

ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Χημική σύσταση.

Η χημική σύσταση των μεταμορφωμένων πετρωμάτων ποικίλλει πάρα πολύ. Μπορεί βέβαια να αντιστοιχεί στη σύσταση του αντίστοιχου πυριγενούς ή ιζηματογενούς πετρώματος, πολλές φορές όμως μπορεί να είναι τελείως διαφορετική από αυτές λόγω μετασωμάτωσης. Παρόλα αυτά είναι δυνατό συχνά να καθορίσουμε τη φύση του αρχικού πετρώματος από τη χημική του σύσταση ακόμη και σε περίπτωση που αυτό έχει τελείως ανακρυσταλλωθεί και ο αρχικός του ιστός καταστράφηκε.

Μερικά χημικά κριτήρια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ιζηματογενή προέλευση ενός μεταμορφωμένου πετρώματος είναι: α) η περίσσεια οξειδίου, η οποία στον υπολογισμό της δυνητικής σύστασης (Norm) εμφανίζεται ως $c(=Al_2O_3$, δυνητικό κορούνδιο). Έαν το c υπερβαίνει το 5% τότε μέχρι 10% η ιζηματογενής προέλευση είναι πιθανή, εάν το c είναι μεγαλύτερο του 10% τότε η ιζηματογενής προέλευση είναι σχεδόν βέβαιη. β) το $K_2O > Na_2O$ σε συνδυασμό με $MgO > CaO$. Το γνώρισμα αυτό είναι χαρακτηριστικό των αργιλωδών πετρωμάτων και κυρίως εκείνων που περιέχουν αξιόλογα ποσά ιλλίτη και μοντμοριλλονίτη. γ) Υψηλές περιεκτικότητες σε SiO_2 πράγμα που σημαίνει πιθανότατα ότι το πέτρωμα ήταν στην αρχή ψαμμίτης ή κερατόλιθος.

Η συνολική χημική σύσταση ενός πετρώματος μπορεί να μείνει σταθερή κατά το μεταμορφισμό (ισοχημική μεταμόρφωση) ή να αλλάζει με την είσοδο ή απομάκρυνση υλικού στο μεταμορφικό σύστημα (αλλοχημική μεταμόρφωση, μετασωμάτωση). Ακόμη και στην ισοχημική μεταμόρφωση μπορούμε να έχουμε ορισμένη μεταφορά υλικού. Το νερό και άλλες πτητικές ουσίες, έστω και σε ελάχιστες ποσότητες, βρίσκονται πρακτικά σε όλα τα πετρώματα. Αυτά ελευθερώνονται με την πυριγενή δραστηριότητα ή άλλες διεργασίες και γίνονται μέσο μεταφοράς υλικού στις μεταμορφικές λειτουργίες. Παρατηρήσεις και πειράματα έχουν αποδείξει ότι η μετασωμάτωση είναι το αποτέλεσμα εισαγωγής ή απομάκρυνσης υλικού με υγρά ή αέρια.

Ορυκτολογία των μεταμορφωμένων πετρωμάτων.

Εφόσον η χημική σύσταση των μεταμορφωμένων πετρωμάτων ποικίλλει τόσο πολύ είναι φανερό ότι η ορυκτολογία τους θα είναι αντίστοιχα διάφορη. Εξάλλου τα μεταμορφωμένα πετρώματα σχηματίζονται κάτω από διάφορες θερμοκρασίες και

πιέσεις. Ακόμη και στην περίπτωση που δεν συμβαίνει καμιά μεταβολή στην ολική σύσταση, είναι δυνατό μια ορυκτολογική ένωση σταθερή κάτω από ορισμένες συνθήκες P, T να αντικατασταθεί από άλλη τελείως διαφορετική κάτω από άλλες συνθήκες P, T.

Πίνακας 27. Πυριτικά ορυκτά των μεταμορφωμένων πετρωμάτων
(με βάση 24 οξυγόνα).

