

ΕΙΜΑΣΤΕ ΜΟΝΟΙ ΣΤΟ ΣΥΜΠΑΝ; ΟΙ ΜΕΤΕΩΡΙΤΕΣ ΔΙΝΟΥΝ ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ;

Μπαζιώτης Ι.^{1,2} και Taylor L.A.³

¹ Τμήμα Ορυκτολογίας, Πετρολογίας και Οικονομικής Γεωλογίας, Σχολή Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, ibaziotis@geo.auth.gr; baziotis@metal.ntua.gr

² Department of Geosciences, University of Perugia, 06100, Perugia, Italy

³ Planetary Geosciences Institute, Department of Earth and Planetary Sciences, University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA

Abstract

The humankind, despite the recent technological achievements, does not yet have the ability to carry out routine trips to nearby celestial bodies. However, space science is a reality. The "Apollo" missions, that took place during the period 1969-1972, included the moon landing, the walk of astronauts and collection of valuable samples. Since then, no similar space journey has been carried out. The possibility for future missions such as the return to the Moon or Mars, or to an asteroid (e.g., Vesta), seems small enough to be implemented in the next decades. Nevertheless, nature has the mechanism and procedures to resolve this problem by sending extra-terrestrial rocks in earth in the form of meteorites. Meteorite fall on Earth is a major event, as it reveals important information about the primordial stages of formation of our solar system, or the creation processes of other planets. However, the big question still remains; whether these rocks host or have traces of past life in turn employs researchers in the last twenty years. McKay et al. (1996) studied the meteorite ALH 84001 originating from Mars, claimed for important discoveries such as structures corresponding to nanobacteria.

In the current paper, we focus on the origin of Martian meteorites, presenting their complete geological history; from the genesis of their protoliths till their falling to the earth. We attempt to shed light in the understanding of meteorite formation using mineralogical-petrological-geochemical data, and the assignment of timing for each event based upon contemporary geochronological data. Recently, studies of the Martian meteorite Tissint, allegedly discovered structures rich in carbon and oxygen. Furthermore, recent field observations from Curiosity rover, indicates the existence of surface water that flowed once in the past at the Martian surface. We conclude that the planet Mars might not be a "dead" planet. But it turns out that many of the meteorites that reach the Earth, have undergone a complex history which is associated with the development of very high pressures and temperatures on the surface of the planet (e.g., Mars) from which they originate, able to destroy any trace of life before them. After all, we should be very sceptic and evaluate all the possibilities before the acceptance for the existence of life out there.

Key words: Tissint, Mars, planetology, life.

Περίληψη

Ο άνθρωπος, παρά τα τεράστια άλματα τεχνολογικής ανάπτυξης που έχει κάνει, δε διαθέτει ακόμα τη δυνατότητα για να πραγματοποιήσει ταξίδια ρουτίνας σε κοντινά ουράνια σώματα. Ωστόσο, η θεμελίωση της Διαστημικής Επιστήμης είναι προ-ετών μία πραγματικότητα. Οι Αποστολές Apollo, που έλαβαν χώρα κατά το χρονικό διάστημα 1969-1972, περιελάμβαναν την προσελήνωση, τον περίπατο των αστροναυτών και τη συλλογή πολύτιμων δειγμάτων. Έκτοτε, δεν έχει πραγματοποιηθεί άλλο όμοιο ταξίδι του ανθρώπινου είδους. Η πιθανότητα πραγματοποίησης μελλοντικών αποστολών όπως η επιστροφή στη Σελήνη, ή στον πλανήτη Άρη, ή σε κάποιο αστεροειδή (π.χ. Εστία), φαντάζει αρκετά μικρή ώστε να υλοποιηθεί ακόμα και τις επόμενες δεκαετίες. Παρολαυτά, η φύση, έχει το μηχανισμό και τις διαδικασίες επίλυσης αυτού του προβλήματος, καθώς «στέλνει» εξω-γήινα κομμάτια πετρώματος με τη μορφή μετεωρίτη, στη Γη. Η πτώση μετεωριτών στη Γη αποτελεί ένα σημαντικό γεγονός, καθώς αποκαλύπτουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τα αρχέγονα στάδια σχηματισμού του ηλιακού μας συστήματος, την ηλικία και τη διαδικασία δημιουργίας άλλων πλανητών. Ωστόσο, το μεγάλο ερώτημα, αν φιλοξενούν ή μπορούν να φιλοξενήσουν ίχνη που υποδηλώνουν ζωή απασχολεί τους ερευνητές τα τελευταία είκοσι χρόνια. Η επιστημονική ομάδα υπό την αιγίδα του καθηγητή McKay το 1996 στα πλαίσια μελέτης του μετεωρίτη ALH 84001 με προέλευση τον πλανήτη Άρη, υποστήριξε ότι ανακάλυψε δομές που αντιστοιχούν σε νανοβακτήρια.

Στην παρούσα εργασία εστιάζουμε στους μετεωρίτες με προέλευση τον πλανήτη Άρη, παρουσιάζοντας την ιστορία από τη γέννηση των πρωτολίθων τους, μέχρι και τη στιγμή που προσκρούουν στη γη. Γίνεται προσπάθεια να κατανοηθεί ο τρόπος δημιουργίας ενός μετεωρίτη χρησιμοποιώντας ορυκτολογικά-πετρολογικά-γεωχημικά στοιχεία, και η τοποθέτηση του κάθε γεγονότος στο χρόνο με βάση σύγχρονα γεωχρονολογικά δεδομένα. Σε πρόσφατες μελέτες του μετεωρίτη Tissint, έχοντας επίσης προέλευση από τον πλανήτη Άρη, υποστηρίζεται ότι ανακαλύφθηκαν δομές πλούσιες σε άνθρακα και οξυγόνο. Επίσης πρόσφατες επιτόπιες παρατηρήσεις από το διαστημικό όχημα Curiosity, υποδεικνύουν την ύπαρξη επιφανειακού νερού που έρεε κατά το παρελθόν στην επιφάνεια του πλανήτη Άρη. Με βάση τα προηγούμενα, καταλήγουμε ότι ο πλανήτης Άρης ίσως να μην αποτελεί ένα «νεκρό» πλανήτη. Αποδεικνύουμε όμως ότι πολλά από τα πετρώματα που φθάνουν στη Γη, έχουν υποστεί μία πολύπλοκη ιστορία η οποία συνδέεται με την ανάπτυξη εξαιρετικά μεγάλων πιέσεων και θερμοκρασιών στην επιφάνεια του πλανήτη από τον οποίο προέρχονται, ικανών να καταστρέψουν οποιοδήποτε ίχνος ζωής πριν από αυτές. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αξιολόγηση των μελετών να γίνεται με σύνεση πριν αναντίρρητα αποδειχθεί το γεγονός ύπαρξης ζωής.

Λέξεις κλειδιά: Tissint, Άρης, πλανητολογία, ζωή.

1. Εισαγωγή

Άρης, ένας από τους Ολύμπιους θεούς που λάτρευε τον πόλεμο, συνάμα είναι και ο πλανήτης που προκαλεί θαυμασμό σε όλο τον κόσμο. Είναι ο κόκκινος πλανήτης και αυτός που αποτελεί τον πλησιέστερο προς τη Γη διαστημικό γείτονα, μετά τη Σελήνη. Μέχρι σήμερα, ο άνθρωπος, δεν είχε την τεχνολογική υποδομή για τη συλλογή πετρωμάτων απευθείας από το έδαφος του πλανήτη Άρη. Ωστόσο, ισχυρές συγκρούσεις άλλων σωμάτων στην επιφάνειά του, προκάλεσαν την αποκόλληση πετρωμάτων διαφόρων μεγεθών, αλλά και λεπτόκοκκης σκόνης. Όλα τα υλικά διέφυγαν και ταξίδευσαν στο αχανές διάστημα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το υλικό αυτό, μετά από το αστρικό ταξίδι εκατομμυρίων ετών φθάνει και διαπερνά την ατμόσφαιρά της Γης. Όταν επιβιώσει της τριβής κατά τη διέλευση από τη γήινη ατμόσφαιρα, πεφτει στο έδαφος και πλέον αποτελεί έναν μετεωρίτη.

Ένας μετεωρίτης, όπως γίνεται αντιληπτό, δεν είναι τίποτε άλλο από ένα κομμάτι πετρώματος. Είναι εκείνο το πέτρωμα που έχει διαφύγει δύο καταστροφών, μία στην επιφάνεια του ουράνιου σώματος από το οποίο προέρχεται και μία δεύτερη, κατά την πρόσκρουση στην επιφάνεια της Γης. Όταν ένας πέτρωμα εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της Γης, λαμβάνουν χώρα διάφορες διεργασίες, όπως τριβή, υψηλή πίεση, αλλά και χημικές αντιδράσεις με τα περιβάλλοντα αέρια που βοηθούν στο να θερμανθεί, απελευθερώνοντας φως και σχηματίζοντας μία μπάλα φωτιάς, γνωστή και ως μετέωρο. Μετεωρίτες έχουν βρεθεί και σε άλλα ουράνια σώματα του ηλιακού μας συστήματος, όπως στο φυσικό δορυφόρο της Γης, τη Σελήνη και στο πλανήτη Άρη.

Στην παρούσα μελέτη γίνεται προσπάθεια να κατανοηθεί ο μηχανισμός γένεσης ενός μετεωρίτη από τα πρώτα στάδια σχηματισμού του πρωτόλιθου του, μέχρι και τη στιγμή που θα προσκρούσει στη Γη. Παρατίθενται πληροφορίες για τις συνθήκες που επικρατούν στην επιφάνεια του πλανήτη Άρη τη στιγμή πρόσκρουσης ενός αστεροειδούς και της επακόλουθης αποκόλλησης τεμαχίων πετρωμάτων από την επιφάνειά του. Η φυσική των ορυκτών είναι αυτή που αντανάκλα την ανάπτυξη εξαιρετικά υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών στην επιφάνεια κατά την πρόσκρουση του αστεροειδούς, λόγω της μετατροπής τους σε άλλες, περισσότερο σταθερές σε ακραίες συνθήκες, ορυκτολογικές δομές. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται σύγχρονα γεωχρονολογικά δεδομένα, σε συνδυασμό με ορυκτολογικά-πετρολογικά-γεωχημικά στοιχεία, ώστε να τοποθετηθεί το κάθε γεωλογικό γεγονός στο χρόνο και να αποκαλυφθεί το σύντομο χρονικό διάστημα μεταξύ της αποκόλλησης από την επιφάνεια του Άρη, μέχρι τη στιγμή που πέφτει στο έδαφος ως μετεωρίτης. Απώτερος σκοπός, ωστόσο, της παρούσας εργασίας είναι να παρουσιαστούν εκείνα τα στοιχεία-σημάδια χαρακτηριστικά της ύπαρξης (ή πιθανής ύπαρξης) ζωής. Γίνεται μία ανασκόπηση των έως τώρα ανακαλύψεων που σχετίζονται με βιολογικά ίχνη σε μετεωρίτες. Καταλήγουμε παρόλαυτά ότι θα πρέπει όλα τα στοιχεία να λαμβάνονται με ιδιαίτερη προσοχή καθώς οι μετεωρίτες αποτελούν πετρώματα που έχουν υποστεί μία εξαιρετικά πολύπλοκη γεωλογική ιστορία η οποία είναι ικανή να καταστρέψει οποιοδήποτε ίχνος ζωής σε αυτές.

