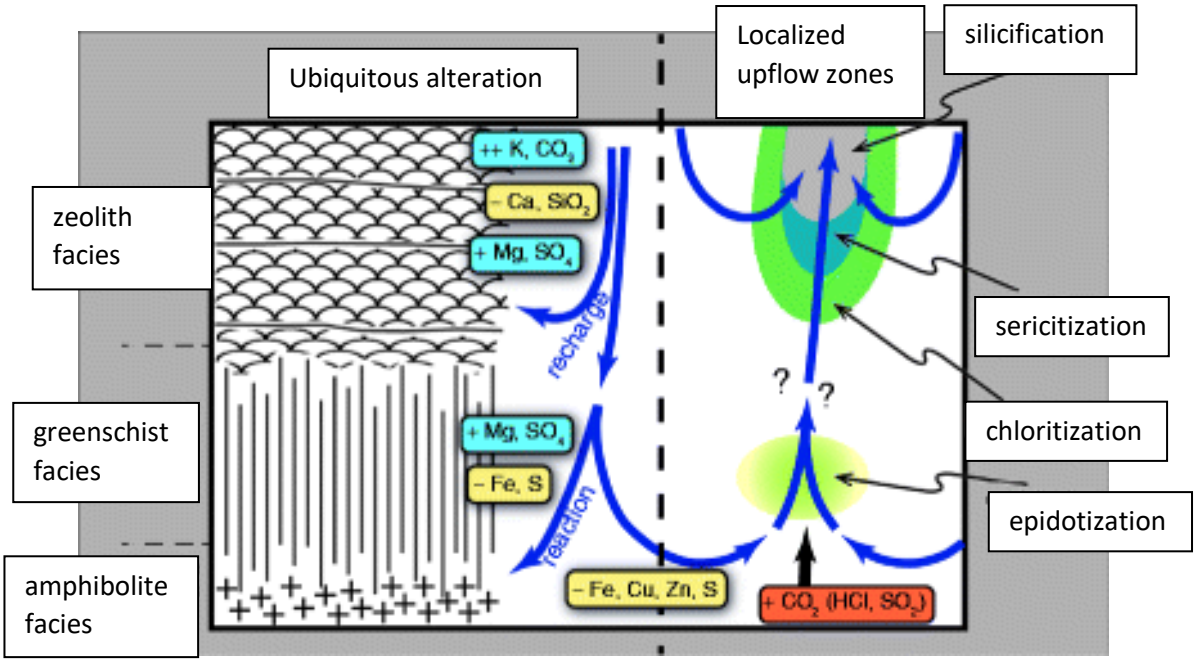
Σ’ αυτές τις ζώνες η μετασωματική μεταφορά μάζας είναι πολύ σημαντική και οφείλεται στην θερμοδυναμική κινητήρια δύναμη για αντιδράσεις ορυκτολογικής αντικατάστασης μέσω συγκεκριμένων διαδρομών. Μία τέτοια διαδρομή είναι η πορεία που ακολουθεί το θαλασσινό νερό, το οποίο θερμαίνεται στα περιφερειακά τμήματα των ανώτερων υδροθερμικών ζωνών (upflow zones) και προκαλεί χλωριτίωση. Επειδή το διάλυμα που προκαλεί τις αντιδράσεις έχει ιδιότητες θαλασσινού νερού (Tivey et al., 1998; Teagle et al., 1998), ο χλωρίτης που σχηματίζεται κατά την αντικατάσταση είναι πλούσιος σε Mg (Alt & Teagle, 1999) και το πέτρωμα υπόκειται σε Mg-μετασωμάτωση (Humphris et al., 1998). Στον πυρήνα των ανώτερων υδροθερμικών ζωνών, τα υδροθερμικά διαλύματα ανέρχονται χωρίς να αναμιγνύονται με θαλασσινό νερό, γι’ αυτό και εδώ κυριαρχούν η σερικιτίωση και η πυριτίωση. Οι παράγοντες που ενισχύουν αυτές τις αντιδράσεις

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



αντικατάστασης είναι φυσικοχημικές αλλαγές στα διαλύματα, τα οποία γίνονται πιο ψυχρά και πιο όξινα κατά την άνοδό τους. Από τα πετρώματα αφαιρείται παντελώς το Mg και το Ca, αλλά συγκρατούν ή αποκτούν ένα μέρος των αλκαλίων που χάνονται από τα πετρώματα στις ζώνες αντίδρασης (reaction zones) (Bach et al., 2013).




**Σχήμα 6.** Ζώνες δράσης της χλωριτίωσης, σερικιτίωσης και πυριτίωσης (Bach et al., 2013)

### 2.3 Διαχυτική μετασωμάτωση

#### 2.3.1 Ροδινγκιτίωση

Οι ροδινγκίτες είναι λευκοκρατικά πετρώματα, τα οποία συναντώνται σε επαφή με σερπεντινίτες και θεωρούνται μετασωματικά προϊόντα διαλυμάτων πλούσιων σε Ca (Nishiyama et al., 2017). Το χρώμα τους ποικίλλει με πιο σύνηθες το λευκό, το ροζ και το ανοιχτό πράσινο (Εικ.4) (Frost, 1975; Rice, 1983). Τα πετρώματα αυτά είναι λεπτόκοκκα, εμπλουτισμένα σε Ca, υποκορεσμένα σε $SiO_2$ και σχηματίζονται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις (O'Hanley et al., 1992). Συνίστανται κυρίως από πλούσια σε ασβέστιο και αργίλιο πυριτικά ορυκτά (Evans, 1977; Coleman, 1967; Bach & Klein, 2009; Rice, 1983; Pomonis et al., 2008) όπως, ο υδρογροσσουλάριος, ο διοψίδιος, ο ζοϊσίτης, ο βεζουβιανίτης, ο πρενίτης (Evans, 1977; Austrheim & Prestvik, 2008; Nishiyama et al., 2017). Οι ροδινγκίτες δεν θεωρούνται πετρολογικά σημαντικοί, διότι η τυπική τους ορυκτολογική σύσταση διοψιδίου + γροσσουλάριου δίνει λίγες πληροφορίες για τις συνθήκες

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



σχηματισμού τους, ωστόσο, παίζουν σημαντικό ρόλο στις αλληλεπιδράσεις διαλυμάτων-πετρωμάτων στην ωκεάνια λιθόσφαιρα (Frost et al., 2008; Bach and Klein, 2009) και στα περιβάλλοντα ζωνών υποβύθισης (Koutsovitis et al., 2013; Li et al., 2014).

**Εικόνα 4.** Ροδινγκίτης (Andoni Alvarez, Smithsonian Institution, https://www.si.edu/object/nmnheducation_10024673)

Ο όρος «ροδινγκίτης» χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά το 1911 από τον Bell, για να περιγράψει αλλοιωμένους γάββρους στην περιοχή του Dun mountain της Νέας Ζηλανδίας. Το όνομα το πήρε από τον ποταμό Roding που ρέει στην συγκεκριμένη περιοχή. Από τότε, πολλοί ερευνητές μελέτησαν αυτά τα πετρώματα και ο όρος «ροδινγκίτης» πλέον, δεν αναφέρεται μόνο σε γάββρους, αλλά σε κάθε πέτρωμα που περιέχει ορυκτολογικές συγκεντρώσεις πλούσιες σε ασβέστιο και πυρίτιο και που έρχεται σε επαφή με σερπεντινίτη (Normand & Williams-Jones, 2007). Πιο αναλυτικά, οι πρωτόλιθοι από τους οποίους σχηματίζεται ο ροδινγκίτης, μπορεί να είναι: γάββροι (Coleman, 1967; O'Brien & Rodgers, 1973; Honnorez & Kirst 1975; Muraoka, 1985; Kobayashi & Kaneda, 2010), βασάλτες (Coleman, 1967; Barriga & Fyfe, 1983), αμφιβολίτες (Karakida, 1980), διορίτες (Hatzipanagiotou & Tsikouras, 2001), χαλαζίτες (El-Shazly & Al-Belushi, 2004), και γρανίτες (Wares & Martin, 1980).

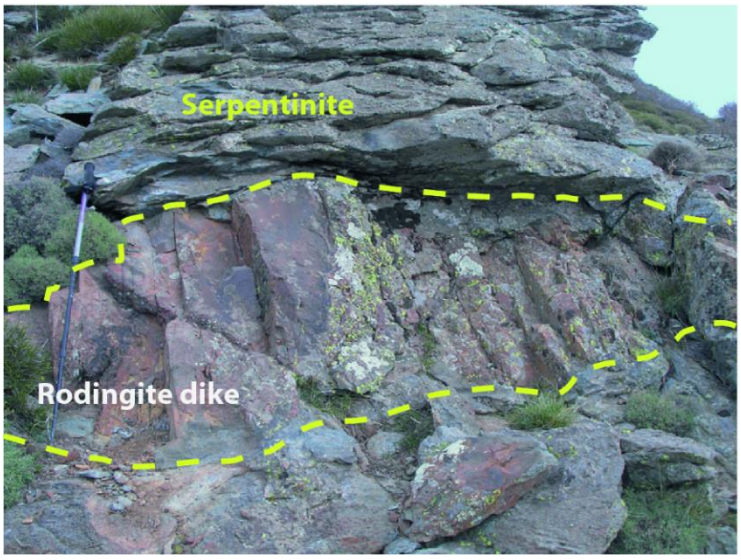
Οι ροδινγκίτες πιο συχνά εμφανίζονται με τη μορφή φλεβών ή με τη μορφή φακών μέσα σε σερπεντινίτες (Εικ.5) (Rice, 1983). Αναπτύσσεται έτσι μία σχέση μεταξύ των δύο τύπων πετρωμάτων, αφού η εξέλιξη του ενός εξαρτάται άμεσα από την εξέλιξη του άλλου (Schandl & Gorton, 2012). Σύμφωνα με τον Nishiyama et al. (2017) οι ροδινγκίτες, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: α) dyke type

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



και β) vein type. Οι dyke-type ροδινγκίτες εμφανίζονται ως λεπτές στρώσεις πετρώματος με πάχος από 20 έως 100 εκ. και συνήθως έχουν αδρόκοκκο γαββρικό ιστό. Οι vein-type ροδινγκίτες έχουν τη μορφή ελικοειδών ή μαιανδρικών φλεβών, με πάχος από 1 έως 10 εκ. και δεν έχουν σαφή ιστό.