Ορυκτό	Τύπος	Si	Al	Mg	Ca	Fe	Na	K
Χαλαζία	SiO ₂	12						
Ανδαλουσίτης	Al ₂ SiO ₅	~5	~10					
Κορδιερίτης	Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈	~7	~5	~3				
Πυρωπό	Mg ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	6	4	6				
Χλωρίτης	Mg ₅ Al(AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₈	4	~3	~7				
Ενστατίτης	MgSiO ₃	8		8				
Ανθοφυλλίτης	Mg ₇ (Si ₄ O ₁₁) ₂ (OH) ₂	8		7				
Τάλκης	Mg ₃ (OH) ₂ Si ₄ O ₁₀	8		6				
Σερπεντίνης	Mg ₃ (OH) ₄ Si ₂ O ₅	5		8				
Φορστερίτης	Mg ₂ Si ₄	6		12				
Σταυρόλιθος	Fe ₂ Al ₉ Si ₄ O ₂₃ (OH)	4	9		2			
Χλωριτοειδής	Fe ₂ Al ₂ (Al ₂ Si ₂ O ₁₀)(OH) ₄	~4	~8		~4			
Αλμανδίνης	Fe ₂ Al ₂ (SiO ₄) ₃	6	4		6			
Κουμμινγκτονίτης	Fe ₇ (Si ₄ O ₁₁) ₂ (OH) ₂	8			7	8		
Βολλαστονίτης	CaSiO ₃	8				8		
Γροσσουλάρης	Ca ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	6	4			6		
Ζοϊσίτης	Ca ₂ Al ₃ (SiO ₄) ₃ (OH)	~6	~6			~4		
Ανορθίτης	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	6	6			3		
Διοψίδιος	CaMgSi ₂ O ₆	8		4		4		
Τρεμολίτης	Ca ₂ Mg ₅ (Si ₄ O ₁₁) ₂ (OH) ₂	8		5		2		
Ιαδεΐτης	NaAlSi ₂ O ₆	8	4				4	
Αλβίτης	NaAlSi ₃ O ₈	9		3			3	
Καλιούχος άστριος	KAlSi ₃ O ₈	9		3				3
Μοσχοβίτης	KAl ₂ (OH) ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)	6		6				2

Στον πίνακα 27 δίνεται μια σειρά από ορισμένα πυριτικά ορυκτά των μεταμορφωμένων πετρωμάτων με τη χημική τους σύσταση. Οι αριθμοί των κατιόντων στον πίνακα προέρχονται από τους χημικούς τύπους των ορυκτών όταν τους ανάγουμε σε κοινή βάση 24(O, OH) ιόντων. Ο πίνακας αυτός μας δίνει ένα χρήσιμο τρόπο γρήγορης σύγκρισης των ορυκτών έτσι ώστε να μπορούμε να καθορίσουμε ποιες προσθήκες ή αφαιρέσεις χρειάζονται για να μετατραπεί ένα ορυκτό σε άλλο ανάλογης σύστασης καθώς και ποια ορυκτά μπορούν να εμφανιστούν σε πετρώματα ορισμένης σύστασης.

Ισοχημική μεταμόρφωση.

Με τον όρο αυτό εννοούμε τη μεταβολή ενός πετρώματος χωρίς να αλλάξει η χημική του σύσταση. Η γεωχημική έρευνα των διεργασιών της μεταβολής των πετρωμάτων κατά το μεταμορφισμό προϋποθέτει να έχουμε επαρκείς αναλύσεις μεταμορφωμένων πετρωμάτων που προήλθαν από το ίδιο μητρικό πέτρωμα και από διάφορα της μεταμόρφωσης. Αυτό φαινομενικά βέβαια είναι εύκολο, στην πραγματικότητα όμως παρουσιάζει κάποιες δυσκολίες.

Πρώτα θα πρέπει να διασαφηνιστεί, όσο βέβαια είναι δυνατό, ότι το μητρικό πέτρωμα και το προϊόν της μετατροπής αντιστοιχούν στο ίδιο υλικό. Αυτό φαίνεται στην περίπτωση των ιζηματογενών πετρωμάτων όπου ένα ορισμένο στρώμα διατηρεί σε τόσο μεγάλο βαθμό τη σύστασή του ώστε η προμεταμορφική του κατάσταση να μπορεί να θεωρηθεί με βεβαιότητα αμετάβλητη. Το ίδιο μπορεί να συμβεί και με τα μαγματικά μητρικά πετρώματα τα οποία συχνά είναι αρκετά ομοιογενή. Όμως στην πράξη πάρα πολλά ιζηματογενή ή μαγματικά πετρώματα παρουσιάζουν μικρές ετερογένειες όταν τα εξετάζουμε με ευαίσθητες γεωχημικές μεθόδους. Εάν λοιπόν πρέπει να προσδιοριστούν οι διαφορές μεταξύ του μητρικού πετρώματος και του τελικού μεταμορφικού προϊόντος θα πρέπει να είναι γνωστή με ακρίβεια η αρχική ετερογένεια τόσο του πρώτου όσο και του δεύτερου.