2. Κατηγορίες Μετεωριτών

Οι μετεωρίτες διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: λιθομετεωρίτες, σιδηρομετεωρίτες και λιθο-σιδηρομετεωρίτες (Σχ. 1). Οι λιθομετεωρίτες αποτελούνται κυρίως από πυριτικά ορυκτά και μοιάζουν με πετρώματα που προέρχονται από τον μανδύα της Γης. Αντίθετα οι σιδηρομετεωρίτες αποτελούνται κατεξοχήν από μεταλλικό σίδηρο-νικέλιο. Αναγνωρίζονται εύκολα εξαιτίας του μεγάλου τους βάρους. Οι περισσότερες έρευνες καταλήγουν στο ότι οι σιδηρομετεωρίτες αποτελούν υπολείμματα από τον πυρήνα ενός ουράνιου σώματος το οποίο διαμελίστηκε. Η τρίτη ομάδα μετεωριτών είναι μία ενδιάμεση κατηγορία αποτελούμενη από μεταλλικό υλικό και πυριτικά ορυκτά. Περαιτέρω οι λιθομετεωρίτες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: χονδρίτες και ανονδρίτες. Οι χονδρίτες αποτελούν τον συνηθέστερο τύπο λιθομετεωρίτη. Στο εσωτερικό τους σχηματίζονται μικρές στρογγυλές σφαίρες, που ονομάζονται χόνδροι (chondrules) και αποτελούνται από τα ορυκτά ολιβίνη και πυρόξενο. Οι περισσότεροι χονδρίτες μετεωρίτες έχουν ηλικία γένεσης 4.6 δισεκατομμύρια χρόνια. Μία από τις υποκατηγορίες χονδριτών αποτελούν οι ανθρακώδεις μετεωρίτες (Carbonaceous meteorites), οι οποίοι περιέχουν υψηλές περιεκτικότητες άνθρακα, νερό, και οργανικά συστατικά. Αντίθετα, οι αχονδρίτες, αποτελούνται από ίδια ορυκτά όπως οι χονδρίτες, ωστόσο δε διαθέτουν χόνδρους. Οι μετεωρίτες αυτής της κατηγορίας μοιάζουν με εκείνα τα γήινα πετρώματα που έχουν προέλθει από κρυστάλλωση μάγματος.

Μία ομάδα πετρωμάτων που ανήκει στους αχονδρίτες ονομάζεται σεργκοτίτες (shergottites). Οι σεργκοτίτες ανήκουν στην κατηγορία των αχονδριτών που αντιστοιχούν σε τμήματα του ανώτερου μανδύα του πλανήτη Άρη. Διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: βασαλτικούς, λερζολιτικούς και εκείνους με μεγάλους κρυστάλλους ολιβίνη. Οι βασαλτικοί σεργκοτίτες αποτελούνται από τα ορυκτά πυρόξενο και πλαγιόκλαστο, οι λερζολιτικοί από ολιβίνη και πυρόξενο. Η τρίτη ομάδα σεργκοτιτών αποτελείται από μεγακρυστάλλους ολιβίνη που επιπλέον μέσα σε μία λεπτόκοκκη κύρια μάζα αποτελούμενη από πλαγιόκλαστο και πυρόξενο. Άλλη ταξινόμηση των σεργκοτιτών στηρίζεται στη χημική σύσταση του πετρώματος και συγκεκριμένα

στα λεγόμενα ασυμβίβαστα στοιχεία και στο ποσοστό ύπαρξής τους μέσα στο αναλυθέν πέτρωμα. Αυτή περιλαμβάνει: (1) εμπλουτισμένης, (2) ενδιάμεσης και (3) αποπλυμένης σύστασης πετρώματα. Στους αχονδρίτες μετεωρίτες με προέλευση τον πλανήτη Άρη, ανήκουν επίσης οι Νακλίτες (Nakhlites) και οι τσασινίτες (Chassignites).



Σχήμα 1 - Σχηματική απεικόνιση που αναπαριστά την προέλευση των μετεωριτών. Οι σιδηρομετεωρίτες προέρχονται από τον πυρήνα, ενώ οι ανθρακώδεις χονδρίτες αποτελούν τμήματα των αρχέγονων πλανητοειδών.

3. Σχηματισμός Μετεωριτών – Το Παράδειγμα του Πλανήτη Άρη

3.1. Πρωτόλιθοι Μετεωριτών

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι μετεωρίτες με προέλευση τον πλανήτη Άρη διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, σεργκοτίτες, νακλίτες και τσασινίτες, το όνομα των οποίων προέρχεται από το όνομα του αρχικού μετεωρίτη που αντιστοιχεί στην κάθε κατηγορία, Shergotty, Nakhla και Chassigny. Η επισταμένη ορυκτολογική-πετρολογική-γεωχημική μελέτη αυτών των πετρωμάτων παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο γένεσης των πρωτολίθων τους. Η κυρίαρχη, εκ των τριών προαναφερθέντων κατηγοριών είναι εκείνη των σεργκοτιτών μετεωριτών, κι έπεται εκείνη των νακλιτών, γι' αυτό και στη συνέχεια αναπτύσσουμε τα προτεινόμενα μοντέλα σχηματισμού των πρωτολίθων τους.

Ο προσδιορισμός των μανδυακών πηγών (αποπλυμένες και εμπλουτισμένες) από τις οποίες προέρχονται οι σεργκοτίτες τοποθετείται στο πλαίσιο δύο ακραίων μοντέλων: 1) βασαλτικών μαγμάτων που προέρχονται από το μανδύα και αφομοιώνουν υλικό φλοιού και 2) βασαλτικών μαγμάτων που προέρχονται από πολλαπλές μανδυακές πηγές. Ακολούθως παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία και ο μηχανισμός δημιουργίας των μοντέλων αυτών.

Τα μοντέλα που έχουν ως βάση την αφομοίωση υλικού, προτείνουν ότι μέσα στον φλοιό βρίσκεται μία εμπλουτισμένη πηγή ενώ ταυτόχρονα, από την αποπλυμένη πηγή #1 πηγάζουν όλοι οι βασαλτικοί σεργκοτίτες (Σχ. 2α). Οι δύο αυτές πηγές προέρχονται από τα πρώιμα στάδια διαφοροποίησης του πλανήτη Άρη κατά τη διάρκεια κρυστάλλωσης του αρχικού ωκεανού

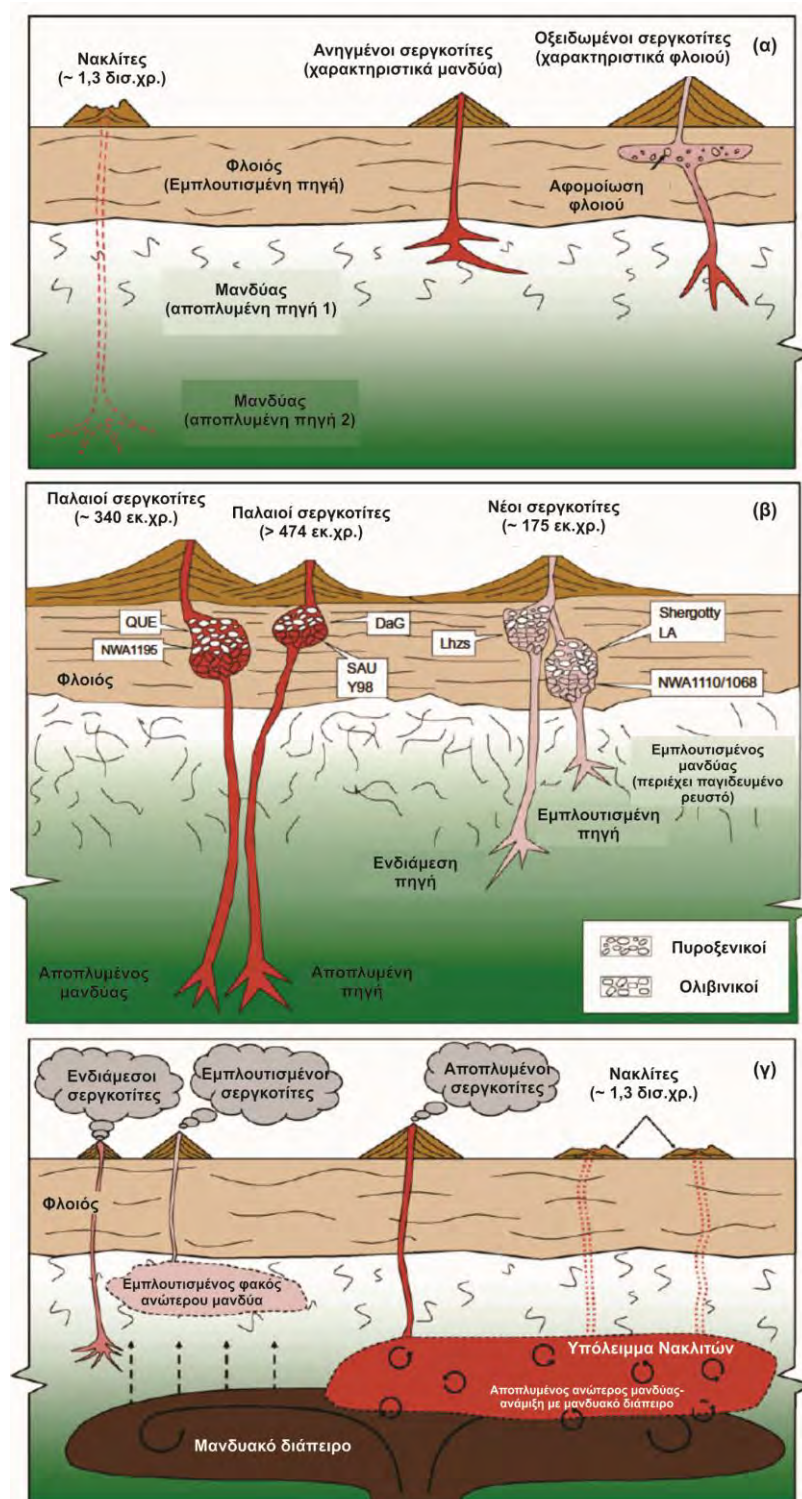
μάγματος. Ο ανώτερος μανδύας βρίσκονταν σε αναγωγικές συνθήκες, ενώ ο φλοιός σε ελαφρά οξειδωτικές. Η εφαρμογή αυτού του μοντέλου έχει το πλεονέκτημα της εύκολης ερμηνείας του πρώιμου διαχωρισμού και της μακρόχρονης απομόνωσης των δύο πηγών (φλοιού και μανδύα). Επιπλέον, στο μοντέλο αυτό παρέχεται η διαδικασία ανάμιξης εμπλουτισμένων και αποπλυμένων συστατικών κατά τη δημιουργία των βασαλτών πριν την τελική ηφαιστειότητα.