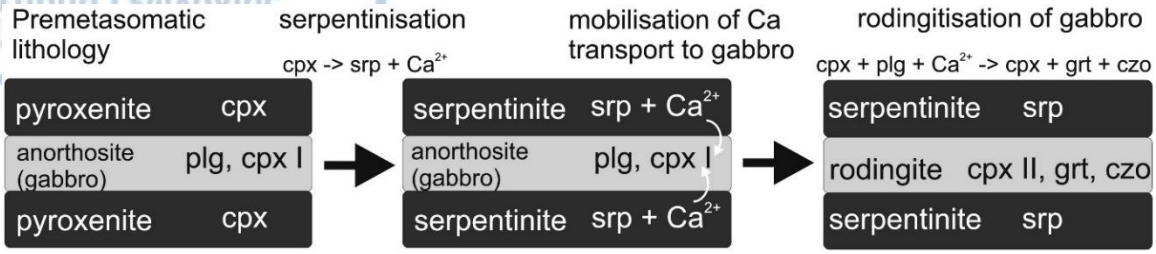

**Εικόνα 5.** Φλέβα ροδινγκίτη σε επαφή με σερπεντινίτη (Gómez-Pugnaire et al., 2019)

Πιστεύεται πως οι ροδινγκίτες σχηματίζονται από την αντίδρασή τους με ρευστά πλούσια σε Ca, τα οποία απελευθερώνονται κατά την σερπεντινίωση του πρωτογενούς κλινοπυρόξενου των υπερβασικών πετρωμάτων της ωκεάνιας λιθόσφαιρας (Σχ.7). Εναλλακτικά, οι ροδινγκίτες μπορεί να αντιπροσωπεύουν μια δεξαμενή για το Ca του θαλασσινού νερού ή των υδροθερμικών διαλυμάτων (Gussone et al., 2020). Λόγω του ότι ο σερπεντίνης δε μπορεί να δεχτεί στη δομή του $Ca^{2+}$, το διάλυμα καταλήγει να είναι κορεσμένο σε ασβεστιτικά ορυκτά τα οποία αποτίθενται σε φλέβες και λιθολογικά εγκλείσματα (Schandl & Gorton, 2012). Γίνεται φανερό, λοιπόν, πως ερευνώντας καλύτερα τις πηγές Ca των ροδινγκιτών, δίνεται η δυνατότητα για μεγαλύτερη κατανόηση του κύκλου του Ca στους ωκεάνιους χώρους.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας






**Σχήμα 7.** Μοντέλο ροδινγκιτίωσης (Gussone et al., 2020)

### 2.3.2 Στεατίωση (Steatization) – Si μετασωμάτωση

Ο όρος «στεατίτης» είναι ένας γενικός όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει μετασωματικά πετρώματα που συνίστανται κυρίως από τάλκη, αλλά αποτελούνται και από άλλα ορυκτά, όπως αμφιβόλους, μαγνητίτη, χλωρίτη και ανθρακικά ορυκτά (Bray & Sanderson, 1994). Τα κοιτάσματα στεατίτη σχηματίζονται από την επίδραση περιοχικής μεταμόρφωσης ή μεταμόρφωσης επαφής, εξαιτίας μετασωματικών διεργασιών που συμβαίνουν στο αρχικό μητρικό πέτρωμα (Bray & Sanderson, 1994). Τα μητρικά πετρώματα, ως επί το πλείστον, είναι υπερβασικά πετρώματα, όπως σερπεντινίτες, περιδοτίτες, δουνίτες ή πυροξενίτες (Bray & Sanderson, 1994). Ο Hess (1933a) όρισε τη στεατίωση (steatization) ως μία διαδικασία υδροθερμικής εξαλλοίωσης ενός υπερβασικού πετρώματος, το οποίο στα τελευταία του στάδια καταλήγει στο σχηματισμό ενός ταλκικού πετρώματος. Ο τάλκης είναι ένα δευτερογενές ορυκτό ευρέως διαδεδομένο στην επιφάνεια της Γης. Είναι φυλλοπυριτικό ορυκτό του μαγνησίου ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$), με βασικό χαρακτηριστικό την πολύ μικρή σκληρότητα και τη λιπαρή αφή του.

Η κύρια εξαλλοίωση των σερπεντινιτών είναι η αντικατάσταση των ορυκτών τους από τάλκη, η οποία είναι το αποτέλεσμα Si-μετασωμάτωσης (Paulick et al., 2006). Ένα παράξενο γεωχημικό χαρακτηριστικό του σερπεντινίτη είναι πως παρουσιάζει την χαμηλότερη ενεργότητα πυριτίου σε γήινα πυριτικά συστήματα και πιο συγκεκριμένα σε υπο-πρασινοσχιστολιθικές συνθήκες μεταμόρφωσης (Bach et al., 2013). Τα υδροθερμικά διαλύματα που είναι υπεύθυνα για την εξαλλοίωση του σερπεντινίτη, είναι κορεσμένα σε Si και κινούνται κατά μήκος στενών ρωγμών, τις οποίες και πληρώνουν με το υλικό που μεταφέρουν (Moore & Rymer, 2007). Ωστόσο, δεν είναι ακόμη γνωστή η πηγή πυριτίου αυτών των διαλυμάτων. Ο Bach et al. (2004) αναφέρει πως το πυρίτιο θα μπορούσε να προέρχεται από την εξαλλοίωση πυροξένων που ανήκαν είτε σε περιδοτίτη είτε σε γάββρο. Γενικά, η εμφάνιση τάλκη σε σερπεντινιωμένους περιδοτίτες ή η ολική αντικατάσταση του σερπεντινίτη από στεατίτη είναι σχετικά πιο συνηθισμένο σε διεισδύσεις γάββρων (Bach et al., 2004)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



ή πλαγιογρανιτών (Morishita et al., 2009), οι οποίες παρέχουν πυρίτιο κατά την υδροθερμική εξαλλοίωση. Ένα ακόμη σημαντικό γνώρισμα είναι πως η αλλοίωση αυτή συμβαίνει υπό στατικές συνθήκες και αυτό γίνεται φανερό από την ψευδομόρφωση κατά της δικτυωτής υφής (mesh texture) του σερπεντίνη (Bach et al., 2004).

Παρακάτω, παρουσιάζεται η χημική αντίδραση μετατροπής του σερπεντίνη σε τάλκη κατά την Si-μετασωμάτωση (Moore & Rymer, 2007):

$$Mg_3Si_2O_5(OH)_4 + 2SiO_2 = Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2 + H2O$$

σερπεντίνης τάλκης

**2.4 $CO_2$ μετασωμάτωση**

Οι εκπομπές $CO_2$ είναι η πρωταρχική πηγή πρόκλησης της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής (Ritchie & Roser, 2020). Με σκοπό να αποφευχθεί το φαινόμενο του θερμοκηπίου λόγω των υπερβολικών συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα, θα πρέπει να βρεθούν τρόποι μείωσης των εκπομπών, όπως για παράδειγμα η αποθήκευση του $CO_2$ σε φυσικές αποθήκες (Seifritz, 1990).

Τα ανθρακικά πετρώματα αναπτύσσονται σε μεγάλο βαθμό από την αλληλεπίδραση υδάτινων διαλυμάτων με πυριτικά πετρώματα πλούσια σε ασβέστιο και μαγνήσιο, είτε μέσω της αποσάθρωσης, της ροής υπόγειων υδάτων ή της υδροθερμικής δραστηριότητας (Guthrie, 2001). Κάθε μία από αυτές τις αντιδράσεις διαλύματος-πετρώματος μπορεί να οδηγήσει στην απελευθέρωση των αλκαλικών μετάλλων από τα πυριτικά πετρώματα μέσω της διάλυσης, της έκπλυσης ή άλλης αντίδρασης εξαλλοίωσης των ορυκτών (Guthrie, 2001). Μόλις απελευθερωθούν στο υδατικό διάλυμα, τα αλκαλικά μέταλλα μπορούν να αντιδράσουν με το διαλυμένο $CO_2$, ώστε να αποτεθούν ανθρακικά άλατα και ως αποτέλεσμα το $CO_2$ μετατρέπεται σε μία θερμοδυναμικά σταθερή μορφή (Guthrie, 2001). Εδώ, έγκειται και η σημαντικότητα της $CO_2$ μετασωμάτωσης η οποία έχει λάβει μεγαλύτερη προσοχή τα τελευταία χρόνια, γιατί ουσιαστικά δίνει τη δυνατότητα ασφαλούς αποθήκευσης απεριόριστων ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα, με πολύ μικρό ρίσκο διαφυγής (Guthrie, 2001).

Αυτή η διαδικασία μετασωμάτωσης αλλοιώνει τα ορυκτά των σερπεντινιωμένων περιδοτιτών, δηλαδή μετατρέπει τον σερπεντινίτη αρχικά σε σαπωνίτη (ταλκικό-μαγνησιούχο πέτρωμα) και ύστερα σε λιστβενίτη (χαλαζιακό-μαγνησιούχο πέτρωμα), το οποίο είναι και το τελικό προϊόν της εξαλλοίωσης (Klein & McCollom, 2013). Τα ταλκικά-ανθρακικά πετρώματα σχηματίζονται

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



ως αποτέλεσμα αντίδρασης μεταξύ διαλυμάτων πλούσιων σε $H_2O$-$CO_2$ με σερπεντινιωμένα υπερβασικά πετρώματα. Η αρχική υφή του περιδοτίτη εμφανίζεται πολύ έντονα διαταραγμένη και η ορυκτολογική τους σύσταση συνίσταται από τάλκη (45-55 vol.%), ανθρακικά ορυκτά (40-50 vol.%), σπινέλιο ± σερπεντίνη ± χλωρίτη (Bjerga et al., 2015).

Απλοποιημένη αντίδραση μετατροπής σερπεντίνη σε τάλκη κατά την $CO_2$-μετασωμάτωση (Bjerga et al., 2015):

$$2Mg_3Si_2O_5(OH)_4 + 3CO_2 \rightarrow Mg_3Si_4O10(OH)_2 + 3MgCO_3 + 3H_2O$$

σερπεντίνης τάλκης μαγνησίτης

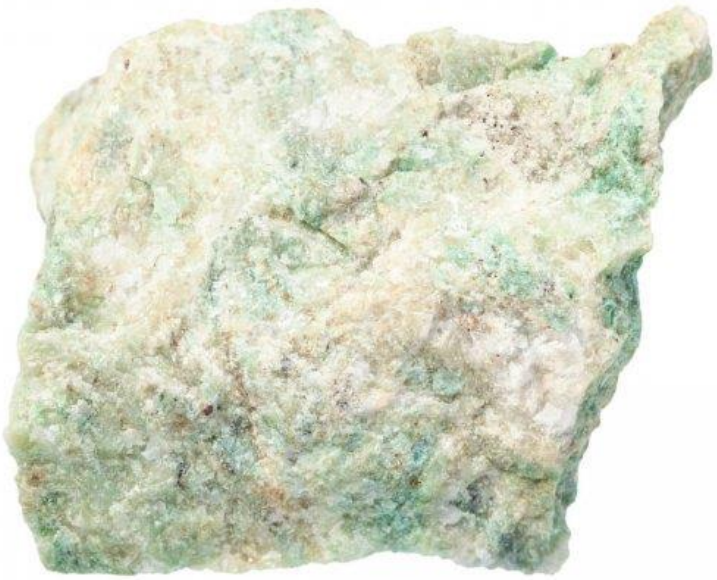
Είναι σημαντικό επίσης, να γίνει αναφορά και στο τελικό προϊόν σχηματισμού αυτής της διαδικασίας, δηλαδή στον λιστβενίτη. Ο λιστβενίτης, αυτό το χαλαζιακό-ανθρακικό πέτρωμα, κατέχει μία ξεχωριστή θέση στον χώρο της γεωλογίας και πιο συγκεκριμένα στο χώρο της κοιτασματολογίας, διότι σχετίζεται άμεσα με κοιτάσματα χρυσού σε περιοχές όπως, η Ρωσία, το Ιράν, η Τουρκία, το Μαρόκο, η Ιρλανδία, ο Καναδάς (π.χ. Buisson & Leblanc, 1986; Aydal, 1990; Halls & Zhao, 1995). Τα μεγαλύτερα κοιτάσματα βρίσκονται στην οφιολιθική ζώνη του Barramiya–Um–Salatit στην Αίγυπτο, όπου η εκμετάλλευση τους ξεκίνησε από την περίοδο των Φαραώ (Belogub et al., 2017). Ο όρος «λιστβενίτης» προτάθηκε από τον Gustav Rose (1837) για να περιγράψει πρασινωπά πετρώματα από το κοίτασμα χρυσού της περιοχής Miass (Ρωσία). Οι λιστβενίτες αποτελούνται κυρίως από χαλαζία, φουξίτη (ποικιλία πλούσιου σε Cr μοσχοβίτη) και από ανθρακικά ορυκτά (μαγνησίτη, δολομίτη), ± αλβίτη (Εικ.6) (Belogub et al., 2017).