Μια δεύτερη δυσκολία προκύπτει από το ότι η μεταβολή των πετρωμάτων γενικά προχωρεί σταδιακά. Έτσι οι μεταμορφικές διεργασίες γίνονται ακανόνιστα δηλαδή ανάλογα με την αρχική σύσταση του πετρώματος. Οι γεωχημικές διαφορές που βρίσκονται σε μια σειρά μεταμορφωμένων πετρωμάτων μπορούν λοιπόν να προέρχονται είτε από αρχικές ετερογένειες ή μπορούν να οφείλονται σε εκλεκτικό μεταμορφισμό. Παραπέρα μπορούν να ερμηνευτούν με εκλεκτικό μεταμορφισμό που

ακολουθεί τις αρχικές ετερογένειες. Το κλειδί για την ερμηνεία στο πολύπλοκο αυτό πρόβλημα μπορεί να βρεθεί ως εξής:

Αν οι διαφορές που υπάρχουν ανάμεσα στο μητρικό πέτρωμα και το πανομοιότυπο μεταμορφωμένο είναι μεγαλύτερες από την ετερογένεια του μητρικού πετρώματος η οποία καθορίστηκε στατιστικά, τότε είναι πολύ πιθανό οι διαφορές αυτές να οφείλονται σε μεταμορφικές αντιδράσεις. Αυτό το συμπέρασμα βγαίνει από τη στατιστική σύγκριση των συγγενετικών σειρών δειγμάτων που προήλθαν κάτω από συνθήκες αυξανόμενου μεταμορφισμού (πίνακας 28).

Τέλος η τελευταία πιθανόν κυριότερη δυσκολία στη γεωχημική μελέτη των μεταμορφωμένων πετρωμάτων προκύπτει από το γεγονός ότι κατά κανόνα οι μεταμορφικές

Πίνακας 28. Μέσες τιμές τυπικών δειγμάτων μεταμορφωμένων πετρωμάτων ηλιθικής προέλευσης. (Από Mason, 1966).

	1	2	3	4	5
	<u>Αργιλικοί</u>	<u>φιλλίτες</u>	<u>Φυλλίτες</u>	<u>Μαρμαρ.</u>	<u>Κινζιγκίτες</u>
		<u>I</u>	<u>II</u>	<u>σχιστόλιθοι</u>	
	<u>σχιστόλιθοι</u>				
SiO ₂	60,15	60,18	61,78	60,42	59,64
TiO ₂	0,76	0,67	0,73	0,91	0,75
Al ₂ O ₃	16,45	17,70	16,54	16,41	17,42
Fe ₂ O ₃	4,04	2,45	2,43	2,85	2,42
FeO	2,90	4,67	5,45	6,84	5,84
MnO	ίχνη	0,16	0,07	0,09	0,13
MgO	2,32	3,01	2,35	3,76	3,82
CaO	1,41	1,52	1,94	0,96	1,82
Na ₂ O	1,01	1,62	1,89	1,60	1,98
K ₂ O	3,60	3,79	4,14	3,25	3,32
H ₂ O ⁺	3,82	3,19	2,32	2,39	2,23
P ₂ O ₅	3,15	0,19	0,27	0,21	0,04
CO ₂	1,46	0,30	-	-	-
C	0,88	0,36	-	-	-
SO ₃	0,58	0,10	-	-	-
S	-	0,08	0,01	0,14	-