Η έτερη κατηγορία μοντέλων, εκείνη που στηρίζεται στις πολλαπλές μανδυακές πηγές, στηρίζεται σε μία αποπλυμένη και μία εμπλουτισμένη πηγή. Αυτές οι δύο πηγές πιθανότατα ήταν απομονωμένες για ένα διάστημα 4 δισ.χρ. Η ανάμιξη αυτών των δύο προήλθε τη στιγμή της τήξης, παράγοντας τις χημικές και ισοτοπικές ενδιάμεσες ποικιλίες των σεργκοτιτών. Το μοντέλο αυτό στηρίζεται στην αρχή ότι οι διαφορετικές πηγές έχουν δημιουργηθεί κατά τη διάρκεια της κρυστάλλωσης του ωκεανού μάγματος σε μεγάλο βάθος. Οι αποπλυμένες πηγές αντιστοιχούν σε σωρευτικές ακολουθίες που δημιουργήθηκαν πριν την κρυστάλλωση των εμπλουτισμένων.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα μοντέλου πολλαπλών μανδυακών πηγών δύο- (Symes *et al.*, 2008) και τριών- (Blinova & Herd, 2009) σταδίων απεικονίζονται στο σχήμα 2. Στο μοντέλο των Symes *et al.* (2008) φαίνονται οι περιοχές της μανδυακής πηγής που είναι αποπλυμένη, ενδιάμεση και εμπλουτισμένη σε σύσταση (Σχ. 2β). Τα στοιχεία K, Th, U που είναι ικανά να παράγουν θερμότητα κατά τη ραδιενεργή διάσπασή τους, συγκεντρώνονται σε ύστερο-προϊόντα κρυστάλλωσης και μπορούν να αναμιχθούν με τους αποπλυμένους σωρευτικούς ορίζοντες. Η απομόνωση των πηγών, εξασφαλίζεται μέσω της έναρξης της διαδικασίας τήξης στους προηγούμενους «γόνιμους» αποπλυμένους σωρευτικούς ορίζοντες. Σε αυτό το σχήμα απεικονίζονται σενάρια στα οποία η άνοδος των τηγμάτων διασφαλίζεται με μικρό ποσοστό αφομοίωσης ή κρυστάλλωσης μέχρις ότου τοποθετηθούν σε μαγματικούς θαλάμους στον κατώτερο φλοιό του Άρη. Ακολουθεί η εκκίνηση της κρυστάλλωσης, ενώ η κλασμάτωση δίνει γένεση σε μίγματα τήγματος και κρυστάλλων πριν την τελική τοποθέτησή τους στην επιφάνεια του πλανήτη. Αυτή η διαδικασία κλασματικής κρυστάλλωσης είναι που κατά τους Symes *et al.* (2008) και Shearer *et al.* (2008) συνδέει τους πλούσιους σε ολιβίνη και πυρόξενο βασάλτες, μέσα σε κάθε διαφορετικής σύστασης ομάδα σεργκοτιτών (αποπλυμένοι και εμπλουτισμένοι).

Στα αρνητικά του μοντέλου αυτού είναι η αδυναμία να προσομοιώσει τη χημισμό των σεργκοτιτών σε σπάνιες γαίες. Αποτέλεσμα αυτού είναι η πρόταση των Blinova & Herd (2009) για ένα, τριών-σταδίων, πετρογενετικό μοντέλο (Σχ. 2γ). Σε αυτό, η πηγή των αποπλυμένων σεργκοτιτών είναι ένα μίγμα σωρευτών ανώτερου μανδύα που προηγουμένως έχει υποστεί τήξη και εξαγωγή τήγματος (μητρικό μάγμα νακλιτών) πριν από 1.3 δισ.χρ. και λιθολογία που προέρχεται από το όριο μανδύα πυρήνα. Αυτές οι δύο πηγές έχουν διαφορετικές αναλογίες Nd/Sm δείχνοντας ότι έχουν εξελιχθεί ανεξάρτητα. Η πηγή με προέλευση τον βαθύ μανδύα μεταφέρθηκε σε μικρότερα βάθη μέσω ενός μανδυακού διάπειρου και υπέστη πολυβαρική τήξη σε ένα εύρος πιέσεων. Ακολουθώντας, η τήξη του μίγματος του μανδυακού διάπειρου και του μανδυακού υπολείμματος είναι ικανή να αναπαραγάγει τις τιμές σπανίων γαιών των αποπλυμένων σεργκοτιτών. Η εμπλουτισμένη πηγή είναι μία ύστερο-σωρευτική λιθολογία που εντοπίζεται στον ανώτερο μανδύα. Τα μανδυακά διάπειρα είναι οι εκείνες οι περιοχές που παρέχουν την αναγκαία ποσότητα θερμότητας για την εκκίνηση της διαδικασίας μερικής τήξης.

Το πλεονέκτημα της εφαρμογής του μοντέλου πολλαπλών μανδυακών πηγών είναι ότι αποκλείει τη δυσκολία των θερμοδυναμικών και χημικών προϋποθέσεων που τίθενται για την αφομοίωση τμημάτων φλοιού από τους βασάλτες που προέρχονται από το μανδύα. Ωστόσο, και αυτό το μοντέλο προϋποθέτει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με το χρόνο απομόνωσης και ανάμιξης. Για παράδειγμα, η διάδοση θερμότητας στο μανδύα πρέπει να λαμβάνει χώρα σε σχετικά μικρή κλίμακα ώστε να διατηρούνται χωριστά οι δύο μανδυακές πηγές για ένα χρονικό διάστημα 4 δισ.χρ. Αυτό σημαίνει ότι τα όρια των πηγών είναι θερμικά, δηλαδή επιτρέπεται η μεταφορά θερμότητα όχι όμως και η ανταλλαγή μάζας.

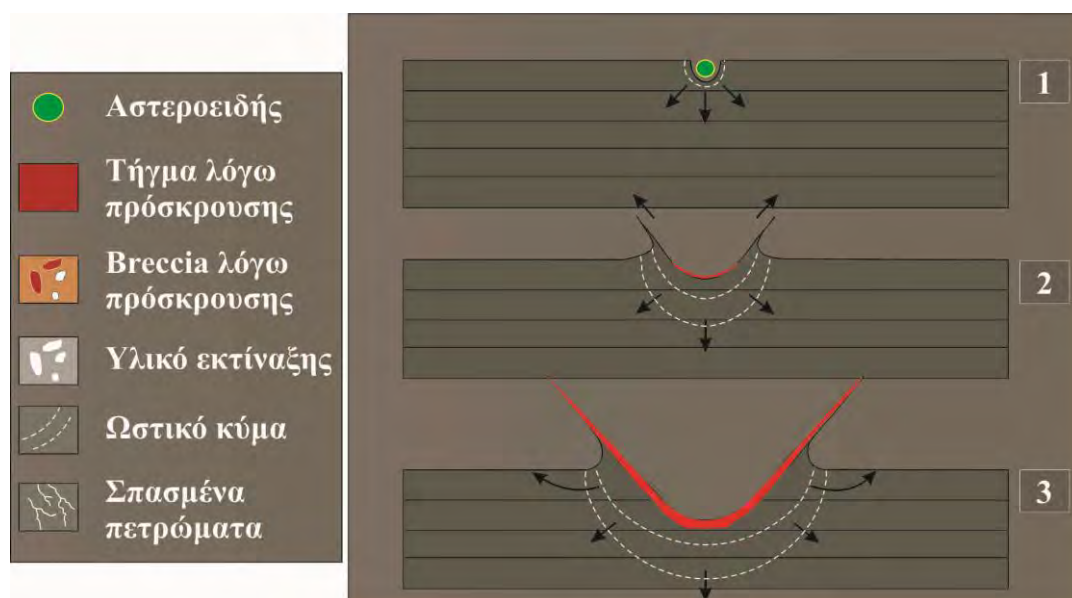


Σχήμα 2 - (α-γ) Μοντέλα προσωμοίωσης μαγματισμού στον πλανήτη Άρη. (α) Μοντέλο αφομοίωσης φλοιού (από Herd *et al.*, 2002). (β, γ) Μοντέλα πολλαπλών μανδυσικών πηγών (β: Symes *et al.*, 2008, γ: Blinova & Herd, 2009).

3.2 Δημιουργία Κρατήρων

Η δημιουργία ενός κρατήρα στην επιφάνεια ενός πλανήτη, και δη του Άρη, αποτελεί μία πολύπλοκη, αλλά εξαιρετικά ταχεία διαδικασία που ολοκληρώνεται σε μόλις λίγα λεπτά. Στην παρούσα ενότητα γίνεται αναφορά στα στάδια δημιουργίας ενός κρατήρα έπειτα από την πρόσκρουση ενός αστεροειδούς (Σχ. 3, 4). Η μέση ταχύτητα πρόσκρουσης των αστεροειδών στην επιφάνεια του Άρη είναι περίπου 10 km/sec. Η σύγκρουση χαρακτηρίζεται από υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης σε όλες τις κλίμακες παρατήρησης. Κατά την πρόσκρουση αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις με αποτέλεσμα τα πετρώματα να λιώνουν σε απειροελάχιστο χρόνο. Όταν στερεοποιηθούν, κι ενώ βρίσκονται υπό καθεστώς υψηλών πιέσεων, σχηματίζονται πολύμορφα ορυκτά (π.χ. ρινγκβουντίτης) όπως στον μετεωρίτη Tissint (βλέπε Κεφάλαιο 5, Baziotis *et al.*, 2013). Τα στάδια δημιουργίας ενός κρατήρα συνοψίζονται στα ακόλουθα:

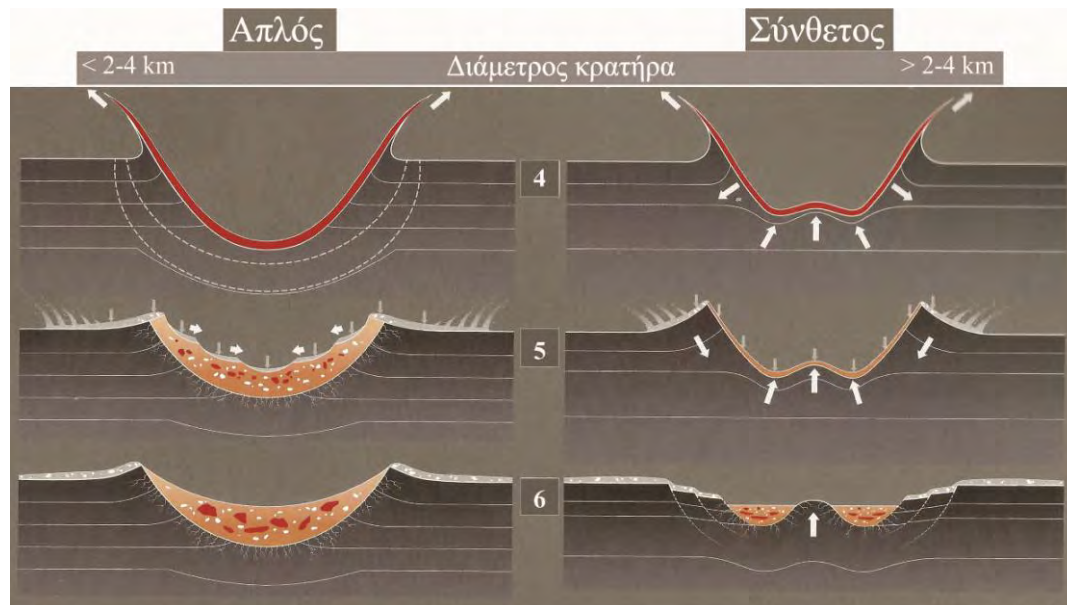
1. Πρόσκρουση μεγάλων σωμάτων με πολύ υψηλή ταχύτητα στην επιφάνεια. Προκαλείται απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας σε πολύ μικρό χώρο (Σχ. 3, #1).
2. Σχεδόν ολοκληρωτική εξάτμιση του αστεροειδούς (Σχ. 3, #2).
3. Ωστικά κύματα διαπερνούν τα πετρώματα προκαλώντας δομικές μετατροπές στα ορυκτά που βρίσκονται στο διάβα τους (φάση συμπίεσης. (Σχ. 3, #3).
4. Έπειτα από τη φάση συμπίεσης, η πίεση ελαττώνεται ελεύθερα υπό τη μορφή μία γιγαντιαίας έκρηξης που προκαλεί τη διαμόρφωση μίας βαθιάς κοιλότητας, η οποία είναι μεγαλύτερη σε διάμετρο από τον αστεροειδή. Σε αυτό το στάδιο τα εκτεταμένα ωστικά κύματα αποδυναμώνονται και η διαμόρφωση του κρατήρα εξαρτάται κυρίως από τη βαρύτητα (Σχ. 4, #4).
5. Υλικό συνεχώς εκτινάσσεται υπό τη μορφή ανεστραμμένου κώνου. Αποτελείται κυρίως από θραύσματα και λειωμένα πετρώματα (Σχ. 4, #5).
6. Μέρος του προηγούμενου υλικού καταρρέει προς το εσωτερικό του κρατήρα σχηματίζοντας στρώματα σχετικά μεγάλου πάχους (Σχ. 4, #6).