Συχνά παρατηρείται, υπερβασικά σώματα που έρχονται σε επαφή με μητρικά πετρώματα πλούσια σε χαλαζία και πλαγιόκλαστα να εμφανίζουν μία ομόκεντρη μετασωματική ζώνωση, με περιδοτιτικό πυρήνα, που περιβάλλεται από μια σερπεντινιτική ζώνη, μια ταλκική-ανθρακική ζώνη, έναν στεατίτη και τέλος έναν χλωριτιώμενο σχιστόλιθο (blackwall) (Chidester & Cady, 1972; Koons, 1981). Ο Bach et al. (2013), με βάση το σύστημα $MgO–SiO_2–H_2O–CO_2$ (MSHC) (για T= 200°C και P= 100 MPa), παραθέτει την ιδανική ακολουθία εξαλλοίωσης, όπου απεικονίζονται έξι ξεχωριστές μετασωματικές ζώνες, οι οποίες σχηματίζονται προοδευτικά κατά την $CO_2$ μετασωμάτωση: (0)σερπεντίνης-βρουσίτης (πρωτόλιθος), (1)σερπεντίνης-βρουσίτης-μαγνησίτης, (2)σερπεντίνης-μαγνησίτης, (3)σερπεντίνης-τάλκης-μαγνησίτης, (4)τάλκης-μαγνησίτης, (5)τάλκης-χαλαζίας-μαγνησίτης και τέλος (6)χαλαζίας-μαγνησίτης

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γε
Α.Π





**Εικόνα 6.** Λιστβενίτης
(https://gr.depositphotos.com/stock-photos/listwaenite.html)

Μέχρι και σήμερα η πηγή του $CO_2$ παραμένει αμφίβολη. Μία πιθανή πηγή θα μπορούσε να είναι η εισροή μεταμορφικού-απελευθερούμενου $CO_2$ και $CH_4$ σε υπόγεια ύδατα, τα οποία ρέουν μέσα σε υπερβασικά πετρώματα (Tzamos et al., 2020). Το πλούσιο σε $CO_2$ νερό θα παράξει μαγνησίτη, αφού αλληλεπιδράσει με σερπεντινίτη ή περιδοτίτη (Tzamos et al., 2020). Αυτό το είδος της αλληλεπίδρασης απαιτεί μία πηγή άνθρακα σε βάθη μεγαλύτερα των 10 χλμ. ($T > 300^oC$) για την απελευθέρωση πτητικών ενώσεων και την ανάμιξή τους με ένα διάλυμα φτωχό σε άνθρακα (Tzamos et al., 2020), χωρίς να εξαιρείται και η ανάμιξη μετεωρικού νερού και υδροθερμικών διαλυμάτων (Pohl, 1990). Άλλοι ερευνητές (Zachmann & Johannes, 1989; Jedrysek & Halas, 1990; Gartzos, 2004; Ilich & Toshovich, 2005) θεωρούν ως πηγή $CO_2$ την οξείδωση οργανικής ύλης σε ιζηματογενείς σχηματισμούς, η οποία έπειτα διηθείται από το μετεωρικό νερό μέσα σε υπερβασικά πετρώματα. Τέλος, πιο πρόσφατα, σύμφωνα με τους Kelemen & Matter (2008) και τον Kelemen et al. (2011) η προέλευση του $CO_2$ είναι αποκλειστικά μετεωρική και αποκλείονται οι μαγματικές/μεταμορφικές διεργασίες και η οξείδωση της οργανικής ύλης ως πιθανές πηγές, κυρίως βασιζόμενοι στο γεγονός πως δεν βρέθηκε καθόλου $^{14}C$ στα κοιτάσματα μαγνησίτη.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



# 3. ΜΕΤΑΣΩΜΑΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

## 3.1 Μετασωματικά κοιτάσματα στην περιοχή του Λαυρίου

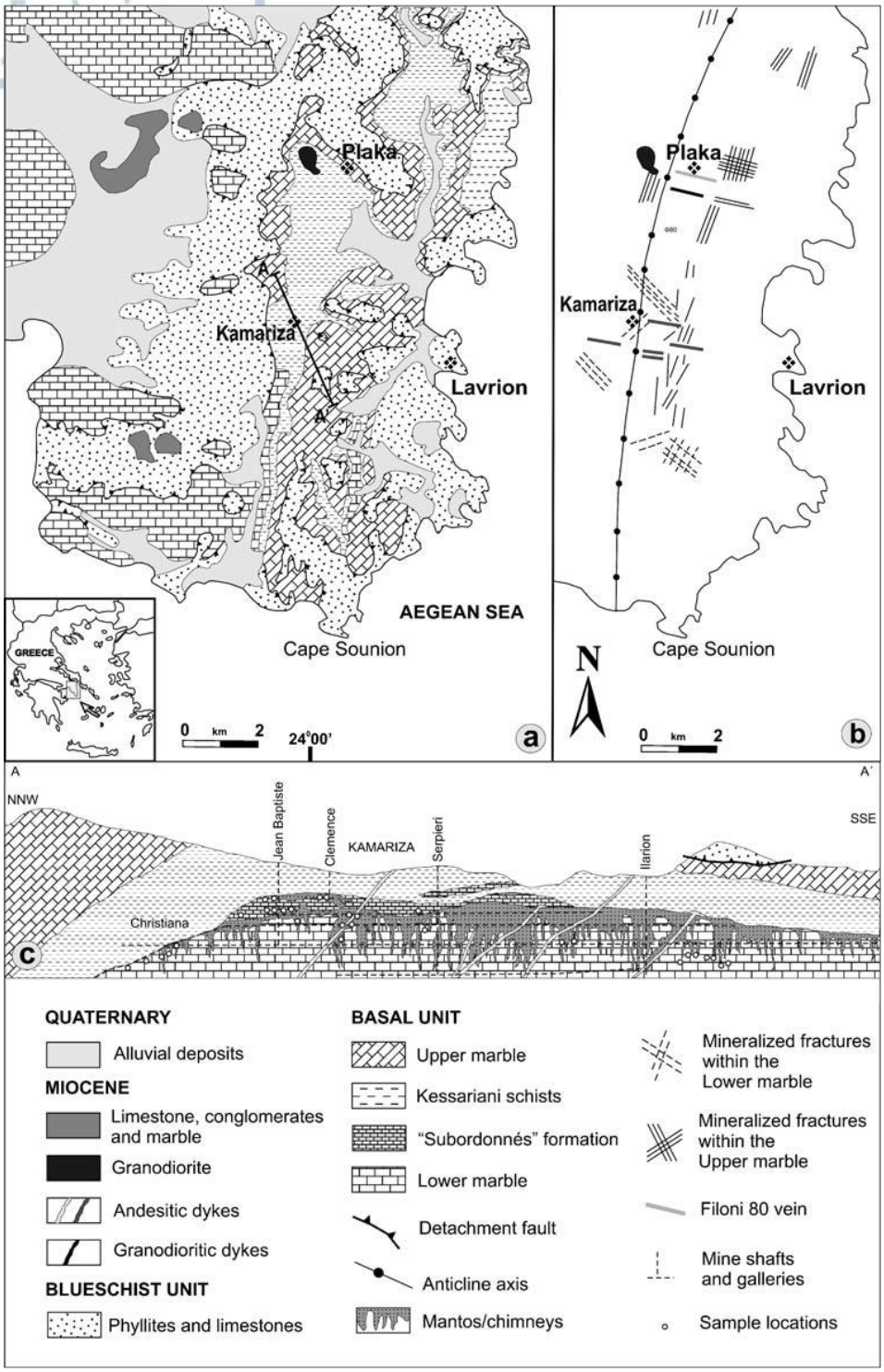
Τα κοιτάσματα αργύρου στην περιοχή του Λαυρίου, βρίσκονται περίπου 50 χλμ. νοτιοανατολικά της Αθήνας και περιέχουν μία ποικιλία από μεταλλοφόρα σώματα, όπως skarn, μετασωματικά και φλεβικά κοιτάσματα (Σολωμός κ.ά., 2004; Skarpelis, 2007; Voudouris et al., 2008). Η περιοχή του Λαυρίου αποτελεί μέρος του Αττικοκυκλαδικού μεταμορφικού πυρήνα, το οποίο αποτελείται από μεταλλοφόρες εμφανίσεις στην Ν. Εύβοια, τη Σίφνο, τη Μύκονο, την Τήνο και την Κύθνο (Vavelidis & Michailidis, 1990; Spry et al., 2006; Voudouris & Spry, 2007). Το Λαύριο αποτελείται από δύο εκτενή μεταλλευτικά κέντρα, την Πλάκα και την Καμάριζα, όπως και πολλά μικρότερα που συνολικά καλύπτουν μία εκταση περίπου 150 χλμ$^2$ (Σχ.8) (Voudouris et al., 2008). Τα ορυκτά από τα οποία συνίστανται κυρίως τα μετασωματικά κοιτάσματα είναι ο σιδηροπυρίτης, ο αρσενοπυρίτης, ο σφαλερίτης, ο γαληνίτης και ο χαλκοπυρίτης, έτσι είναι εμπλουτισμένα σε As, Sb, Ag, Bi, Sn και Au (Voudouris et al., 2008). Η μεταγενέστερη οξείδωση των πρωτογενών σουλφιδίων είχε ως αποτέλεσμα μία εκτεταμένη ζώνη οξείδωσης από την οποία περιγράφτηκαν πάνω από 400 ορυκτολογικά είδη (Katerinopoulos and Zissimopoulou, 1994).