αντιδράσεις συμβαίνουν με σύγχρονη αλλαγή αρκετών ανεξαρτήτων παραμέτρων, όπως θερμοκρασίας, ολικής πίεσης, μερικής πίεσης νερού, μερικής πίεσης άλλων πτητικών καθώς και μιας μάλλον ποικίλουσας συγκέντρωσης των χημικών στοιχείων λόγω προσθήκης ή απομάκρυνσης ευκίνητων συστατικών. Στις γεωχημικές έρευνες συνήθως θεωρούμε μόνο μια από τις παραπάνω παραμέτρους παθαίνει μια ελεγχόμενη μεταβολή ενώ τις άλλες θεωρούμε ότι παραμένουν σταθερές. Στην πραγματικότητα βέβαια αυτό δύσκολα συμβαίνει. Για να λύσουμε όμως το πολύπλοκο αυτό πρόβλημα είναι απαραίτητο να αθροίσουμε αρκετές από αυτές τις παραμέτρους, οι οποίες σύμφωνα με τις γεωλογικές εμπειρίες και δεδομένα που έχουμε συνήθως πηγαίνουν μαζί. Από τις μελέτες που έχουν γίνει πάνω σε μια "φυσική σειρά" πετρωμάτων αυξανόμενης γενικής μεταμόρφωσης προκύπτει ότι καμία βασική αλλαγή δεν προκύπτει στη σύσταση καθώς προχωρεί ο μεταμορφισμός. Οι μόνες φανερές μεταβολές είναι η ελάττωση του H_2O και $CaCO_3$ καθώς και η ελάττωση του Fe^{3+} . Έτσι λοιπόν δεχόμαστε ότι σε φυσικές συνθήκες ο γενικός μεταμορφισμός προχωρεί κατά ένα συντηρητικό τρόπο από γεωχημικής πλευράς. Αυστηρά ισοχημικές αντιδράσεις συμβαίνουν, αλλά σπάνια, ιδιαίτερα μέσα στο ίδιο ορυκτό. Η ολική όμως σύσταση του πετρώματος παραμένει γενικά αμετάβλητη. Σαν συμπέρασμα θα μπορούσαμε να πούμε ότι από τη μια πλευρά έχουμε "φυσικές σειρές" αυξανόμενου μεταμορφισμού στις οποίες οι μεταβολές γενικά συμβαίνουν ισοχημικά και οι μετακινήσεις είναι σχετικά περιορισμένες και από την άλλη πλευρά υπάρχουν αλλοχημικές "φυσικές σειρές" που χαρακτηρίζονται από εκτεταμένη μετακίνηση ευκίνητων συστατικών μέσα στο φλοιό της γης. Προφανώς και οι δύο τύποι μπορούν να βρίσκονται συγχρόνως ή και ακόμη να συγχωνεύονται μεταξύ τους μέχρι ένα βαθμό.

Μετασσωμάτωση (Αλλοχημική μεταμόρφωση).

Μεταξύ όλων των δυνατών αλλοχημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν κατά το μεταμορφισμό η έννοια της μετασσωμάτωσης μπορεί να οριστεί ως η ειδική διεργασία της πρακτικά ταυτόχρονης διάλυσης και επαναπόθεσης. Με τη μετασσωμάτωση ένα ορυκτό ή συσσωματώματα ορυκτών αντικαθίστανται από νέα με σύσταση μερικώς ή ολικώς διαφορετική.

Η διεργασία αυτή της άμεσης αντικατάστασης ενός ορυκτού από άλλο είναι προφανώς πολύ μεγάλης σημασίας κατά τη μεταμόρφωση. Η αλλαγή στη σύσταση μπορεί να ποικίλλει ποσοτικά, υπάρχουν όμως πολλές περιπτώσεις κατά τις οποίες πρέπει να υποθέσουμε πλήρη αλλαγή όλων των στοιχείων, διότι δεν παρατηρούνται

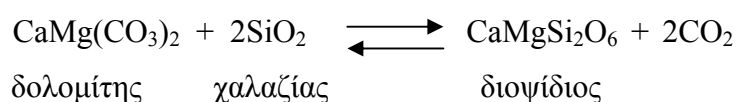
υπολείμματα των προηγούμενων ορυκτών. Σε άλλες περιπτώσεις ορισμένα γεωχημικά "αδρανή" (ακίνητα) στοιχεία παραμένουν, ενώ άλλα ευκίνητα ανταλλάσσονται.

Ποιο από αυτά τα στοιχεία αδρανεί η κινητοποιείται εξαρτάται κατά πολύ από τις PTX-συνθήκες που επικρατούν. Για αυτό το λόγο είναι δύσκολο να καθορίσουμε μια σειρά γεωχημικής κινητικότητας η οποία θα μπορούσε να ισχύει για όλες τις PTX-συνθήκες. Γενικά είναι ευκίνητα εκείνα τα συστατικά τα οποία εύκολα διαλύονται σε υδροθερμικά διαλύματα όπως το Na και K. Αντίθετα το Al μπορεί κάτω από τις περισσότερες συνθήκες του φλοιού της γης να θεωρηθεί μάλλον σαν ακίνητο. Η σειρά από υψηλή προς χαμηλή γεωχημική κινητικότητα που προτάθηκε είναι η παρακάτω:

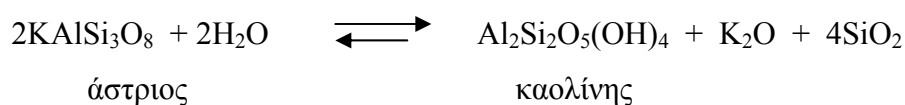
H₂O, CO₂, S, SO₃, Cl, K₂O, Na₂O, F, CaO, O₂, Fe, MgO, SiO₂, P₂O₅, Al₂O₃, TiO₂.