Σχήμα 3 – Στάδια δημιουργία κρατήρων (1-3, βλέπε κείμενο) στον πλανήτη Άρη.

Το στάδιο 3 προς 4, καθορίζει το είδος του κρατήρα. Ανάλογα με τη διάμετρο, διακρίνονται τόσο απλοί όσο και σύνθετοι κρατήρες (Σχ. 4). Στους απλούς κρατήρες το απότομο μέρος του χείλους

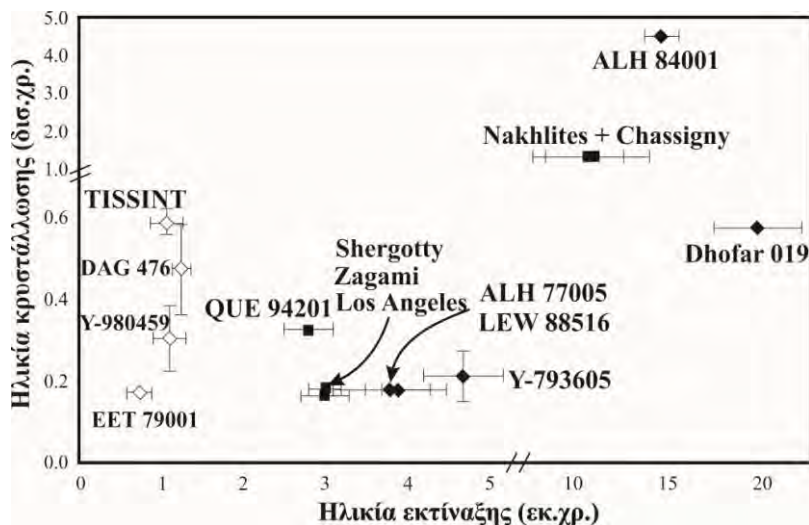
του κρατήρα καταρρέει και η αναλογία μεταξύ του τελικού βάθους και της διαμέτρου είναι 1:5. Στους σύνθετους κρατήρες η κατάρρευση είναι πιο εντυπωσιακή, διότι αποτελούνται από μία κεντρικά ανυψωμένη περιοχή, η οποία κατρακυλά προς το εσωτερικό.



Σχήμα 4 – Στάδια δημιουργία κρατήρων (4-6, βλέπε κείμενο) στον πλανήτη Άρη. Δύο παραδείγματα δημιουργίας απλού (κάτω αριστερή εικόνα) και σύνθετου (κάτω δεξιά εικόνα) κρατήρα με μέγεθος μικρότερο και μεγαλύτερο από 2-4 km, αντίστοιχα. Σύμβολα όπως στο σχήμα 3.

3.3 Περί Χρόνου

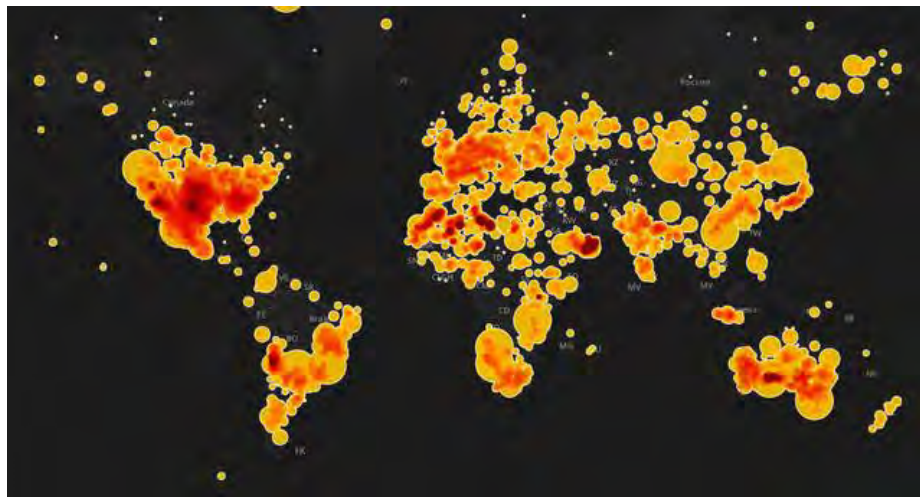
Η έννοια προσδιορισμού και τοποθέτησης των γεγονότων στο χρόνο μοιάζει με ένα δισεπίλυτο γρίφο για την περιπτώση των μετεωριτών με προέλευση τον πλανήτη Άρη. Ως «ηλικία» ορίζεται ο χρόνος μεταξύ δύο γεγονότων που έχουν καθοριστεί με συγκεκριμένα χρονόμετρα. Στην πραγματικότητα, τέσσερις διαφορετικές ηλικίες κρύβονται στο εσωτερικό αυτών των πετρωμάτων. Η πρώτη σχετίζεται με τη χρονολόγηση της κλασμάτωσης στη μανδυακή περιοχή που δημιούργησε την πηγή των ύστερο-τηγμάτων (Moser *et al.*, 2013). Η δεύτερη σχετίζεται με την κρυστάλλωση του μάγματος κοντά στην επιφάνεια (όταν πρόκειται για βασαλτικό πέτρωμα) δίνοντας γένεση στον πρωτόλιθο. Η Τρίτη αφορά την ηλικία τήξης κατά την διάρκεια ενός μεγάλου κοσμικού γεγονότος (πρόσκρουση αστεροειδούς) και πιθανότατα αποτελεί το χρόνο εκτίναξης του πετρώματος από την επιφάνεια του Άρη. Η τέταρτη ηλικία είναι εκείνη που σχετίζεται με τον χρόνο παραμονής του μετεωρίτη στην επιφάνεια της Γης. Έτσι λοιπόν, η διαφορά της τρίτης (ηλικία εκτίναξης) με την τέταρτη (ηλικία παραμονής στη Γη) αποτελεί τον χρόνο «ταξιδιού» ενός μετεωρίτη στο διάστημα. Όπως διαπιστώνουμε από το σχήμα 5, υπάρχουν τουλάχιστον 4 διαφορετικοί χρονικοί περίοδοι που σχετίζονται με την ηλικία εκτίναξης μετεωριτών από τον Άρη. Σύμφωνα με τους Fritz *et al.* (2005) οι νεώτερες υλικές εκτίναξης συνδέονται με τους μετεωρίτες στους οποίους καταγράφονται ψηλότερες συνθήκες πίεσης στο εσωτερικό τους. Το τελευταίο συμβαίνει γιατί οι μετεωρίτες αυτοί έχουν προέλθει από ισχυρότερα κοσμικά γεγονότα, με αποτέλεσμα να συναντούν ταχύτερα την τροχιά της Γης στο διάστημα.



Σχήμα 5 – Ηλικίες εκτίναξης/κρυστάλλωσης για επιλεγμένους μετεωρίτες με προέλευση τον πλανήτη Άρη.

4. Που βρίσκονται οι Μετεωρίτες στη Γη?

Η πτώση μετεωριτών στη Γη αποτελεί ένα σημαντικό γεγονός, καθώς τεμάχια πετρωμάτων από το διάστημα, που πιθανώς προέρχονται από τα αρχέγονα στάδια του ηλιακού μας συστήματος, ανακαλύπτονται από τους ανθρώπους και αποκαλύπτουν σημαντικές πληροφορίες. Υπάρχουν όμως περιοχές της Γης στις οποίες να παρατηρείται μεγάλη συγκέντρωση μετεωριτών? Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα, δεν μπορεί να είναι μονοσήμαντη, ωστόσο, είναι καταφατική (Σχ. 6). Η αιτία δεν είναι η μεγαλύτερη συγκέντρωση μετεωριτών στις περιοχές αυτές, αλλά η μεγαλύτερη ευκολία στον εντοπισμό τους.



Σχήμα 6 – Θέσεις πτώσης μετεωριτών στη Γη τα τελευταία 4300 χρόνια. Στο χάρτη απεικονίζονται 34513 σημεία πρόσκρουσης.

Εξαιρετικό παράδειγμα συγκέντρωσης μετεωριτών αποτελεί η περιοχή της Ανταρκτικής. Αποτελεί την καλύτερη «παγίδα» μετεωριτών στη Γη. Αυτό οφείλεται καταρχάς στο ότι οι μετεωρίτες πέφτουν σε πάγο κι όχι σε σκληρά πετρώματα, με αποτέλεσμα να υφίστανται μικρότερη ζημιά. Επίσης, εξαιτίας της φύσης του, ένας μετεωρίτης είναι ένα πέτρωμα, το οποίο

ευκόλως διακρίνεται από το λευκό, χιονοσκεπαστο περιβάλλον της Ανταρκτικής. Παράλληλα, στην περιοχή της Ανταρκτικής υφίσταται μία εξαιρετικά ενδιαφέρουσα διαδικασία συγκέντρωσης μετεωριτών (Σχ. 7).



Σχήμα 7 – Τρόπος μεταφοράς και συγκέντρωσης μετεωριτών στην Ανταρκτική (από Bischoff, 2001).

Κατά τη ροή του πάγου, όταν αυτός συναντήσει ένα εμπόδιο όπως ένα πέτρωμα ή βουνό, έχει την τάση προς τα πάνω κίνησης συμπαρασύροντας τους εγκλεισμένους στο εσωτερικό του, μετεωρίτες, προς την επιφάνεια. Σε πολλές περιοχές όπου ο πάγος είναι παγιδευμένος δίπλα σε μια βουνοπλαγιά, και χωρίς να έχει ροή διαφυγής, μειώνεται σιγά-σιγά σε πάχος εξαιτίας της απόξεσης που προκαλείται από την ηλιακή ακτινοβολία και τους καταβατικούς ανέμους. Τελικά, με το πέρασ εκατοντάδων ή και χιλιάδων χρόνων, η απομάκρυνση του πάγου αφήνει μια επιφάνεια γεμάτη με «εξωγήινα» αντικείμενα.