Τα μετασωματικά κοιτάσματα Pb-Zn-Ag ± Au στην περιοχή της Καμάριζας σχετίζονται γενετικά με την τοποθέτηση Μειοκαινικών ανδεσιτικών φλεβών μέσα σε μία ταχέως εκτεινόμενη οπισθοτόξεια λεκάνη, η οποία συνοδεύτηκε με την εκταφή του Αττικοκυκλαδικού μεταμορφικού πυρήνα (Voudouris et al., 2008). Τα ορυκτά δε διαφέρουν ιδιαίτερα στα διάφορα μεταλλοφόρα σώματα και αποτελούνται κυρίως από σουλφίδια, σουλφαρσενίδια, περιοχικά μέταλλα (Au και Bi), θειοάλατα και σουλφοβισμούθια του Ag, Bi, Cu, Pb, As, Sb (Voudouris et al., 2008). Η μικροθερμομετρία ρευστών εγκλεισμάτων έδειξε πως η μεταλλογένεση των μετασωματικών κοιτασμάτων προέκυψε από ένα θερμό ρευστό (100-400$^o$C) με χαμηλή έως μέτρια αλατότητα (1.8-17.3 wt.% NaCl equiv) και οι ευτηκτικές θερμοκρασίες των ρευστών εγκλεισμάτων (έως και -55$^o$C) υποδηλώνουν την ύπαρξη CaCl και NaCl στα ρευστά διαλύματα (Voudouris et al., 2008).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"






**Σχήμα 8.** Μεταλλευτική περιοχή Λαυρίου
a) Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της περιοχής του Λαυρίου (τροποποιημένος από Marinos and Petraschek 1956; Gelaude and Van Kalmthout 1996; b) απλοποιημένος τεκτονικός χάρτης της περιοχής του Λαυρίου (τροποποιημένος από Papastavrou et al. 1987); c) τομή A–A' του κοιτάσματος της Καμάριζας (τροποποιημένος από Marinos and Petraschek 1956).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ



### 3.2 Μετασωματικά κοιτάσματα στην περιοχή της Κασσάνδρας

Η Σερβομακεδονική μεταλλογενετική περιοχή σχηματίζει μία ΒΔ-ζώνη Ολιγοκαινικού-Μειοκαινικού πορφυριτικού Au-Cu, Au skarn και Au πολυμεταλλικών φλεβών και μετασωματικά κοιτάσματα που εκτείνονται από την Σερβία και το Κόσσοβο μέχρι τη Μακεδονία και την μεταλλευτική περιοχή της Κασσάνδρας στη Χαλκιδική (Σχ.9)(Siron et al., 2019). Παρελθοντικές εξορύξεις στην περιοχή Μαντέμ Λάκκος παρήγαγαν κατά προσέγγιση 13.5 εκατ. τόνους Ag-Pb-Zn (Forward et al., 2010). Τα ορυχεία της Ολυμπιάδας και των Μαύρων Πετρών περιέχουν πόρους ίσους με 0.55 εκατ. τόνους με 212 g/t Ag, 8,1% Pb και 11.0% Zn, και 15.1 εκατ. τόνους με 8.97 g/t Au, 146 g/t Ag, 4.9% Pb και 6.5% Zn, αντίστοιχα (Eldorado Gold Corporation, 2017a). Και στην Πιάβιτσα αλλά και στις Σκουριές συναντώνται σημαντικά μέτωπα εξόρυξης, καθιστώντας την Κασσάνδρα μία από τις σημαντικότερες εξορυκτικές βάσεις στη νοτιοανατολική Ευρώπη (Siron et al., 2019). Τα μετασωματικά κοιτάσματα στην περιοχή της Κασσάνδρας βρίσκονται στη Σερβομακεδονική μάζα, η οποία χαρακτηρίζεται από μία περίπλοκη σύνθεση μεταμορφικών πετρωμάτων αμφιβολιτικής φάσης μεταμόρφωσης στην ενδοχώρα του ελληνικού ορογενούς (Burg, 2012).

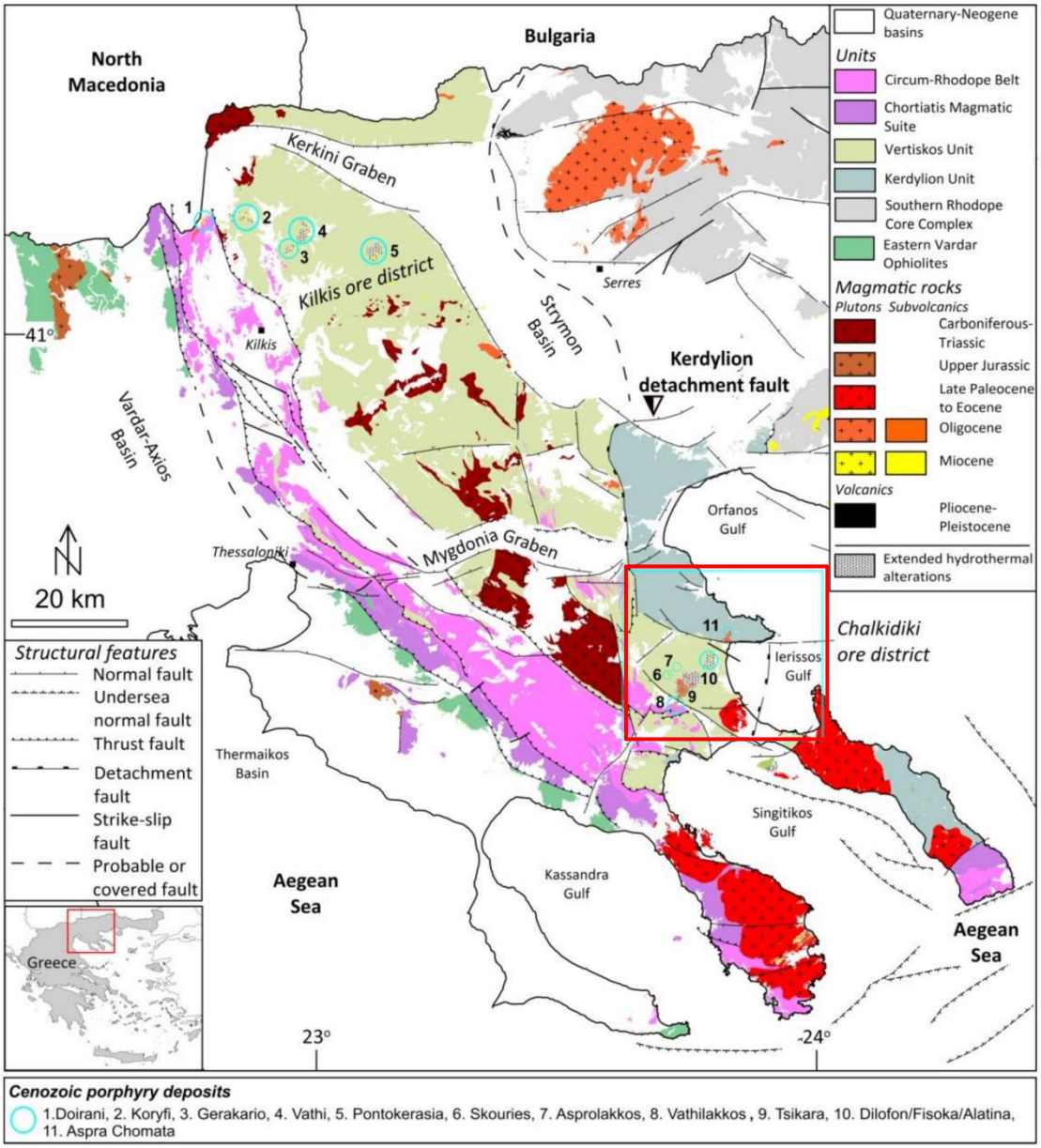
Το κοίτασμα της Ολυμπιάδας τοποθετείται 6 χλμ. βόρεια από το ρήγμα του Στρατωνίου (Σχ.10) (Siron et al., 2019). Τα μεταλλευτικά σώματα αντικατάστασης φιλοξενούνται από γραφιτικό μάρμαρο το οποίο εναλλάσσεται σε στρώσεις μέσα σε βιοτιτικούς γνεύσιους, αμφιβολίτες και πλαγιοκλαστικούς-μικροκλινικούς ορθογνεύσιους (Siron et al., 2016). Η ορυκτολογία των σουλφιδίων αποτελείται από χοντρόκοκκους, μαζώδεις φακούς σφαλερίτη, γαληνίτη και σιδηροπυρίτη και από πυριτικές ζώνες πλούσιες σε αρσενοπυρίτη και σφαλερίτη (Siron et al., 2019). Επιπλέον, ο χαλκοπυρίτης είναι ένα συχνό σουλφίδιο που εμφανίζεται ως έγκλεισμα σε σφαλερίτες ή καταλαμβάνει μικρορωγμές (Kalogeropoulos & Economou, 1987).

Η περιοχή στο ρήγμα του Στρατωνίου φιλοξενεί τα κοιτάσματα του Μαντέμ Λάκκου, των Μαύρων Πετρών και της Πιάβιτσας (Σχ.10). Στα ανατολικά της ρηξιγενούς ζώνης, στο Μαντέμ Λάκκο υπάρχουν εμφανίσεις μεταλλευτικών σωμάτων αντικατάστασης και τύπου skarn, όπως επίσης και στα 2 χλμ. από το Στρατώνι και από τον γρανοδιορίτη της Φισόκας, στα ανατολικά και στα νότια-νοτιοανατολικά αντίστοιχα (Siron et al., 2019). Προηγούμενες έρευνες έχουν δείξει μία χωρική και χρονική σχέση μεταξύ απλιτικών και πορφυριτικών φλεβών του Ολιγόκαινου και της ορυκτογένεσης σουλφιδίων (Gilg & Frei, 1994). Μαζώδη σουλφίδια στο Μαντέμ Λάκκο βρίσκονται μέσα σε φακούς μαρμάρων, όπως και στα δυτικά του Μαντέμ Λάκκου, θειϊκά μεταλλευτικά σώματα στις Μαύρες Πέτρες παρατηρούνται με παρόμοιο τρόπο μέσα σε φακούς μαρμάρων (Nebel et al., 1991; Gilg & Frei, 1994; Siron et al., 2018).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



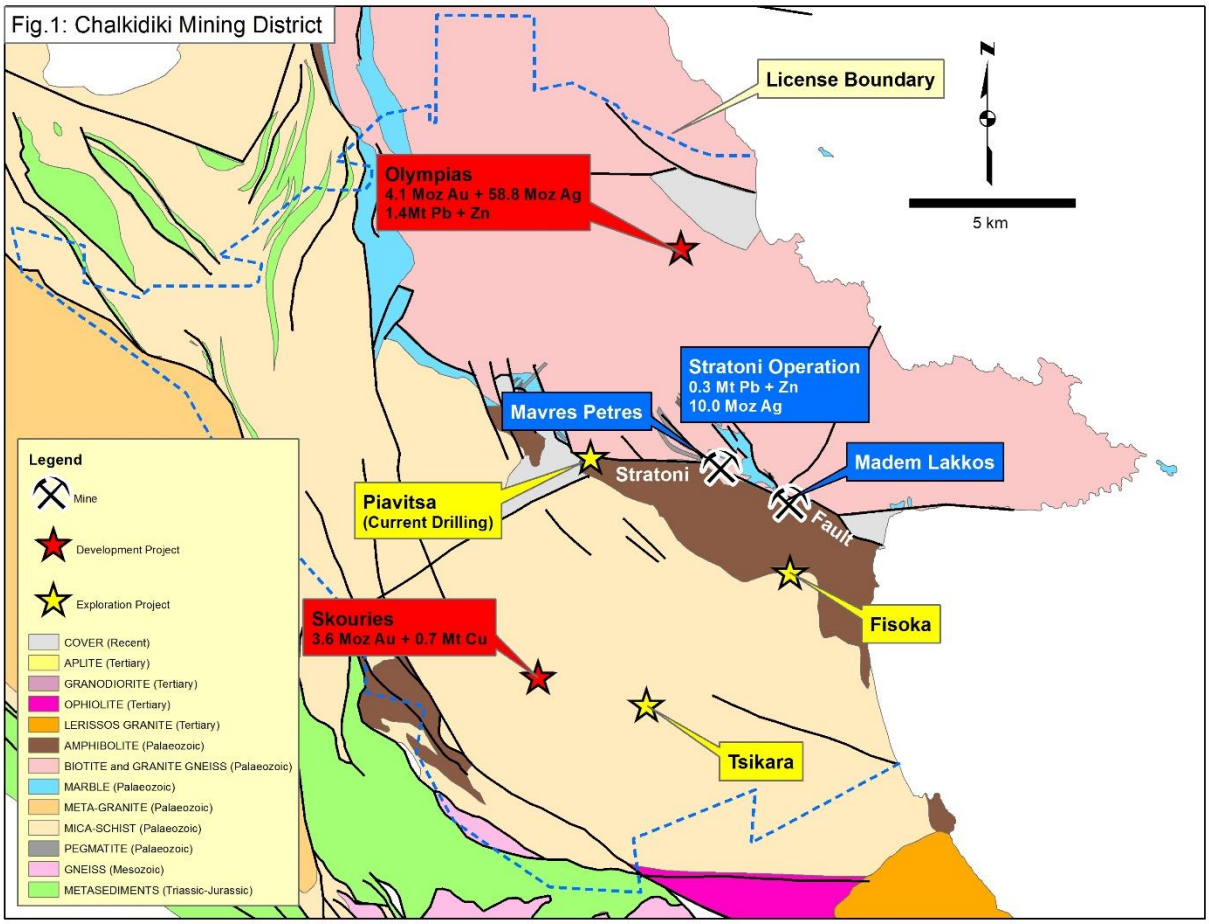



**Σχήμα 9.** Γεωλογικός χώρος των Καινοζωικών μαγματικών πετρωμάτων και συναφή πορφυριτικά κοιτάσματα στην ενότητα του Βερτίσκου (Stergiou et al., 2021)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας






**Σχήμα 10.** Μεταλλευτικά κέντρα στην περιοχή της Κασσάνδρας (https://www.eldoradogold.com/news-and-media/news-releases/press-release-details/2012/Eldorado-Gold-Corporation-Exploration-Update/default.aspx)

### 3.3 Μετασωματικά κοιτάσματα στην περιοχή του Τρίκορφου

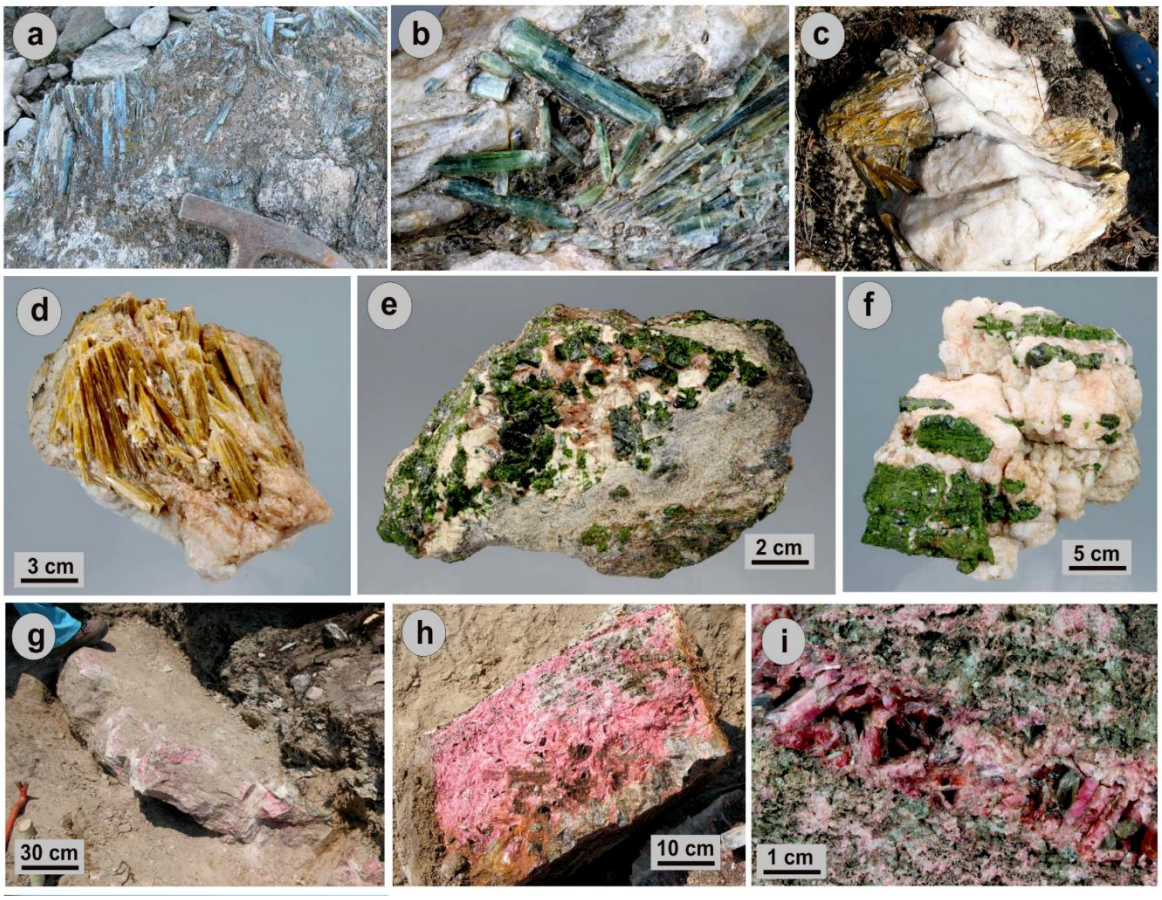
Η περιοχή του Τρίκορφου (Θάσος, μάζα Ροδόπης)(Σχ.11) αντιπροσωπεύει μία μοναδική ορυκτολογική θέση με ορυκτά πλούσια σε Mn, συμπεριλαμβανομένου του κυανίτη, του ανδαλουσίτη, του γρανάτη και του επιδότου (Tarantola et al., 2019). Τα έντονα χρώματά τους και οι μεγάλοι τους κρύσταλλοι (Εικ.7), τους καθιστούν καλούς δείκτες πολύτιμων λίθων, αν και μέχρι στιγμής οι κρύσταλλοι που έχουν βρεθεί είναι πολύ έντονα κερματισμένοι για να μπορέσουν να βγουν στην αγορά (Tarantola et al., 2019). Η λιθολογία που επικρατεί αντιπροσωπεύεται από παραγνεύσιο με γρανάτη-κυανίτη-βιοτίτη-αιματίτη-πλαγιόκλαστο ± σταυρόλιθο ± σιλλιμανίτη. Στα πετρώματα αυτά έχουν καταγραφεί μεταμορφικές συνθήκες 670 ± 40$^{o}$C και 9.1 ±1.3 kbars. Η μετασωμάτωση είναι μάλλον το αποτέλεσμα Μειοκαινικών γρανιτικών διεισδύσεων που σχετίζονται

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



με τις μεταλλοφορείες στο νησί της Θάσου (Tarantola et al., 2019). Αρχικά, οι μετασωματικές αντιδράσεις συνέβησαν κάτω από όλκιμες συνθήκες κοντά στην καμπύλη σταθερότητας του κυανίτη-ανδαλουσίτη, και έπειτα συνεχίστηκε κάτω από ρηξιγενείς συνθήκες, όπως φαίνεται από την ύπαρξη φλεβών που κόβουν τα μεταμορφικά πετρώματα. Έτσι, λοιπόν, το Τρίκορφο μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία πολλά υποσχόμενη περιοχή για την εξερεύνηση πολύτιμων λίθων και μέσω αυτού αναδεικνύεται και η σπουδαιότητα των μετασωματικών διεργασιών για την γένεση πολύτιμων λίθων.

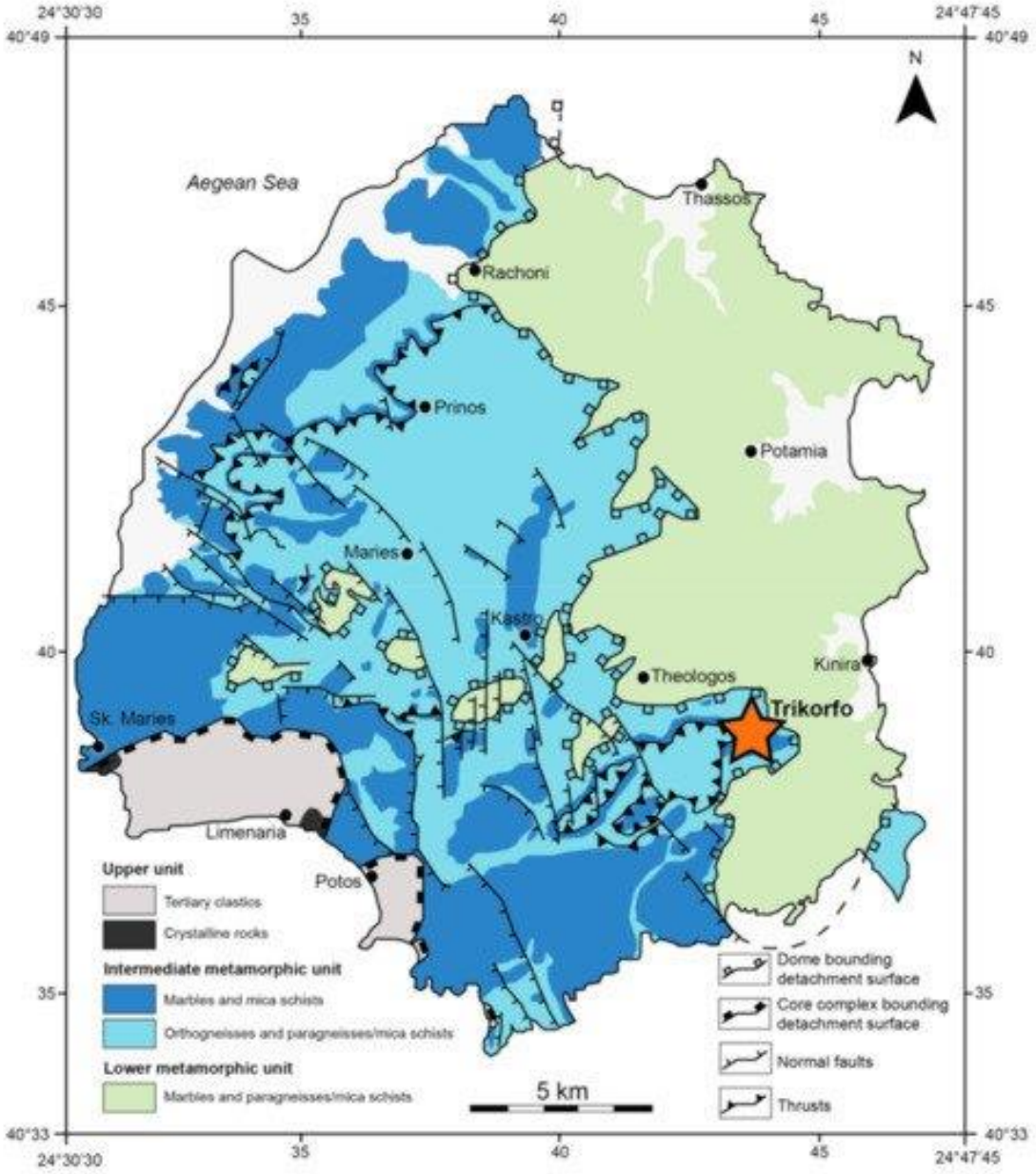



**Εικόνα 7.** Δείγματα από κρυστάλλους στην περιοχή του Τρίκορφου (Voudouris et al., 2019)
(a–d) Μπλε, πράσινος και πορτοκαλί κυανίτης μέσα σε μεταπηλίτες και χαλαζιακές φλέβες; (e,f) Mn-πλούσιος ανδαλουσίτης; (g–i) Ροζ-κόκκινος ζοϊσίτης/κλινοζοϊσίτης

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"






**Σχήμα 11.** Γεωλογικός χάρτης Θάσου (Tarantola et al., 2019)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



## 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η σπουδαιότητα των μετασωματικών διαδικασιών είναι αναμφισβήτητη, αφού είναι υπεύθυνες για την εξέλιξη και την σταθεροποίηση του φλοιού και του μανδύα, όπου το $H_2O$ μπορεί να προκύψει ως ρευστό σε ένα πέτρωμα. Οι χημικές αλλαγές που προκαλούνται από τη μετασωμάτωση συνδέονται άμεσα με τεκτονικές αλλαγές και μαζί ασκούν ισχυρή επιρροή στη δομή του φλοιού, στην εξέλιξη και τη σταθερότητά του. Η εισαγωγή $H_2O$ στο μανδύα μέσω της υποβύθισης, δεν προκαλεί μόνο χημικές αλλαγές αλλά επηρεάζει άμεσα τον ρυθμό κίνησης των πλακών και προκαλεί και άλλες τεκτονικές αλλαγές. Είναι επίσης, υπεύθυνη για πυριγενείς διαδικασίες, όπως τον πλουτωνικό μαγματισμό και τη δημιουργία ηφαιστειακών τόξων κατά μήκος ηπειρωτικών περιθωρίων σχετιζόμενα με ζώνες υποβύθισης.