Όπως ήδη αναφέρθηκε η σειρά αυτή μπορεί να ισχύσει μόνο σαν γενική αρχή, διότι παρουσιάζονται πολλές αποκλίσεις που εξαρτώνται από το μεταφορικό μέσο, το βαθμό οξειδωσης κ.λ.π. Όσο αφορά την κινητικότητα μερικών άλλων στοιχείων (π.χ. Pb, Rb, Tl και Au) κατά τη διάρκεια της γενικής (regional) μεταμόρφωσης, δεν έχουμε σαφείς ενδείξεις, ιδιαίτερα στους υψηλούς βαθμούς μεταμόρφωσης.

Πολλές μεταμορφικές αλλαγές δεν είναι ισοχημικές αλλά παρουσιάζουν είσοδο ορισμένων στοιχείων στο πέτρωμα από εξωτερικές πηγές ή και απομάκρυνση άλλων στοιχείων. Οι λειτουργίες αυτές ορίζουν τη μετασωμάτωση. Οι ουσιαστικές μεταβολές επιτυγχάνονται με τη δράση χημικώς ενεργών υγρών και συχνά συμβαίνουν κάτω από συνθήκες σταθερού όγκου πετρώματος έτσι ώστε να έχουμε ελάχιστη διατάραξη του ιστού του. Το νερό και το διοξείδιο του άνθρακα είναι ευκίνητα κατά τη διάρκεια του μεταμορφισμού και μπορούν να διαφύγουν με διαδικασίες αφυδάτωσης και διάσπασης των ανθρακικών αντίστοιχα



ή και να δημιουργηθούν όπως π.χ. κατά το σχηματισμό καολίνη από αλκαλιούχους αστρίους



Πετρώματα που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του φλοιού της γης, όταν μεταμορφώνονται υπόκεινται σε ενυδάτωση και οξείδωση λόγω επίδρασης της ατμόσφαιρας και υδρόσφαιρας. Οι κυριότερες κατηγορίες μετασώματωσης είναι πέντε και κάθε μια συνδέεται με την παρουσία ενός ή περισσοτέρων στοιχείων. Δηλαδή: α) Αλκαλιούχος μετασώματωση. Αλκαλιμέταλλα, β) Ασβεστιούχος μετασώματωση. Ca, γ) Fe – Mg – πυριτική μετασώματωση. Fe, Mg, SiO₂, δ) Βοριούχος μετασώματωση, B, Li, F, Cl, Si, Sn, ε) CO₂ μετασώματωση. CO₂

Η προσθήκη ή απομάκρυνση κυρίων στοιχείων και ιχνοστοιχείων κατά τη μετασώματωση εξαρτάται από την ορυκτολογία των μετασώματουμένων πετρωμάτων και από τη σύσταση των μετασωματικών υγρών. Τα Cl⁻ και CO₃²⁻ είναι άφθονα κατά την πορεία ορισμένων μετασωματικών αντιδράσεων (π.χ. σκαπολιθίωση) και δημιουργούν κατάλληλες συνθήκες για την κινητικότητα πολλών στοιχείων. Το ίδιο ισχύει και για τα F⁻ και SO₄²⁻. Η αλκαλιούχος μετασώματωση είναι δυνατό να ευνοήσει την είσοδο στις αντιδράσεις πολλών ιχνοστοιχείων (εκτός βέβαια από τα Na και K) όπως Nb, Ba, REE, (σπανίων γαιών), Ta και Re. Γενικά η αλκαλιούχος μετασώματωση είναι σημαντική διεργασία· το W και το Tl π.χ. είναι στοιχεία τα οποία κατά μεν τη νατριούχο μετασώματωση τείνουν να απομακρυνθούν, ενώ κατά την καλιούχο να εισαχθούν. Το Ga αντίθετα συνδέεται περισσότερο με τη νατριούχο παρά με την καλιούχο μετασώματωση. Η παρουσία μιας σχετικά υψηλής πτητικότητας θείου μπορεί να προκαλέσει την απελευθέρωση πολλών βαριών μετάλλων όπως Hg, Ag, Sn, Sb, As, W, Mo και Au, τα οποία σχηματίζουν ευδιάλυτες σουλφιδικές και υδροσουλφιδικές ενώσεις. Τα διάφορα αλκαλικά διαλύματα πιθανόν λειτουργούν σαν μέσα μεταφοράς για μερικά ελαφρύτερα στοιχεία π.χ. το Be σχηματίζει σταθερά και ευδιάλυτα ανθρακο-βηρυλικά σύμπλοκα σε αλκαλικά διαλύματα και σε περιοχές pH 7-12.

Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει προκειμένου να προσδιορισθεί η φύση και σύσταση των μετασωματικών υγρών. Διαλύματα ή αέρια πλούσια σε αλογόνα δρουν σαν μεταφορικά μέσα για πολλά στοιχεία όπως τα αλκαλιμέταλλα και τις αλκαλικές γαίες. Τα αλογόνα, κυρίως το χλώριο, είναι δυνατό να παίζουν σημαντικό ρόλο στις αλλοιώσεις των πετρωμάτων, όπως π.χ. στην σερπεντινίωση. Για τις αντιδράσεις μετατροπής του φορστεριτικού ολιβίνη σε σερπεντίνη επικρατούσε η άποψη ότι χρειαζόταν η παρουσία μόνο νερού για να σχηματιστεί σαν δεύτερο προϊόν βρουσίτης.

κ.λ.π. Κάτω από αυτές τις συνθήκες μπορεί να έχουμε ένα αξιόλογο τοπικό εμπλουτισμό των προϊόντων της αντίδρασης. Αν όμως οι χημικές διαφορές είναι μικρές, τα προϊόντα της αντίδρασης συχνά διασκορπίζονται και η τοπική συγκέντρωση νεοσωματικών ορυκτών είναι γενικά μικρή. Αυτό έχει πολύ μεγάλη σημασία σε ότι αφορά τις μετασωματικές μεταλλευματικές αποθέσεις.

Εάν ο βαθμός της αντίδρασης είναι μικρός και η διεισδυτικότητα μεγάλη, τότε η αντίδραση της μετασώματωσης συμβαίνει σαν ένα είδος διήθησης ή εμπότισης. Σ' αυτή την περίπτωση το όριο μεταξύ παλαιοσώματος και νεοσώματος είναι μάλλον ακανόνιστο.

Εάν ο βαθμός αντίδρασης του παλαιοσώματος είναι μεγάλος και η διεισδυτικότητά του μικρή, σχηματίζεται ένα μετασωματικό μέτωπο. Σ' αυτή την περίπτωση το όριο μεταξύ του παλαιοσώματος και του νεοσώματος είναι κατά πάσα πιθανότητα συνεχές.

Θα πρέπει να τονιστεί επίσης, ότι πλήρης μετασώματωση ακόμη και παλαιοσωμάτων που διαφέρουν πάρα πολύ, μπορεί να δώσει στο τέλος ένα σχεδόν ομοιόμορφο νεόσωμα. Η ταξινόμηση των μετασωματικών πετρωμάτων και μεταλλευμάτων βασίζεται στο γεωχημικό χαρακτήρα του νεοσώματος επειδή το παλαιόσωμα κατά κανόνα έχει αλλοιωθεί όσο αφορά την αρχική του σύσταση.

Κινητικοί μηχανισμοί κατανομή των στοιχείων στα πετρώματα.

Η γένεση τόσο των πυριγενών όσο και των μεταμορφωμένων πετρωμάτων συνεπάγεται την κίνηση διαφόρων χημικών ουσιών σε ευρεία κλίμακα. Η φύση, ταχύτητα και διάρκεια των διαδικασιών δημιουργίας ενός πετρώματος έχουν άμεση σχέση με τη χημική σύσταση του τελικού προϊόντος. Το να συμπεράνει κανείς την πετρολογική ιστορία ενός πετρώματος είναι πολύ δύσκολο διότι πολλές φορές συμβαίνουν διαδικασίες και αντιδράσεις που δεν γίνονται αντιληπτές στον παρατηρητή. Γι αυτό λοιπόν δεν είναι περίεργο το γεγονός ότι θέτουμε σαν απαραίτητους μερικούς περιορισμούς όταν προσπαθούμε να προσδιορίσουμε την προέλευση ενός πετρώματος, όπως π.χ. ότι κατά τη γενική μεταμόρφωση τα πετρώματα συμπεριφέρονται σαν κλειστό χημικό σύστημα.

Έτσι κατά η δημιουργία των πυριγενών πετρωμάτων διακρίνουμε γενικά τρία στάδια μεταβολών:

- α) Γένεση του συστήματος.
- β) Μεταφορά και κατά τόπους συγκέντρωση του μάγματος.

γ) Στερεοποίηση του μάγματος.

Οι επιμέρους διαδικασίες των τριών αυτών σταδίων είναι οι εξής:

α) Γένεση του μάγματος.

1. Φύση και σύσταση του αρχικού υλικού .
2. Ταχύτητα και βαθμός της τήξης του αρχικού υλικού.
3. Ταχύτητα και βαθμός αποχωρισμού της υγρής φάσης από τη στερεά κατά τη διάρκεια της τήξης.
4. Φυσικοχημικές συνθήκες της τήξης: T, P, P_{H2O} κ.λ.π.