Μία ακόμα περιοχή εντοπισμού μετεωριτών αποτελεί η έρημος του Morocco. Το Morocco κατέχει εξαιρετική θέση για την ανίχνευση και εντοπισμό μετεωριτών εξαιτίας της μεγάλης έκτασης επιφανειών χωρίς εμπόδια που εκτείνονται σε χιλιάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα. Το κλίμα αυτών των εκτάσεων χαρακτηρίζεται ως πολύ ξηρό με εξαιρετικά χαμηλό ρυθμό διάβρωσης, συνθήκες ιδανικές για τη μακροχρόνια διατήρηση των μετεωριτών. Ήδη, από τις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας, ο αριθμός των μετεωριτών που ανακαλύφθηκαν στην καυτή έρημο του Νότιου Morocco, έχει πολλαπλασιασθεί. Μερικά από τα συλλεχθέντα δείγματα έχουν πολύ υψηλή επιστημονική αξία. Είναι χαρακτηριστικό, ότι το 40% των μετεωριτών με προέλευση τον πλανήτη Άρη, έχουν συλλεχθεί από το Morocco. Ένα από τα σημαντικότερα δείγματα που έχουν ανακαλυφθεί στην έρημο του Morocco αποτελεί το πέτρωμα με κωδικό όνομα NWA 2737, καθώς είναι το δεύτερο μόλις δείγμα από την κατηγορία στην οποία ανήκει. Το επόμενο όμως πέτρωμα είναι ίσως σημαντικότερο από το προαναφερθέν. Το πέτρωμα αυτό ονομάστηκε μετεωρίτης Tissint.

5. Ο Σημαντικότερος Μετεωρίτης της Εποχής μας - Tissint

Πρόσφατα, μόλις στις 18 Ιουλίου 2011, ένας μετεωρίτης έπεσε ανατολικά της περιοχής Tissint, στην κοιλάδα Oued Draa στο Morocco (Σχ. 8). Η συλλογή των θραυσμάτων πραγματοποιήθηκε από νομάδες τρεις μήνες αργότερα, τον Οκτώβριο του 2011. Τα μεγαλύτερα κομμάτια

συλλέχθηκαν από την περιοχή Hmadat Bou Rba'ine και τα μικρότερα (μόλις λίγα γραμμάρια) βρέθηκαν κοντά στα βουνά El Aglâb.



Σχήμα 8 - Μικρό τμήμα του μετεωρίτη Tissint, όπως αυτό ανακαλύφθηκε στο αφιλόξενο έδαφος της περιοχής που κατέπεσε στο Morocco. Το όνομα του μετεωρίτη προέρχεται από το κοντινό ομώνυμο χωριό.

Ο μετεωρίτης Tissint ανήκει στην κατηγορία των σεργκοιτιτών με ύπαρξη μεγάλων κρυστάλλων ολιβίνη που «επιπλέουν» σε μία λεπτόκοκκη κύρια μάζα (Irving *et al.* 2012, Baziotis *et al.* 2012). Αποτελεί τον πέμπτο μόλις μετεωρίτη που ο άνθρωπος παρατήρησε κατά την πτώση του και τον συνέλεξε. Έπειτα από τον τέταρτο μετεωρίτη, τον γνωστό Zagami που συλλέχθηκε στη Νιγηρία το 1962. Η πρώτη πτώση μετεωρίτη που έγινε ορατός και συλλέχθηκε από ανθρώπινο χέρι πραγματοποιήθηκε το 1815 στη Γαλλία. Η επόμενη έγινε πενήντα χρόνια αργότερα, το 1865 στην Ινδία, με την τρίτη να λαμβάνει χώρα το 1911 στην Αίγυπτο. Ο μετεωρίτης Tissint αποτελεί ένα αρκετά φρέσκο πέτρωμα με πολύ μικρό χρόνο παραμονής, έπειτα από την πτώση του, στη Γη. Τούτο είναι αρκετά σπάνιο, καθώς συνήθως οι μετεωρίτες συλλέγονται στη Γη, αιώνες ή και χιλιάδες χρόνια έπειτα από την πτώση τους.

Ο Christopher Herd, καθηγητής από το Πανεπιστήμιο της Alberta στο Edmonton, πρόεδρος της Επιτροπής που επιβεβαίωσε το όνομα και την προέλευση του μετεωρίτη Tissint, έκανε το παρακάτω σχόλιο σχετικά με την πρώιμη ιστορία αυτού του κομματιού πετρώματος: «αυτό το κομμάτι μαγματικού πετρώματος μας λέει πολλά σχετικά με το μάγμα και την προέλευσή του από τον Άρη. Μπορούμε λοιπόν μέσω της γεωχημείας να εμβαθύνουμε στη Γεωλογία του εσωτερικού του πλανήτη». Όπως αναφέραμε προωύτερα, οι πλέον διαδεδομένοι μετεωρίτες από τον Άρη, οι σεργκοιτίτες, είναι αυτοί που πλεονάζουν. Τεμάχια από τον μετεωρίτη Tissint βρίσκονται σε συλλογές στην Εθνική Υπηρεσία Αεροναυτικής και Διαστήματος (NASA) της Αμερικής, στο Πανεπιστήμιο της Alberta, της Arizona, του New Mexico, και του Πανεπιστημίου της Washington.

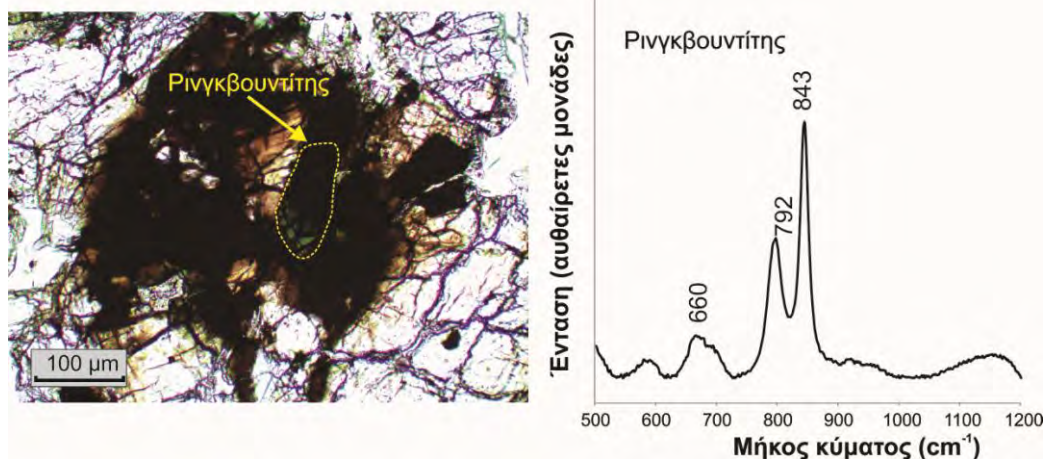
5.1 Γιατί Είναι Σημαντικός ο Tissint?

Ο μετεωρίτης Tissint κατέπεσε στην έρημο του Morocco και συντρίμια του βρέθηκαν σε μία ακτίνα αρκετών χιλιομέτρων. Ένα παχύ στρώμα υελώδους φλοιού περιβάλλει τον μετεωρίτη Tissint, γεγονός που καθιστά το εσωτερικό του τμήμα σχεδόν ανεπηρέαστο από τη γήινη επιμόλυνση. Ο μετεωρίτης αυτός έχει ηλικία γένεσης που αγγίζει τα εξακόσια εκατομμύρια χρόνια (π.χ. Brennecka *et al.*, 2012; Grosshans *et al.*, 2013; Ferrière *et al.*, 2013). Επίσης, περιέχει στο εσωτερικό του θύλακες που έχουν κλείσει μέσα τους σημάδια της ατμόσφαιρας του Άρη, γεγονός που αποδεικνύει την προέλευση από τον εν λόγω πλανήτη (Chennaoui Aoudjehane *et al.*, 2012).

Ωστόσο, τι είναι εκείνο που καθιστά ξεχωριστό αυτό το μετεωρίτη; Γιατί η επιστημονική κοινότητα, έχει στραφεί με μεγάλο ενδιαφέρον και μελετά αυτό το εξωγήινο πέτρωμα?

Σε πρόσφατη έρευνα που διεξήχθη στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, ερευνητής του Πανεπιστημίου του Tennessee, στα πλαίσια χρηματοδότησης από τη NASA, ανακάλυψε εκείνα τα δεδομένα που καθιστούν τον μετεωρίτη Tissint το μοναδικό μέχρι στιγμής πέτρωμα που αποκαλύπτει την ταυτότητα προέλευσής του από έναν τεραστίων διαστάσεων κρατήρα του πλανήτη Άρη (Baziotis *et al.*, 2013). Σύμφωνα με έρευνες των Shaw & Walton (2013), τα ορυκτά που σχηματίζονται σε συνθήκες πολύ υψηλών πιέσεων, παρέχουν τις απαραίτητες ενδείξεις που σχετίζονται με διεργασίες: (1) δημιουργίας κρατήρων, (2) απομάκρυνσης των πετρωμάτων από την επιφάνεια του μητρικού τους πλανήτη και (3) μεταφοράς των πετρωμάτων στη Γη. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι περισσότεροι μετεωρίτες που προέρχονται από τον πλανήτη Άρη, προέρχονται από κρατήρες διαμέτρου 3 έως 7 km (π.χ. Head *et al.*, 2002). Αυτό αποτελεί το πρώτο σημαντικό σημείο στο οποίο ξεχωρίζει ο μετεωρίτης Tissint. Δηλαδή, η προέλευσή του από έναν κρατήρα εξωπραγματικών διαστάσεων συγκρινόμενο με τους αντίστοιχους που έχουν αποδοθεί για την προέλευση των περισσότερων μετεωριτών από τον πλανήτη Άρη.

Σύμφωνα με ανεξάρτητες έρευνες που πραγματοποίησε τόσο η ομάδα του καθηγητή Paul DeCarli, ειδικό σε θέματα συγκρούσεων και δημιουργία κρατήρων, αλλά κι εκείνη υπό την αιγίδα του καθηγητή Beck από το Πανεπιστήμιο της Λυόν, έδειξαν ότι τα ορυκτά που σχηματίζονται κάτω από ένα καθεστώς πολύ υψηλών πιέσεων και είναι εγκλεισμένα μέσα σε μετεωρίτες μπορούν να δώσουν πληροφορίες για τη δυναμική των μετεωριτών (Fritz *et al.*, 2005; DeCarli, 2013). Μέχρι σήμερα, τα ορυκτά υψηλών πιέσεων που έχουν βρεθεί σε μετεωρίτες που προέρχονται από τον Άρη συνοψίζονται στα ακόλουθα: μασκελυνίτης (maskelynite, προέρχεται από πλαγιόκλαστο-*plagioclase*), ρινγκβουντίτης (ringwoodite, γ-πολύμορφο του ολιβίνη-*olivine*, Σχ. 9), ακιμοτοίτης (akimotoite, πυρόξενος με δομή ιλμενίτη-*ilmenite*), λινγκουνίτης (lingunite, πλαγιόκλαστο-*plagioclase* με δομή Na-Ολλανδίτη-Na Hollandite), ματζορίτης (majorite, πυρόξενος-*pyroxene* με δομή γρανάτη-*garnet*), τουίτης (tuite, γ-πολύμορφο του μεριλλίτη-*merrillite*), στισοβίτης (stishovite, χαλαζίας-*quartz* με δομή α- TiO_2), και περοφσκίτης (πυρόξενος με δομή περοφσκίτη).