Το κύριο μέρος της εργασίας επικεντρώθηκε στις διαδικασίες μετασωμάτωσης που λαμβάνουν χώρα στον ωκεάνιο φλοιό. Όπως ήδη αναφέρθηκε, στον φλοιό που ακολουθεί το layer-cake model, δε συμμετέχει η διαχυτική μετασωμάτωση, διότι υπάρχει σχετική ομοιογένεια μεταξύ όλων των πετρωμάτων (βασαλτικά πετρώματα). Άρα, οι ισχυροί παράγοντες που απαιτούνται, ώστε να πραγματοποιηθούν οι χημικές δραστηριότητες για την μεταφορά ύλης δεν υφίστανται. Στον βασαλτικό φλοιό, η μετασωμάτωση περιορίζεται στις υδροθερμικές ζώνες, όπου αναδύονται υδροθερμικά διαλύματα, τα οποία υπόκεινται σε αλλαγές στην πίεση και τη θερμοκρασία και προκαλούν αντιδράσεις αντικατάστασης στο τεμαχισμένο πέτρωμα από το οποίο ανέρχονται. Αυτές οι αντιδράσεις περιλαμβάνουν την αντικατάσταση του πλαγιόκλαστου από μαρμαρυγία (σερικιτίωση), την πυριτίωση και την θείωση. Η χλωριτίωση παρατηρείται στα περιφερειακά και βαθιά τμήματα των υδροθερμικών ζωνών. Δημιουργείται από την αλληλεπίδραση των βασαλτικών πετρωμάτων με διαλύματα παρόμοια με το θαλασσινό νερό, τα οποία δεν έχουν ισορροπήσει με το πέτρωμα. Η ανάμιξη θαλασσινού νερού και υδροθερμικών διαλυμάτων προκαλεί τον σχηματισμό του χλωρίτη, του πυριτίου και του χαλαζία. Στη βάση του συστήματος πολλαπλών φλεβών, παρατηρείται ο σχηματισμός επιδοτιτών, δηλαδή πετρωμάτων πλούσια σε Ca και σε Sr, ενώ υπάρχει έντονη μείωση σε Mg, Na, K, αλλά και σε Cu και Zn. Αυτή η μείωση σε Cu και Zn συσχετίζει τους επιδοτίτες με τη δημιουργία κοιτασμάτων ηφαιστειογενών σουλφιδίων (VMS).

Στον ανομοιογενή φλοιό που τον συναντάμε στις μεσοωκεάνιες ράχες αργού ρυθμού διάνοιξης, οι πετρολογικές αντιθέσεις είναι πολύ πιο έντονες. Πιο συγκεκριμένα, οι αντιθέσεις μεταξύ βασικών και υπερβασικών πετρωμάτων, είναι βασικές για την πρόκληση μετασωματικών διαδικασιών και μεταφοράς ύλης. Η ροδινγκιτίωση είναι ένα παράδειγμα διαχυτικής μετασωμάτωσης. Υπεύθυνα για τον σχηματισμό των ροδινγκιτών είναι διαλύματα πλούσια σε Ca, τα οποία απελευθερώνονται κατά την σερπεντινίωση του πυρόξενου σε υπερβασικά πετρώματα. Όπως

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



και ο σχηματισμός σαπωνιτικών πετρωμάτων, ή αλλιώς στεατίτες, είναι το αποτέλεσμα διάχυσης, κατά την οποία διαλύματα κορεσμένα σε πυρίτιο αντιδρούν με τον σερπεντίνη παράγοντας τάλκη.

Τέλος, παρατηρείται μία ιδιαίτερη περίπτωση μετασωμάτωσης, διότι υπάρχει η ανάμιξη και της διήθησης αλλά και της διάχυσης. Αυτή η διαδικασία είναι η ανθρακοποίηση (carbonation) του σερπεντινίτη, κατά την οποία με την αλλοίωση του σερπεντινιωμένου περιδοτίτη, παράγεται σε πρώτο στάδιο ο σαπωνίτης και σε δεύτερο στάδιο ο λιστβενίτης. Η $CO_2$ μετασωμάτωση θεωρείται αρκετά σημαντική, γιατί μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο για την αποθήκευση $CO_2$. Στο μέλλον, ίσως η σημασία της αποκτήσει ακόμη μεγαλύτερη προσοχή, λόγω των συνεχώς αυξανόμενων ρύπων $CO_2$ στην ατμόσφαιρα.

Επίσης, πρέπει να αναφερθεί η σπουδαιότητα της μετασωμάτωσης για την παραγωγή πολύτιμων κοιτασμάτων. Παγκοσμίως έχουν παρατηρηθεί πολλά κοιτάσματα πολύτιμων μετάλλων, τα οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με τις διαδικασίες της μετασωμάτωσης. Τέτοιες εμφανίσεις έχουν βρεθεί και στον ελληνικό χώρο, με τα σημαντικότερα μετασωματικά κοιτάσματα να έχουν βρεθεί στην περιοχή του Λαυρίου, στην περιοχή της Κασσάνδρας και στην περιοχή του Τρίκορφου. Είναι φανερό, λοιπόν, πως η παρουσία μετασωματικών πετρωμάτων μπορεί να λειτουργήσει ως δείκτης για την ύπαρξη κοιτασμάτων με πολύτιμα μέταλλα.

Η μετασωμάτωση, αν και μία πολύ σπουδαία διαδικασία σε πολλά επίπεδα, ακόμη δεν έχει πάρει την προσοχή που της αξίζει και οι έρευνες για την κατανόηση των διαδικασιών της είναι ακόμη σε αρχικό στάδιο. Περισσότερες έρευνες θα χρειαστεί να γίνουν, ώστε να αποκτηθούν κι άλλες γνώσεις για τις σχέσεις μεταξύ των διαδικασιών και οι οποίες θα μας δώσουν μία πιο συνολική εικόνα. Ο πραγματικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να δώσει τις βάσεις και τις γνώσεις, ώστε να περάσουμε από το θεωρητικό κομμάτι στο πρακτικό, δηλαδή στην εφαρμογή των γνώσεων για την εκμετάλλευση και εξόρυξη κοιτασμάτων, όσο και για την εκμετάλλευση των προϊόντων της μετασωμάτωσης για την χρήση τους σε βιομηχανικό επίπεδο. Τέλος, η παρούσα εργασία αποτελεί έμπνευση για περαιτέρω έρευνα σε ό,τι αφορά τις μετασωματικές διαδικασίες τόσο στον ωκεάνιο φλοιό και στη Γη γενικότερα, όσο και σε κάθε επίγειο σύστημα όπου μπορεί να βρεθεί το $H_2O$.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ



**Βιβλιογραφία**

Anonymous, (1972), Penrose field conference report: *Geotimes, v. 17, no. 12*, 24-25

Alt, J. C. (1995). Subseafloor processes in mid-ocean ridge hydrothermal systems. In *Geophysical Monograph Series* (Vol. 91, pp. 85–114). https://doi.org/10.1029/GM091p0085

Alt, J. C., & Teagle, D. A. H. (1999). The uptake of carbon during alteration of ocean crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00123-4

Austrheim, H., & Prestvik, T. (2008). Rodingitization and hydration of the oceanic lithosphere as developed in the Leka ophiolite, north-central Norway. *Lithos*, *104*(1–4), 177–198. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.12.006

Aydal, D. (1990). Gold-bearing listwaenites in the Araç Massif, Kastamonu, Turkey. *Terra Nova*. https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1990.tb00035.x

Bach, W., Garrido, C. J., Paulick, H., Harvey, J., & Rosner, M. (2004). Seawater-peridotite interactions: First insights from ODP Leg 209, MAR 15°N. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *5*(9). https://doi.org/10.1029/2004GC000744

Bach, W., Jöns, N., & Klein, F. (2013). Metasomatism within the ocean crust. In *Lecture Notes in Earth System Sciences*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28394-9_8

Bach, W., & Klein, F. (2009). The petrology of seafloor rodingites: Insights from geochemical reaction path modeling. *Lithos*, *112*(1–2), 103–117. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.10.022

Barriga, F., & Fyfe, W. S. (1983). Development of rodingite in basaltic rocks in serpentinites, East Liguria, Italy. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. https://doi.org/10.1007/BF00371281

Belogub, E. V., Melekestseva, I. Y., Novoselov, K. A., Zabotina, M. V., Tret'yakov, G. A., Zaykov, V. V., & Yuminov, A. M. (2017). Listvenite-related gold deposits of the South Urals (Russia): A review. *Ore Geology Reviews*, *85*, 247–270. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.11.008

Banerjee, N. R., Gillis, K. M., & Muehlenbachs, K. (2000). Discovery of epidosites in a modern oceanic setting, the Tonga forearc. *Geology*, *28*(2), 151–154. https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<151:DOEIAM>2.0.CO;2

Bjerga, A., Konopásek, J., & Pedersen, R. B. (2015). Talc-carbonate alteration of ultramafic rocks within the Leka Ophiolite Complex, Central Norway. *Lithos*, *227*, 21–36. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.03.016

Bray, I. S. J., & Sanderson, D. (1994). Geochemical Methods for Provenance Studies of Steatite. In *Department of*.