β) Μεταφορά και κατά τόπους συγκέντρωση του μάγματος .

1. Αντίδραση του μάγματος με τα περιβάλλοντα πετρώματα.
2. Κλασματική κρυστάλλωση ή διαχωρισμός κατά τη μεταφορά του μάγματος.
3. Ανάμιξη διαφόρων μαγμάτων.
4. Τρόπος συσσώρευσης κατά χώρους (reservoir) του μάγματος.

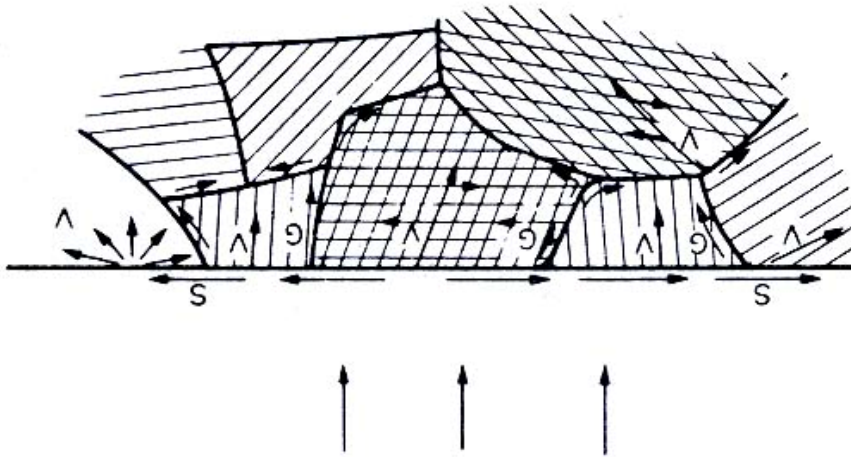
γ) Στερεοποίηση του μάγματος.

1. Φυσικοχημικές συνθήκες κρυστάλλωσης, P, T κ.λ.π.
2. Ταχύτητα ψύξης και κρυστάλλωσης.
3. Έκταση κλασματικής κρυστάλλωσης.
4. Άνοιγμα του μαγματικού συστήματος. (Το στάδιο αυτό μπορεί να περιλαμβάνει διαφυγή πτητικών, αντίδραση του μάγματος με υπόγεια νερά κ.λ.π.).

Σ' όλη την παραπάνω ομάδα μεταβολών θα μπορούσαμε να προσθέσουμε και ένα αριθμό διαδικασιών που συμβαίνουν μετά τη στερεοποίηση.

Διάχυση

Οι ταχύτητες με τις οποίες συμβαίνουν ορισμένες λειτουργίες στη γεωλογία είναι δυνατό να εξαρτώνται από το είδος και το βαθμό διάχυσης των χημικών συστατικών στο σύστημα. Οι διαδικασίες αλλοίωσης των πετρωμάτων ρυθμίζονται εν μέρει από αυτή την ίδια τη διάχυση των χημικών συστατικών στην επιφάνεια του πετρώματος ή κατά μήκος των περιθωρίων των κρυστάλλων ή και ακόμη δια μέσου του κυρίως σώματος του κόκκου του ορυκτού (Σχ. 20). Οι ταχύτητες της ανάπτυξης των κρυστάλλων μπορούν να εξαρτώνται από τις ταχύτητες διάχυσης στο τήγμα ή στο μάγμα.



Σχήμα 20. Σχηματική αναπαράσταση των τρόπων που ακολουθεί η διάχυση.

(Από Mason and Moore, 1982).

1. Επιφανειακή διάχυση (S).
2. Διάχυση στις επαφές των κόκκων (G).
3. Διάχυση μέσα στους κόκκους (V).

Διάχυση στα τήγματα.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές μελέτες πάνω στη διάχυση που συμβαίνει σε πυριτικά τήγματα. Ειδικότερα μελετήθηκε η διάχυση των αλκαλίων, των αλκαλικών γαιών και των μεταβατικών στοιχείων (transition elements). Τα δεδομένα που έχουμε μας βοηθούν να βγάλουμε τα παρακάτω συμπεράσματα:

α) Πολλά κατιόντα (όχι όμως όλα) διαχέονται με μεγαλύτερες ταχύτητες σε ένα βασαλτικό τήγμα παρά σε ένα πιο όξινο.

β) Οι ενέργειες ενεργοποίησης (activation energies) των διάφορων κατιόντων όσον αφορά τη διάχυση σε ένα βασαλτικό τήγμα δεν είναι ούτε σταθερά μεγαλύτερες ούτε μικρότερες από τις ενέργειες ενεργοποίησης των κατιόντων σε ένα πιο όξινο τήγμα.