Σχήμα 9 – Αριστερά απεικονίζεται μία εικόνα που έχει ληφθεί από πετρογραφικό μικροσκόπιο. Φαίνεται ένα τμήμα του εσωτερικού του μετεωρίτη Tissint το οποίο έχει υποστεί πολύ υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες έπειτα από την πρόσκρουση αστεροειδούς στην επιφάνεια του πλανήτη Άρη. Το πράσινο ορυκτό, με το κίτρινο περίγραμμα, είναι το ορυκτό ρινγκβουντίτης. Αποτελεί το μεγαλύτερο σε μέγεθος ρινγκβουντίτη που έχει βρεθεί ποτέ σε μετεωρίτη. Η εφαρμογή της μικρο-φασματοσκοπίας Raman απέδειξε τη φύση αυτού του ορυκτού όπως απεικονίζεται στο χαρακτηριστικό φάσμα της δεξιάς εικόνας.

Τα παραπάνω ορυκτά σχηματίζονται σε υψηλές πιέσεις, ενώ εκείνα που παρατίθενται μέσα στην παρένθεση αντιστοιχούν στα αντίστοιχά τους, πρωτογενή ορυκτά χαμηλών πιέσεων. Είναι χαρακτηριστικό ότι, μέχρι σήμερα, όλα τα προαναφερθέντα ορυκτά έχουν βρεθεί σε μεμονωμένες εμφανίσεις μετεωριτών (Πίνακας 1).

Πίνακας 1 - Ορυκτά υψηλών πιέσεων που έχουν βρεθεί σε μετεωρίτες από τον πλανήτη Άρη.

	Rwt	Ak	Maj	Lin/Holl	Tuite	Stv	Pv	Msk
TISSINT	X	X	X	X	X	X	X	X
DaG 670/735	x				x		x	x
EETA 79001	x							x
Zagami		x		x		x	x	x
Shergotty			x	x		x		x
NWA 4468	x				x			x
GRV 020090	x	x	x		x			x
NWA 856				x		x		x
Y 000047		x						x
Chassigny	x				x		x	x

Συντμήσεις: Rwt, ρινγκβουντίτης; Ak: ακιμοτίτης; Maj: ματζορίτης; Lin: λινγκουνίτης; Holl: ολλανδίτης; Stv: στισοβίτης; Pv: περοφσκίτης; Msk: μασκελυνίτης.

5.2 Μία Ακόμα Μέγα-καταστροφή στην Επιφάνεια του Άρη?

Όπως αναφέραμε, οι μετεωρίτες με προέλευση τον Άρη, οφείλονται σε πρώτη φάση σε εξαιρετικά μεγάλης ενέργειας συγκρουσιακά γεγονότα ή αλλιώς κοσμικά γεγονότα, που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια του πλανήτη. Γενικά, ένα κοσμικό γεγονός αποδίδεται στην πρόσκρουση ενός μεγάλου μετεωρίτη, αστεροειδούς ή κομήτη, με ένα άλλο ουράνιο αντικείμενο όπως είναι η Γη, ο Άρης, κάποιος άλλος πλανήτης, δορυφόρος, ή αστεροειδής.

Στην επιφάνεια του Άρη παρατηρούνται πολυάριθμοι κρατήρες, μεταξύ των οποίων, 43.000 έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από 5 km. Οι κρατήρες αυτοί έχουν φωτογραφηθεί με τη χρήση των διαφόρων διαστημικών συσκευών που έχουν αποσταλεί από τις υπηρεσίες διαστήματος της Αμερικής, της Ευρώπης και της Ρωσίας. Οι περισσότεροι από τους κρατήρες έχουν λάβει ονόματα επιστημόνων. Κρατήρες μεγάλου μεγέθους συνήθως λαμβάνουν ονόματα πόλεων ή περιοχών που βρίσκονται πάνω στη Γη. Για παράδειγμα, ο μεγαλύτερος γνωστός κρατήρας ονομάζεται «λεκάνη Ελλάς - Hellas Basin» και βρίσκεται στο νότιο ημισφαίριο του κόκκινου πλανήτη. Η διάμετρός του ξεπερνά τα 2.300 km έχοντας ένα βάθος που φθάνει τα 9 km. Δύο ακόμα μεγάλες συγκρουσιακές δομές στην επιφάνεια του Άρη, αποτελούν οι λεκάνες της Αργυρούς και της Ίσιδος. Η λεκάνη της Αργυρούς, με διάμετρο 800 km, βρίσκεται στο νότιο ημισφαίριο και περιβάλλεται από ένα μεγάλο δακτυλίδι βουνών.

Η πλειονότητα των κρατήρων στον Άρη έχει σχηματισθεί κατά το χρονικό διάστημα 4.1 έως 3.8 δισεκατομύρια χρόνια που καλείται «περίοδος ύστερου βαρέως βομβαρδισμού». Κατά τη διάρκεια αυτή της περιόδου, δημιουργήθηκε ένας μεγάλος αριθμός κρατήρων σε όλους τους πλανήτες και δορυφόρους του ηλιακού μας συστήματος, όπως επίσης καταστράφηκαν μικρότερα ουράνια σώματα, άγνωστα τη σημερινή εποχή. Σύμφωνα με την επιστημονική κοινότητα, αποδείξεις εκείνης της περιόδου προέρχονται από τη γεω-χρονολόγηση πετρωμάτων της Σελήνης, η ηλικία των οποίων φανερώνει ότι τα πετρώματα έλειψαν κατά τη διάρκεια αυτής της μεγάλης περιόδου συγκρούσεων και δημιουργίας κρατήρων. Η «λεκάνη Ελλάς», είναι η δεύτερη μεγαλύτερη και πρώτη ορατή συγκρουσιακή δομή του ηλιακού μας συστήματος. Την πρώτη θέση κατείχε για χρόνια ο κρατήρας που βρίσκεται στο Νότιο πόλο της Σελήνης κι ονομάζεται «λεκάνη Aiken – Aiken Basin». Ωστόσο, πρόσφατα δεδομένα από διαστημικές συσκευές της Εθνικής Υπηρεσίας

Αεροναυτικής και Διαστήματος της Αμερικής δείχνουν ότι στο βόρειο ημισφαίριο του πλανήτη Άρη, η λεκάνη borealis, αποτελεί μία πιθανή συγκρουσιακή δομή με διάμετρο που αγγίζει τα 10.500 km.

Σε όλη την ανθρώπινη και προγενέστερη ιστορία, έχουν καταγραφεί μικρά γεγονότα συγκρούσεων τα οποία έχουν προκαλέσει θανάτους, τραυματισμούς, ή ακόμα και καταστροφές κατοικιών. Μεγαλύτερα γεγονότα, πιο σπάνια ωστόσο, έχουν προκαλέσει κατά τη διάρκεια της μακράς ιστορίας της Γης σημαντική αποδόμηση του φυσικού περιβάλλοντος όπως επίσης και μαζικές εξαφανίσεις οργανισμών. Η μαζική εξαφάνιση των δεινοσαύρων, πριν από περίπου 65 εκατομμύρια χρόνια, αποδίδεται σε ένα τέτοιο καταστροφικό γεγονός. Υπάρχει λοιπόν τρόπος να αντιληφθούμε αν ο μετεωρίτης Tissint προέρχεται από ένα Μεγα-συγκρουσιακό γεγονός, αυτή τη φορά στην επιφάνεια του πλανήτη Άρη?

Η ανακάλυψη των ερευνητών από το Πανεπιστήμιο του Tennessee βασίζεται στην ανίχνευση όλων εκείνων των σημαντικών ορυκτών που σχηματίζονται σε ένα καθεστώς πολύ υψηλών πιέσεων, βρισκόμενα σε ένα και μοναδικό δείγμα, τον μετεωρίτη Tissint. Το μοναδικό παράδειγμα μετεωρίτη με προέλευση τον πλανήτη Άρη, στο οποίο διαστηρούνται ορυκτά πολύ υψηλών πιέσεων οδήγησε στον υπολογισμό των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης ενός μεγάλου ουράνιου σώματος στην επιφάνεια του Άρη. Η ερευνητική προσπάθεια που διεξήχθη στο Ινστιτούτο Πλανητικών Γεωεπιστημών του Πανεπιστημίου του Tennessee έφερε στο φως τα ορυκτά μασκελυνίτης, ρινγκβουντίτης, ακιμοτίτης, λινγκουνίτης, ματζορίτης, τουίτης, στισοβίτης και περοφσκίτης, συγκεντρωμένα όλα σε ένα δείγμα 10 gr. Επιπρόσθετα, πρόσφατα ανακοινώθηκαν δεδομένα από τον ίδιο μετεωρίτη που πιστοποιούν την παρουσία άνθρακα σε μορφή διαμαντιού με μέγεθος μικρότερο από 6 μm (El Goresy *et al.* 2013). Η παρουσία των ορυκτών αυτών δείχνει συνθήκες δημιουργίας σε ένα στενό φάσμα πίεσης και θερμοκρασίας. Ειδικότερα, προγενέστερες μελέτες έχουν δείξει ότι η παρουσία του ορυκτού μασκελυνίτης, δείχνει πίεση σχηματισμού μεγαλύτερη από 40 GPa. Ωστόσο, πρόσφατες έρευνες από τους Καθηγητές Sharp και DeCarli, έδειξαν ότι ο μασκελυνίτης σχηματίζεται σε πολύ χαμηλότερες πιέσεις (Sharp & DeCarli, 2006). Ο Δρ. Ιωάννης Μπαζιώτης, εφαρμόζοντας το μοντέλο της επιστημονικής ομάδας του καθηγητή Fritz (Fritz *et al.*, 2005) και χρησιμοποιώντας τις χαρακτηριστικές κορυφές που βρίσκονται στα φάσματα Raman του μασκελυνίτη, κατέληξε σε ένα εύρος πιέσεων που κυμαίνεται από 26 έως 40 GPa. Περαιτέρω, η ανακάλυψη του ορυκτού περοφσκίτης, έδειξε αντίστοιχες συνθήκες πίεσης αλλά για θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 2000 °C. Επιπλέον, η απουσία των προϊόντων αποδόμησης του ορυκτού λινγκουνίτης ώθησε την Επιστημονική ομάδα του Πανεπιστημίου του Tennessee να περιορίσουν τις ανώτερες πιέσεις στα 25 GPa σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται στο εύρος 1800 έως 2000 °C.