Buisson, G., & Leblanc, M. (1986). Gold-bearing listwaenites (carbonatized ultramafic rocks) from ophiolite complexes. *Metallogeny of Basic and Ultrabasic Rocks*.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Burg, J. P. (2012). Rhodope: From mesozoic convergence to cenozoic extension. Review of petro-structural data in the geochronological frame. In *Journal of the Virtual Explorer*. https://doi.org/10.3809/jvirtex.2011.00270

CHIDESTER, A. H., & CADY, W. M. (1972). Origin and Emplacement of Alpine-type Ultramafic Rocks. *Nature Physical Science*. https://doi.org/10.1038/physci240027a0

Cogley, J. G. (1984). Continental margins and the extent and number of the continents. In *Reviews of Geophysics*. https://doi.org/10.1029/RG022i002p00101

Cogné, J. P., & Humler, E. (2006). Trends and rhythms in global seafloor generation rate. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. https://doi.org/10.1029/2005GC001148

Coleman, R.G., (1967) Low-temperature reaction zones and alpine rocks of California, Oregon, and Washington, *vol 1247, US Geological Survey Bulletin. U.S. Govt. Print. Off*, Washington, DC

Corliss, J. B., Dymond, J., Gordon, L. I., Edmond, J. M., Von Herzen, R. P., Ballard, R. D., Green, K., Williams, D., Bainbridge, A., Crane, K., & Van Andel, T. H. (1979). Submarine thermal springs on the Galápagos Rift. *Science*. https://doi.org/10.1126/science.203.4385.1073

Eldorado Gold Corporation, 2017a, Resources and reserves, www.eldoradogold.com/assets/resources-and-reserves, accessed October 29, 2017.
Ilich——2017b, Eldorado Gold provides an update on 2017 exploration programs, www.eldoradogold.com/news-and-media/news-releases/press-releasedetails/2017/Eldorado-Gold-Provides-an-Update-on-2017-Exploration-Programs/default.aspx, accessed June 26, 2018.

El-Shazly, A. K., & Al-Belushi, M. (2004). Petrology and chemistry of metasomatic blocks from bawshir, Northeastern Oman. *International Geology Review*. https://doi.org/10.2747/0020-6814.46.10.904

Evans, B. W. (1977). Metamorphism of Alpine Peridotite and Serpentinite. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, *5*(1), 397–447. https://doi.org/10.1146/annurev.ea.05.050177.002145

Forward, P., Francis, A., and Liddell, N. (2010), Technical report on the Stratoni project Pb-Zn-Ag deposit, northern Greece: *European Goldfields Limited, NI 43-101 Report,* 54

Fowler, C. M. R. (2012). Ocean floor tectonics. In *Regional Geology and Tectonics*. Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53042-4.00026-1

Fowler, C. M. R. (2020). The Earth: core, mantle and crust. In *Regional Geology and Tectonics: Principles of Geologic Analysis*. https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64134-2.00002-x

Frost, B. R. (1975). Contact metamorphism of serpentinite, chloritic blackwall and rodingite at paddy-go-easy pass, central cascades, Washington. *Journal of Petrology*, *16*(1), 272–313. https://doi.org/10.1093/petrology/16.1.272

Frost, B. R., Beard, J. S., Mccaig, A., & Condliffe, E. (2008). The formation of micro-rodingites from IODP hole U1309D: Key to understanding the process of serpentinization. *Journal of Petrology*. https://doi.org/10.1093/petrology/egn038

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.



Gartman, A., Yücel, M., & Luther, G. W. (2014). An Introduction to the Major Chemical Components Released from Hydrothermal Vents. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, *Ii*, 1–11. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.09105-3

Gartzos, E. (2004). COMPARATIVE STABLE ISOTOPES STUDY OF THE MAGNESITE DEPOSITS OF GREECE. *Bulletin of the Geological Society of Greece*. https://doi.org/10.12681/bgsg.16619

German, C. R., & Von Damm, K. L. (2003). Hydrothermal Processes. In *Treatise on Geochemistry*. https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/06109-0

Gilg, H. A., & Frei, R. (1994). Chronology of magmatism and mineralization in the Kassandra mining area, Greece: The potentials and limitations of dating hydrothermal illites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90289-5

Gilgen, S. A., Diamond, L. W., & Mercolli, I. (2016). Sub-seafloor epidosite alteration: Timing, depth and stratigraphic distribution in the Semail ophiolite, Oman. *Lithos*, *260*, 191–210. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.05.014

Gussone, N., Austrheim, H., Westhues, A., & Mezger, K. (2020). Origin of Rodingite Forming Fluids Constrained by Calcium and Strontium Isotope Ratios in the Leka Ophiolite Complex. *Chemical Geology*, *542*(March), 119598. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119598

Guthrie, J. P. (2001). High-involvement work practices, turnover, and productivity: Evidence from New Zealand. *Academy of Management Journal*. https://doi.org/10.2307/3069345

Halls, C., & Zhao, R. (1995). Listvenite and related rocks: perspectives on terminology and mineralogy with reference to an occurrence at Cregganbaun, Co. Mayo, Republic of Ireland. *Mineralium Deposita*. https://doi.org/10.1007/BF00196366

Harlov, D. E., & Austrheim, H. (2013). Metasomatism and the Chemical Transformation of Rock - The Role of Fluids in Terrestrial and Extraterrestrial Processes. In *Metasomatism and the Chemical Transformation of Rock SE - 8*.

Harper, G. D., Bowman, J. R., & Kuhns, R. (1988). A field, chemical, and stable isotope study of subseafloor metamorphism of the Josephine ophiolite, California-Oregon. *Journal of Geophysical Research*. https://doi.org/10.1029/JB093iB05p04625

Hatzipanagiotou, K., & Tsikouras, B. (2001). Rodingite formation from diorite in the Samothraki ophiolite, NE Aegean, Greece. *Geological Journal*. https://doi.org/10.1002/gj.887

Hess, H. H. (1933a) The problem of serpentinisation and the origin of certain chrysotile asbestos, talc and soapstone deposits. *Ecom. Geol. 28,* 638

Honnorez, J., & Kirst, P. (1975). Petrology of rodingites from the equatorial Mid-Atlantic fracture zones and their geotectonic significance. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. https://doi.org/10.1007/BF00376590

Humphris, S. E., Alt, J. C., Teagle, D. A. H., & Honnorez, J. J. (1998). Geochemical changes during hydrothermal alteration of basement in the stockwork beneath the active TAG hydrothermal mound. *Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific Results*. https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.158.220.1998

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.



Ilich, M.; Toshovich, R. (2005) Geology and Origin the Golesh Vein Magnesite Deposit: A Brief Survey. Available online:http://www.geologicacarpathica.com/data/files/files/special%20issue/I/Ilich_Toshovich.pdf (accessed on 10 July 2020).

Jedrysek, M. O., & Halas, S. (1990). The origin of magnesite deposits from the Polish Foresudetic Block ophiolites: preliminary δ13C and δ18O investigations. *Terra Nova*. https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1990.tb00057.x

Kalogeropoulos, S. I., & Economou, G. S. (1987). STUDY OF SPHALERITE FROM THE CARBONATE-HOSTED Pb-Zn SULFIDE DEPOSITS OF THE EASTERN CHALKIDIKI PENINSULA, NORTHERN GREECE. *Canadian Mineralogist*.

Karakida, Y. (1980). (An amphibolite-rodingite xenolith from Tsubokinohana, Kumamoto prefecture.). *Science Reports, Department of Geology, Kyushu University*.

Katerinopoulos, A., & Zissimopoulou, E. (1994). New mineral occurrences from the Laurium mines, Greece. *Mineralogical Record*.

Kelemen, P. B., Matter, J., Streit, E. E., Rudge, J. F., Curry, W. B., & Blusztajn, J. (2011). Rates and mechanisms of mineral carbonation in peridotite: Natural processes and recipes for enhanced, in situ CO2 capture and storage. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, *39*, 545–576. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-092010-152509

Kelemen, P. B., & Matter, J. (2008). In situ carbonation of peridotite for CO2 storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *105*(45), 17295-17300.

Klein, F., & Bach, W. (2009). Fe-Ni-Co-O-S phase relations in peridotite-seawater interactions. *Journal of Petrology*. https://doi.org/10.1093/petrology/egn071

Klein, F., & McCollom, T. M. (2013). From serpentinization to carbonation: New insights from a CO2 injection experiment. *Earth and Planetary Science Letters*. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.08.017

Kobayashi, S., & Kaneda, H. (2010). Rodingite with Ti-and Cr-rich vesuvianite from the Sartuohai chromium deposit, Xinjiang, China. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*. https://doi.org/10.2465/jmps.081224

Koons, P. O. (1981). A study of natural and experimental metasomatic assemblages in an ultramafic-quartzofeldspathic metasomatic system from the haast schist, South Island, New Zealand. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, *78*(2), 189–195. https://doi.org/10.1007/BF00373780

Koppers, A. A. P., Staudigel, H., & Duncan, R. A. (2003). High-resolution 40Ar/39Ar dating of the oldest oceanic basement basalts in the western Pacific basin. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. https://doi.org/10.1029/2003GC000574

Korzhinskii, D. S. (1957). Physicochemical Principles of Paragenetic Analysis of Minerals.

Korzhinskii, D. S. (1968). The theory of metasomatic zoning. *Mineralium Deposita*. https://doi.org/10.1007/BF00207435

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Koutsovitis, P., Magganas, A., Pomonis, P., & Ntaflos, T. (2013). Subduction-related rodingites from East Othris, Greece: Mineral reactions and physicochemical conditions of formation. *Lithos*. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.04.009

LaFemina, P. C. (2015). Plate Tectonics and Volcanism. In *The Encyclopedia of Volcanoes*. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385938-9.00003-1

Lesher, C. E., & Spera, F. J. (2015). Thermodynamic and Transport Properties of Silicate Melts and Magma. In *The Encyclopedia of Volcanoes* (Second Edi). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385938-9.00005-5

Lewis, B. T. R. (1983). The process of formation of ocean crust. *Science*, *220*(4593), 151–157. https://doi.org/10.1126/science.220.4593.151

Li, X. H., Putiš, M., Yang, Y. H., Koppa, M., & Dyda, M. (2014). Accretionary wedge harzburgite serpentinization and rodingitization constrained by perovskite U/Pb SIMS age, trace elements and Sm/Nd isotopes: Case study from the Western Carpathians, Slovakia. *Lithos*. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.06.001

Lindgren, W. (1925). Metasomatism. *Bulletin of the Geological Society of America*. https://doi.org/10.1130/GSAB-36-247

Moore, D. E., & Rymer, M. J. (2007). Talc-bearing serpentinite and the creeping section of the San Andreas fault. *Nature*, *448*(7155), 795–797. https://doi.org/10.1038/nature06064

Morishita, T., Hara, K., Nakamura, K., Sawaguchi, T., Tamura, A., Arai, S., ... & Kumagai, H. (2009). Igneous, alteration and exhumation processes recorded in abyssal peridotites and related fault rocks from an oceanic core complex along the Central Indian Ridge. *Journal of Petrology*, *50*(7), 1299-1325.