γ) Φαίνεται να υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ ενέργειας ενεργοποίησης και της ιοντικής ακτίνας για κατιόντα με ορισμένη κατάσταση οξείδωσης. Π.χ. σε ένα βασαλτικό τήγμα η ενέργεια ενεργοποίησης αυξάνει όταν αυξάνεται η ιοντική ακτίνα των M^+ ιόντων αλλά ελαττώνεται σε σχέση με την ακτίνα σε ορισμένα M^{3+} ιόντα.

δ) Προσθήκη νερού σε γρανιτικό τήγμα μπορεί να αυξήσει τις σταθερές διάχυσης των κατιόντων κατά αρκετές τάξεις μεγέθους.

Διάχυση στα στερεά σώματα.

Τα δεδομένα που έχουμε σχετικά με τη διάχυση στα πυριτικά πετρώματα βοηθούν τους πετρολόγους στο να καθορίσουν τις ταχύτητες των μεταμορφικών αντιδράσεων ή να προσδιορίσουν διαδικασίες χημικής εξισορρόπησης στα συστήματα των πυριγενών πετρωμάτων. Οι ταχύτητες διάχυσης των περισσοτέρων ιόντων στα ορυκτά είναι πολύ μικρές, αλλά σημαντικές μέσα στα πλαίσια του παράγοντα "γεωλογικός χρόνος".

Η διάχυση των ιόντων στο πλέγμα των κρυστάλλων μπορεί να συμβεί με ένα από τους παρακάτω τέσσερις μηχανισμούς:

(α) Μηχανισμός ανταλλαγής θέσεων γειτονικών ατόμων ή ιόντων. Ο μηχανισμός αυτός παρουσιάζει υψηλή ενεργοποίηση (activation energy).

(β) Ενδόθετος μηχανισμός κατά τον οποίο ιόντα (ή άτομα) σχετικά μικρού μεγέθους μπορούν να μετακινηθούν από μία θέση μέσα στη δομή σε μία άλλη. Μ' αυτή τη λειτουργία συνδέεται χαμηλή ενεργοποίηση.

(γ) Μηχανισμός κατά τον οποίο ένα άτομο (ή ιόν) εκτοπίζεται από μία θέση πλευρική της δομής σε μία μεσοδιαστημική θέση, από άλλο άτομο παρόμοιου μεγέθους το οποίο στη συνέχεια καταλαμβάνει στην πλευρική θέση του προηγούμενου. Η ενεργοποίηση γι' αυτό το μηχανισμό είναι σχετικά υψηλή.

(δ) Μηχανισμός κενών ή ελλειπών θέσεων που είναι και ο πιο κοινός στις περιπτώσεις διάχυσης ατόμων στο πλέγμα. Κατ' αυτόν άτομα γειτονικά σε μια κενή ή ελαττωματική θέση ενός κρυσταλλικού πλέγματος, μετακινούνται προς αυτή τη θέση και μ' αυτό τον τρόπο δημιουργούν πίσω τους μια νέα κενή θέση η οποία με τη σειρά της μπορεί να καλυφθεί από άλλο άτομο και ούτω καθεξής.

Έχει παρατηρηθεί ότι για κάθε στοιχείο λειτουργεί και διαφορετικός μηχανισμός διάχυσης. Π.Χ. η διάχυση των αλκαλίων στο ορθόκλαστο ελαττώνεται και η ενεργοποίηση αυξάνει όταν αυξάνει η ιοντική ακτίνα. Η μεγάλη διαφορά όμως μεταξύ της ικανότητας προς διάχυση των Na, K και Rb πιστοποιεί τη δράση διαφορετικών μηχανισμών. Έχει παρατηρηθεί ότι το Na διαχέεται με τον (β) μηχανισμό, ενώ το K και Rb με τον (δ) ή ίσως τον (γ) μηχανισμό. Επίσης έχει βρεθεί ότι η διάχυση κατιόντων στους ολιβίνες διέπεται από τον (δ) μηχανισμό ενώ στα σουλφίδια από τον (β).

Γενικά παρατηρούμε ότι οι ταχύτητες διάχυσης είναι πολύ μικρές για αντιδράσεις που αφορούν κρυσταλλικές φάσεις, είναι όμως σημαντικές κατά τη διάδοση και κατανομή

των στοιχείων στο φλοιό της γης. Οποσδήποτε η κινητοποίηση των στοιχείων είναι ταχύτερη όταν υπεισέρχεται στο σύστημα μια ρευστή φάση.