Ποια είναι όμως η φυσική σημασία της παρουσίας αυτών των ορυκτών στις εξαιρετικά ακραίες συνθήκες σχηματισμού τους? Αρχικά, κατά τη διάρκεια της μεγάλης πρόσκρουσης, τα ορυκτά που υπόκεινται στο ωστικό κύμα, βρίσκονται σε ένα καθεστώς πολύ υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών. Γεγονός είναι ότι περιοχές του πετρώματος που υφίσταται το μεγάλο συγκρουσιακό κύμα, λειώνουν σχεδόν ακαριαία. Ακολούθως στερεοποιούνται ταχέως, ενόσω το πέτρωμα διατηρείται σε αυτές τις ακραίες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Με αυτόν τον τρόπο, τα ορυκτά που σχηματίζονται κατά την στερεοποίηση του λειωμένου υλικού, δείχνουν τις πολύ υψηλές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, στις οποίες περιήλθαν. Ποια είναι όμως η διάρκεια που απαιτείται ώστε να σχηματισθούν αυτά τα ορυκτά? Ένα από τα ορυκτά που ανακάλυψε η ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου του Tennessee ήταν ο ρινγκβουντίτης (Baziotis *et al.* 2013, Liu *et al.* 2013). Η παρουσία του ορυκτού αυτού, λαμβάνοντας υπόψιν το μέγεθός του και το ρυθμό ανάπτυξής του, έδειξε ότι η διάρκεια της πρόσκρουσης δεν ξεπέρασε το ένα δευτερόλεπτο. Περαιτέρω, εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης σε μία από τις λειωμένες περιοχές που βρίσκονται εντός της μάζας του μετεωρίτη, κατέδειξε την εξαιρετικά ταχεία διεργασία στερεοποίησης αυτού του υλικού. Είναι χαρακτηριστικό ότι η εφαρμογή μοντέλων προσομοίωσης, σε μία περιοχή του πετρώματος κυλινδρικού σχήματος πάχους 350 μικρομέτρων, έδειξε ότι το

κέντρο της στερεοποιείται σε διάστημα 50 μιλισεκόντ και η άκρη της σε μόλις 20 μιλισεκόντ. Εξ' αυτού προκύπτει πως η στερεοποίηση λαμβάνει χώρα με κατεύθυνση από την άκρη προς το κέντρο, σε συμφωνία με την παρουσία των παρατηρούμενων αντίστοιχων ορυκτών. Περαιτέρω, η διάρκεια της πρόσκρουσης, βοήθησε στο να υπολογιστεί το μέγεθος του αστεροειδούς που χτύπησε τον Άρη αλλά και του δημιουργηθέντος κρατήρα. Εφαρμογή πολύπλοκων μαθηματικών εξισώσεων έδειξε ότι το μέγεθος του ουράνιου σώματος που προσέκρουσε στην επιφάνεια του πλανήτη Άρη κυμαίνονταν μεταξύ 10 και 25km, ενώ η διάμετρος του κρατήρα ήταν κατά το μέγιστο 180 km.

Η παρουσία μεγάλων κρατήρων στην επιφάνεια του Άρη είναι γεγονός αδιαμφισβήτητο. Ωστόσο, οι πληροφορίες που παρέχονται από τη μελέτη των περισσότερων μετεωριτών εκφράζουν μεγέθη κρατήρων που κυμαίνονται από 3 έως 7 km. Αντίθετα, η επισταμένη μελέτη του μετεωρίτη Tissint, χρησιμοποιώντας συντηρητικά μοντέλα προσομοίωσης, έδειξε ότι προέρχεται από ένα Μέγα-κρατήρα μεγέθους περίπου 180 km. Ο κρατήρας αυτός δημιουργήθηκε από έναν αστεροειδή, ο οποίος ξεπερνούσε σε μέγεθος τον αντίστοιχο που κατέπεσε στη Γη και στον οποίο αποδίδεται η εξαφάνιση των δεινοσαύρων, πριν από περίπου 65 εκατομμύρια χρόνια. Το μέγεθος ενός τέτοιου Μέγα-γεγονότος γίνεται κατανοητό αν φανταστούμε ότι η ενέργειά του ισοδυναμεί με εκατό τρισεκατομμύρια βόμβες TNT ή δύο εκατομμύρια θερμοπυρηνικές βόμβες.

6. Υπάρχουν Σημάδια Ζωής?

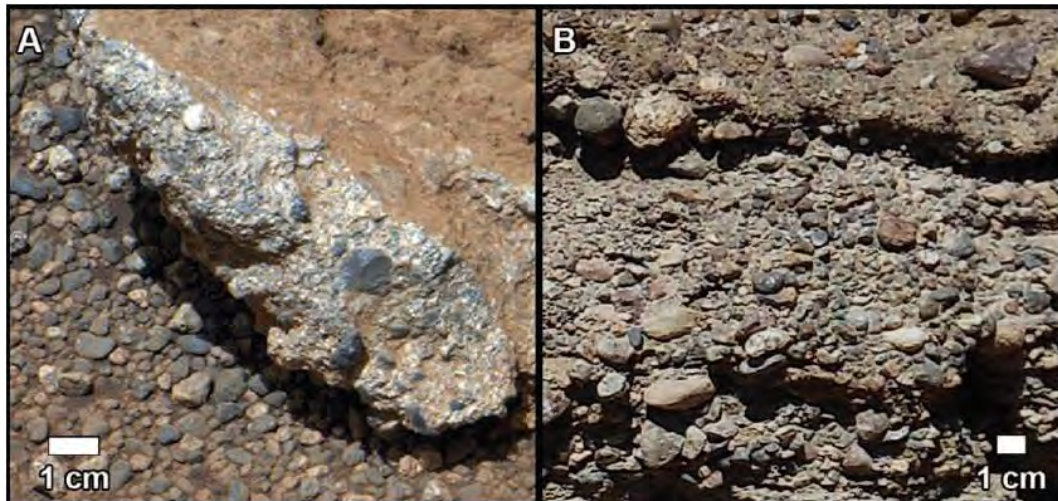
6.1. Το παράδειγμα των Διαστημικών Συσκευών-οχημάτων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά σε παλαιότερες (1976, Viking Lander) και πρόσφατες ανακαλύψεις (Curiosity), που μπορούν να συνδεθούν με την πιθανότητα ζωής στον πλανήτη Άρη. Επιπλέον δίνονται εκτενή στοιχεία σχετικά με τα πιθανά ίχνη ζωής που φέρουν οι μετεωρίτες με προέλευση τον πλανήτη Άρη, με τελική αναφορά στον μετεωρίτη Tissint.

Η αναζήτηση των επιστημόνων για ίχνη ζωής στον Άρη ξεκίνησε με τις ερευνητικές προσπάθειες της διαστημοσυσκευής Viking Lander το 1976 που παρήχθησαν εντυπωσιακά αποτελέσματα, υπό την καθοδήγηση του ερευνητή Gilbert Levin (Levin και Straat, 1976). Ωστόσο, κατά τη διάρκεια ενός πειράματος φασματοσκοπίας μάζας που διεξήχθη επί τόπου, στη θέση προσγείωσης της διαστημοσυσκευής, με σκοπό την αναζήτηση πολύπλοκων οργανικών ουσιών, κατέρριψε το επιχείρημα, και προέβλεπε τη θέση της NASA ότι δεν ανιχνεύθηκε ζωή. Παρόλα αυτά, ο Gilbert Levin, ήταν αντίθετος με αυτή την άποψη, και συνέχισε να υποστηρίζει ότι τα πειράματα του 1976 στην πραγματικότητα έδειχναν την παρουσία της μικροβιακής ζωής. Σε πρόσφατη μελέτη με αντικείμενο την επανεξέταση των αποτελεσμάτων από την προσπάθεια του Viking Lander φαίνεται να δικαιώνει την επιστημονική θέση που αρχικά προέβλεπε ο Gilbert Levin (Bianchiardi et al, 2012). Το συμπέρασμα είναι ότι η μικροβιακή ζωή στον Άρη μπορεί να σταθεί σε βιώσιμη μορφή, και μάλιστα τα υψηλά επίπεδα του μεθανίου που έχουν εντοπιστεί στην ατμόσφαιρα του Άρη συνάγουν προς αυτή τη κατεύθυνση.

Το Curiosity, ένα μεγαλεπήβολο σχέδιο της NASA με κύριο σκοπό την ανακάλυψη ζωής ξεκίνησε την ερευνητική του προσπάθεια στο αφιλόξενο έδαφος του πλανήτη Άρη τον Αύγουστο του 2012. Το ταξίδι του έχει ως κεντρικό σκοπό την ανακάλυψη της πιθανότητας ζωής στο μακρινό παρελθόν ή σήμερα, στην περιοχή του κρατήρα Gale. Σε πρώτη φάση, η μεγάλη ανακάλυψη του Curiosity επικεντρώνονται στις ισχυρές αποδείξεις ύπαρξης νερού που έρεε άφθονο στο παρελθόν. Οι ερευνητές, ανακάλυψαν απομονωμένες εμφανίσεις τσιμεντοποιημένων βοτσάλων (διαμέτρου 2 έως 30 mm) και κόκκους άμμου με τυπικές δομές που χαρακτηρίζουν ιζηματογενή κροκαλοπαγή (Σχ. 10). Τα αποστρωγγυλωμένα βότσαλα μέσα στα κροκαλοπαγή δείχνουν σημαντική ποτάμια διάβρωση. Επιπλέον, οι ορυκτολογικές αναλύσεις έδειξαν ότι επικρατεί το ορυκτό άστριο, γεγονός που αποδίδεται σε ελάχιστη εξαλλοίωση των ιζημάτων αυτών. Σύμφωνα με τους Williams *et al.* (2013), οι κλιματικές συνθήκες κατά τη διάρκεια μεταφοράς του ιζήματος πρέπει να διέφεραν κατά πολύ από το σύγχρονο ψυχρό και ξηρό περιβάλλον, επιτρέποντας την υδάτινη απορροή κατά μήκος πολλών χιλιομέτρων. Επομένως η ύπαρξη νερού που έρεε στην επιφάνεια

του Άρη κατά το παρελθόν επιτρέπει την υποστήριξη της άποψης περί προγενέστερης παρουσίας κατοικήσιμων περιβαλλόντων στον κόκκινο πλανήτη.



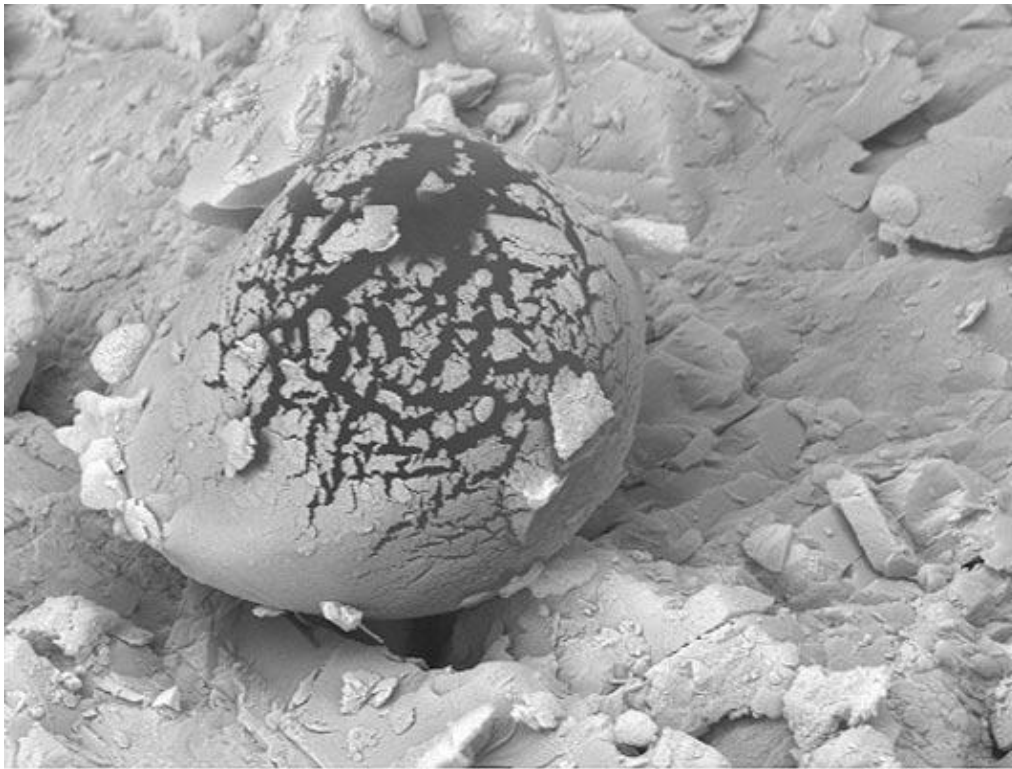
Σχήμα 10 – Σύγκριση κροκαλοπαγών από δύο διαφορετικούς πλανήτες. Α) Φωτογραφία που λήφθηκε από την κάμερα 100-mm Mastcam του οχήματος Curiosity στον πλανήτη Άρη. (Β) Γήινοι αποστρογγυλεμένοι κλάστες από αλλουβιακές αποθέσεις, όντας παρόμοιου μεγέθους και σχήματος με εκείνους της φωτογραφίας από τον πλανήτη Άρη (Ερημος Ατακάμα, Χιλή).