Müller, R. D., Sdrolias, M., Gaina, C., & Roest, W. R. (2008). Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. https://doi.org/10.1029/2007GC001743

Muraoka, H. (1985). Serpentinization reaction responsible for rodingite formation of the Ashidachi ultramafic complex, southwest Japan. *Journal of the Japanese Association of Mineralogists, Petrologists & Economic Geologists*. https://doi.org/10.2465/ganko1941.80.413

Nebel, M. L., Hutchinson, R. W., & Zartman, R. E. (1991). Metamorphism and polygenesis of the Madem Lakkos polymetallic sulfide deposit, Chalkidiki, Greece. *Economic Geology*. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.86.1.81

Nehlig, P., Juteau, T., Bendel, V., & Cotten, J. (1994). The root zones of oceanic hydrothermal systems: constraints from the Samail Ophiolite (Oman). *Journal of Geophysical Research*, *99*(B3), 4703–4713. https://doi.org/10.1029/93JB02663

Nishiyama, T., Yoshida-Shiosaki, C., Mori, Y., & Shigeno, M. (2017). Interplay of irreversible reactions and deformation: A case of hydrofracturing in the rodingite–serpentinite system. *Progress in Earth and Planetary Science*, *4*(1), 1–17. https://doi.org/10.1186/s40645-016-0115-4

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Normand, C., & Williams-Jones, A. E. (2007). Physicochemical conditions and timing of rodingite formation: Evidence from rodingite-hosted fluid inclusions in the JM Asbestos mine, Asbestos, Québec. *Geochemical Transactions*, *8*. https://doi.org/10.1186/1467-4866-8-11

O'Brien, J. P., & Rodgers, K. A. (1973). Alpine-type serpentinites from the auckland province—II. North auckland serpentinites. *Journal of the Royal Society of New Zealand*. https://doi.org/10.1080/03036758.1973.10430605

O'Hanley, D. S., Schandl, E. S., & Wicks, F. J. (1992). The origin of rodingites from Cassiar, British Columbia, and their use to estimate T and P(H2O) during serpentinization. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90119-4

Palandri, J. L., & Reed, M. H. (2004). Geochemical models of metasomatism in ultramafic systems: serpentinization, rodingitization, and sea floor carbonate chimney precipitation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *68*(5), 1115-1133.

Paulick, H., Bach, W., Godard, M., De Hoog, J. C. M., Suhr, G., & Harvey, J. (2006). Geochemistry of abyssal peridotites (Mid-Atlantic Ridge, 15°20'N, ODP Leg 209): Implications for fluid/rock interaction in slow spreading environments. *Chemical Geology*, *234*(3–4), 179–210. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.04.011

Perfit, M. R. (2001). Mid-ocean Ridge Geochemistry And Petrology. In *Encyclopedia of Ocean Sciences*. https://doi.org/10.1006/rwos.2001.0096

Perfit, M. R., & Chadwick, W. W. (1998). Magmatism at mid-ocean ridges: Constraints from volcanological and geochemical investigations. In *Geophysical Monograph Series*. https://doi.org/10.1029/GM106p0059

Pirajno, F. (2013). Effects of metasomatism on mineral systems and their host rocks: Alkali metasomatism, skarns, greisens, tourmalinites, rodingites, black-wall alteration and listvenites. In *Lecture Notes in Earth System Sciences*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28394-9_7

Pohl, W. (1990). Genesis of magnesite deposits - models and trends. *Geologische Rundschau*. https://doi.org/10.1007/BF01830626

Pomonis, P., Tsikouras, B., Karipi, S., & Hatzipanagiotou, K. (2008). Rodingite formation in ultramafic rocks from the Koziakas ophiolite, western Thessaly, Greece: Conditions of metasomatic alteration, geochemical exchanges and T-X(CO2) evolutionary path. *Canadian Mineralogist*, *46*(3), 569–581. https://doi.org/10.3749/canmin.46.3.569

Putnis, A., & Austrheim, H. (2010). Fluid-induced processes: Metasomatism and metamorphism. *Geofluids*, *10*(1–2), 254–269. https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2010.00285.x

Ran, Q., Ren, D., Wang, Y., Tong, M., Sun, Y., Yan, L., Dong, J., Wang, Z., Xu, M., Li, N., Peng, H., Chen, F., Yuan, D., Xu, Q., Wang, S., & Wang, Q. (2019). Volcanic Reservoir Mode. In *Development of Volcanic Gas Reservoirs*. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816132-6.00003-x

Rice, J. M. (1983). Metamorphism of rodingites: part I. Phase relations in a portion of the system CaO-MgO-Al2O3-SiO2-CO2-H2O. *American Journal of Science*.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Richardson, C. J., Cann, J. R., Richards, H. G., & Cowan, J. G. (1987). Metal-depleted root zones of the Troodos ore-forming hydrothermal systems, Cyprus. *Earth and Planetary Science Letters*, *84*(2–3), 243–253. https://doi.org/10.1016/0012-821X(87)90089-6

Ritchie, H., & Roser, M. (2020). *"Energy". Published online at OurWorldInData.org.* Our World In Data.

Rose, G. (1837). *Mineralogisch-geognostische reise nach dem Ural, dem Altai un dem kaspischen meere: bd. Reise nach dem mördlichen Ural und dem Altai* (Vol. 1). Verlag der Sanderschen buchandlung (CW Eichhoff).

Schandl, E. S., & Gorton, M. P. (2012). Hydrothermal alteration and CO 2 metasomatism (natural carbon sequestration) of komatiites in the south-western Abitibi greenstone belt. *Canadian Mineralogist*, *50*(1), 129–146. https://doi.org/10.3749/canmin.50.1.129

Schiffman, P., Smith, B. M., Varga, R. J., & Moores, E. M. (1987). Geometry, conditions and timing of off-axis hydrothermal metamorphism and ore-deposition in the Solea graben. *Nature*. https://doi.org/10.1038/325423a0

Seifritz, W. (1990). CO2 disposal by means of silicates [12]. In *Nature* (Vol. 345, Issue 6275, p. 486). https://doi.org/10.1038/345486b0

Seyfried, W. E., Berndt, M. E., & Seewald, J. S. (1988). Hydrothermal alteration processes at mid-ocean ridges: constraints from diabase alteration experiments, hot-spring fluids and composition of the oceanic crust. *Canadian Mineralogist*, *26* pt *3*, 787–804.

Sharma, R., & Srivastava, P. K. (2014). *Hydrothermal Fluids of Magmatic Origin*. 181–208. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06471-0_9

Siron, C.R., Thompson, J.F.H., Baker, T., Friedman, R., Tsitsanis, P., Russell, S., Randall, S., and Mortensen, J., (2016), Magmatic and metallogenic framework of Au-Cu porphyry and polymetallic carbonate-hosted replacement deposits of the Kassandra mining district, northern Greece: *Society of Economic Geologists, Special Publication 19,* Forward29–55.

Siron, C. R., Rhys, D., Thompson, J. F. H., Baker, T., Veligrakis, T., Camacho, A., & Dalampiras, L. (2018). Structural controls on porphyry Au-Cu and Au-rich polymetallic Carbonate-hosted replacement deposits of the Kassandra mining District, Northern Greece. *Economic Geology*. https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4552

Siron, C. R., Thompson, J. F. H., Baker, T., Darling, R., & Dipple, G. (2019). Origin of AU-rich carbonate-hosted replacement deposits of the Kassandra mining district, northern Greece: Evidence for late Oligocene, structurally controlled, and zoned hydrothermal systems. *Economic Geology*, *114*(7), 1389–1414. https://doi.org/10.5382/econgeo.4664

Skarpelis, N. (2007). The Lavrion deposit (SE Attica, Greece): Geology, mineralogy and minor elements chemistry. *Neues Jahrbuch Fur Mineralogie, Abhandlungen*. https://doi.org/10.1127/0077-7757/2007/0067

Spry PG, Tombros SF, Seymour KSt, Williams-Jones A, Zouzias DP (2006) Geology, mineralogy and geochemistry of granite-hosted gold telluride mineralization at Panormos Bay, Tinos Island, Greece*. GSA, Abstracts with Programs, 38,* 55

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.



Tarantola, A., Voudouris, P., Eglinger, A., Scheffer, C., Trebus, K., Bitte, M., Rondeau, B., Mavrogonatos, C., Graham, I., Etienne, M., & Peiffert, C. (2019). Metamorphic and metasomatic kyanite-bearing mineral assemblages of thassos island (Rhodope, Greece). *Minerals*. https://doi.org/10.3390/MIN9040252

Teagle, D. A. H., Alt, J. C., & Halliday, A. N. (1998). Tracing the chemical evolution of fluids during hydrothermal recharge: Constraints from anhydrite recovered in ODP Hole 504B. *Earth and Planetary Science Letters*. https://doi.org/10.1016/s0012-821x(97)00209-4

Tivey, M. A., Paul Johnson, H., Fleutelot, C., Hussenoeder, S., Lawrence, R., Waters, C., & Wooding, B. (1998). Direct measurement of magnetic reversal polarity boundaries in a cross-section of oceanic crust. *Geophysical Research Letters*. https://doi.org/10.1029/98GL02752

Tzamos, E., Bussolesi, M., Grieco, G., Marescotti, P., Crispini, L., Kasinos, A., Storni, N., Simeonidis, K., & Zouboulis, A. (2020). Mineralogy and geochemistry of ultramafic rocks from rachoni magnesite mine, Gerakini (Chalkidiki, Northern Greece). *Minerals*. https://doi.org/10.3390/min10110934

Valsami, E., & Cann, J. R. (1992). Mobility of rare earth elements in zones of intense hydrothermal alteration in the Pindos ophiolite, Greece. *Geological Society Special Publication*, *60*(60), 219–232. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1992.060.01.13

Vavelidis, M., & Michailidis, K., (1990) Gold composition in the Fe–Pb–Cu–(Ag–Zn) hydrothermal quartz veins of Kallianou area, Southern Evia (Greece). *Bull Geol Soc Greece 32*, 87–96

Von Damm, K. L. (2019). Chemistry of hydrothermal vent fluids. In *Encyclopedia of Ocean Sciences*. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10859-0

Voudouris, P., Melfos, V., Spry, P. G., Bonsall, T. A., Tarkian, M., & Solomos, C. (2008). Carbonate-replacement Pb-Zn-Ag±Au mineralization in the Kamariza area, Lavrion, Greece: Mineralogy and thermochemical conditions of formation. *Mineralogy and Petrology*, *94*(1–2), 85–106. https://doi.org/10.1007/s00710-008-0007-4

Voudouris, P., Melfos, V., Spry, P. G., Bonsall, T., Tarkian, M., & Economou-Eliopoulos, M. (2008). Mineralogical and fluid inclusion constraints on the evolution of the Plaka intrusion-related ore system, Lavrion, Greece. *Mineralogy and Petrology*. https://doi.org/10.1007/s00710-007-0218-0

Voudouris P, Spry PG (2007) The mineralogy and genesis of precious metal telluride deposits of Greece*. GSA Abstracts with Programs, 39,* 625

Wares, R. P., & Martin, R. F. (1980). Rodingitization of granite and serpentinite in the Jeffrey Mine, Asbestos, Quebec. *The Canadian Mineralogist*.

White, W. M., & Klein, E. M. (2013). Composition of the Oceanic Crust. In *Treatise on Geochemistry: Second Edition* (2nd ed., Vol. 4). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00315-6

Yardley, B. W. D. (2013). The chemical composition of metasomatic fluids in the crust. In *Lecture Notes in Earth System Sciences*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28394-9_2

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα

Zachmann, D. W., & Johannes, W. (1989). Cryptocrystalline magnesite. *Magnesite: Geology, Mineralogy, Geochemistry, Formation of Mg-carbonates. Monograph Series on Mineral Deposits*, *28*, 15-28.

Zharikov, V. A., Rusinov, V. L., Marakushev, A. A., Zaraysky, G. P., Omel'yanchenko, B. I., Pertsev, N. N., ... & Podlesski, K. V. (1998). Metasomatism and metasomatic rocks, 489 p.

Σολωμός, Χ., Βουδούρης, Π., & Κατερινόπουλος, Α. (2004). MINERALOGICAL STUDY OF BISMUTH - GOLD - ANTIMONY MINERALIZATION AT THE AREA OF KAMARIZA, LAVRION. *Bulletin of the Geological Society of Greece*. https://doi.org/10.12681/bgsg.16722