6.2. Το παράδειγμα των Μετεωριτών

Με βάση τα προηγούμενα, η απευθείας αναζήτηση των σημαδιών που αποδεικνύουν την «περί κατοικήσιμου θεωρίας» περιβάλλοντος του πλανήτη Άρη μπορεί να αναζητηθεί στους μετεωρίτες. Οι μετεωρίτες που προέρχονται από τον Άρη, κατέπεσαν στη Γη και συλλέχθηκαν γρήγορα μετά την πτώση τους είναι σχετικά σπάνιο να βρεθούν. Η σημαντικότητα τέτοιων πετρωμάτων έγκειται στο ότι αποτελούν δείγματα που δεν έχουν προλάβει να μολυνθούν από το γήινο περιβάλλον. Σε αυτή την περίπτωση, η διεξόδυση βακτηρίων στο εσωτερικό του μετεωρίτη μέσω του τετηγμένου υαλώδους περιβλήματος συγκεντρώνει μικρές πιθανότητες. Οπότε, η έρευνα για αυτόχθονα βιολογικά σημάδια καθίσταται ολοένα και πιο σημαντική.

Η πιθανότητα ανίχνευσης ζωής στον πλανήτη Άρη επανήλθε στο προσκήνιο το 1996, με τις έρευνες που διεξήγαγε η επιστημονική ομάδα υπό την αιγίδα του καθηγητή McKay στα πλαίσια μελέτης του μετεωρίτη ALH 84001 (McKay et al, 1996). Ανακάλυψαν υπό-μικροσκοπικά σφαιρίδια ανθρακικών ορυκτών που περιβάλλονται από στρώματα σύνθετων οργανικών μορίων πιθανούς βιολογικής προέλευσης. Επιπλέον, οι ίδιοι επιστήμονες ανακάλυψαν ωοειδούς σχήματος νανοσωματίδια που σχηματίζουν αλυσίδες, συμπεριλαμβανομένων κρυστάλλων μαγνητίτη που καθορίζονται από ορισμένους τύπους γήινων βακτηρίων. Στην πράξη, η υπόθεση των συγγραφέων που δεν έλαβε πλήρους αιτιολόγησης σχετίζεται με τη μορφολογία των μικροσκοπικών κόκκων μαγνητίτη, και οι οποίοι ομοιάζουν με εκείνους που παράγονται από γήινα μαγνητοτακτικά βακτήρια. Ωστόσο, το ίδιο σχήμα κρυστάλλων (μεταξύ γήινων και εκείνων με προέλευση τον Άρη) δεν υποδεικνύει ίδιο μηχανισμό προέλευσης. Έτσι, Οι δομές αυτές προτάθηκαν αρχικά ως νανοβακτήρια, παρόλαυτά η άποψη επικρίθηκε στο μέγιστο βαθμό καθώς τέτοιοι μικρο-οργανισμοί δε μπορούν να σχηματίσουν αυτόνομες μορφές. Ως εκ τούτου, συνεχίζεται η συζήτηση σχετικά με τον μετεωρίτη ALH 84001 χωρίς να διαφαίνεται μία οριστική απάντηση στον ορίζοντα. Κάποιοι αναφέρθηκαν στο ότι η εργασία των McKay *et al.* (1996) πυροδότησε μία δημόσια, πολιτική και ερευνητική συζήτηση μέγιστου ενδιαφέροντος για το ενδεχόμενο ύπαρξης ζωής στον Άρη.

Με όλα τα παραπάνω ως το αναγκαίο επιστημονικό υπόβαθρο που σχετίζεται με την υπάρχουσα, καθώς και παρελθούσα ζωή στον Άρη, το δείγμα του νέου μετεωρίτη, Tissint, μελετήθηκε με πολύ μεγάλη προσοχή. Όπως προαναφέρθηκε, ο μετεωρίτης Tissint εκτινάχθηκε κατά τη διάρκεια ενός μεγάλου κοσμικού γεγονότος, που έλαβε χώρα πριν από περίπου ένα εκατομμύριο χρόνια στην επιφάνεια του Άρη. Είναι χαρακτηριστικό ότι αν υπήρχε βιώσιμη μικροβιακή ζωή κάποια εποχή στον Άρη, τότε γιγαντιαίες θύελλες σκόνης θα μετέφεραν ζωντανά κύτταρα, σε άγονες ακόμη και σε αφιλόξενες περιοχές, ίσως σε παρόμοια τοποθεσία με εκείνη από την οποία προέρχεται ο μετεωρίτης Tissint. Η επιστημονική ομάδα υπό την αιγίδα του καθηγητή Wallis, από το Πανεπιστήμιο του Cardiff ανακάλυψε δισκοειδείς και σφαιροειδείς μορφές, με μέγεθος που δεν ξεπερνούν τα είκοσι μικρόμετρα και είναι πλούσιες σε άνθρακα και οξυγόνο (Σχ. 11). Σύμφωνα με τους ίδιους επιστήμονες, τέτοιες δομές δεν είναι δυνατό να ερμηνευθούν με χρήση μη-βιολογικών όρων. Επιπλέον, πρόσφατη ανακοίνωση στο 44ο Διεθνές Συνέδριο για τις Πλανητικές Επιστήμες και τη Σελήνη, από την ερευνητική ομάδα του καθηγητή El Goresy, έδειξε την παρουσία οργανικού άνθρακα (El Goresy *et al.*, 2013, Lin *et al.*, 2013). Υποστηρίζεται λοιπόν, ότι τελικώς, ο πλανήτης Άρης ίσως να μην αποτελεί ένα «νεκρό» πλανήτη.



Σχήμα 11 - Μία περίεργη δομή, το «αυγό του Tissint», ανακλύφθηκε από τον καθηγητή Wallis από το Πανεπιστήμιο του Κάρντιφ στην Αγγλία. Τα σπασίματα στην επιφάνεια της σφαιρικής αυτής δομής αποτελούν σύμφωνα με τον συγγραφέα μία κοιλότητα που περιείχε άνθρακα και οξυγόνο, συστατικά απαραίτητα για την ανάπτυξη ζωής. Η μέγιστη διάμετρος του «αυγού» φθάνει τα 10 μm .

7. Συμπεράσματα

Ο μετεωρίτης Tissint αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους μετεωρίτες που έχει ανακαλυφθεί στη Γη. Είναι ο μόνος μετεωρίτης με προέλευση τον πλανήτη Άρη, στον οποίο έχουν βρεθεί όλα εκείνα τα ορυκτά υψηλών πιέσεων, που μεμονωμένα έχουν βρεθεί σε άλλους μετεωρίτες. Επιπλέον, προέρχεται από τον μεγαλύτερο κρατήρα που ως σήμερα έχει αποκαλύψει μετεωρίτης

από τον Άρη. Επομένως, από την ενέργεια, τις υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες που επεκράτησαν κατά τη σφοδρή σύγκρουση, στην επιφάνεια του Άρη, φαντάζει απίθανη η διατήρηση κάθε ίχνους ζωής στο πέτρωμα αυτό. Αναφορικά με το κρίσιμο ερώτημα ως προς το αν υφίσταται το ενδεχόμενο παρουσίας ζωής στον κόκκινο πλανήτη, ο συγκεκριμένος μετεωρίτης πιθανώς να μην παρέχει όλες τις αναγκαίες πληροφορίες, ώστε να απαντηθεί επαρκώς. Η παρουσία ζωής σε άλλο πλανήτη ωστόσο, πλιν της Γης, φαντάζει λιγότερο μακρινή σε σχέση με το απώτερο παρελθόν. Η Επιστημονική κοινότητα με αποστολή νέων διαστημοσυσκευών (π.χ. Curiosity) και οργάνωση αποστολών, βρίσκεται σε συνεχή αναζήτηση εκείνων των στοιχείων που θα αποδείξουν την παρουσία ζωής στον Άρη. Έτσι πλέον, έχουμε περάσει από το στάδιο των ευχών, σε εκείνο των σταθερών ενδείξεων που θα αποδείξουν ότι δεν είμαστε μόνοι στο Σύμπαν.

8. Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την ερευνήτρια στο Jet Propulsion Laboratory, της California, Liu Yang, για την καθοδήγηση σε θέματα μοντελοποίησης συνθηκών μεταμόρφωσης λόγω shock. Επίσης, ευχαριστώ τον καθηγητή και Πρόεδρο της Οργανωτικής Επιτροπής του 13^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας κ. Μανούτσου, για την πρόσκληση που μου απέστειλε με σκοπό την παρουσίαση του θέματος σχετικά με τους μετεωρίτες.

9. Αναφορές

- Baziotis I.P., Liu Y., Mc Sween H.Y., Bodnar R.J. and Taylor L.A. 2012. Tissint Meteorite: A fresh piece of Martian lava with new discoveries, *75th Annual Meeting Met. Soc.*, August 12-17, 2012 in Cairns, Australia, #5250.
- Baziotis I.P., Liu Y., DeCarli P.S., Melosh H.J., Mc Sween H.Y., Bodnar R.J. and Taylor L.A. 2013. The Tissint Martian meteorite as evidence for the largest impact excavation, *Nature Comm.*, 4, 1404, doi: 10.1038/ncomms2414.
- Baziotis I.P., Liu Y. and Taylor L.A. 2013. Detailed Raman Spectroscopic Study of the Tissint Meteorite: Extraordinary Occurrence of High Pressure Polymorphs in a Single Fresh Piece of Martian Shergottite, *Geoph. Res. Abs.*, 15, EGU2013-5463.
- Bianciardi G., Miller J.D., Straat P.A. and Levin G.V. 2012. Complexity analysis of the Viking labeled release experiments, *Int. J. Aeronautical Space Sci.*, 13(1), 14-26.
- Bischoff A. 2001. Meteorite classification and the definition of new chondrite classes as a result of successful meteorite search in hot and cold deserts, *Planet. Space Sci.*, 49 (8), 769-776.
- Blinova A. and Herd C.D.K. 2009. Experimental study of polybaric REE partitioning between olivine, pyroxene and melt of the Y 980459 composition: insights into the petrogenesis of depleted shergottites, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 73, 3471 – 3492.
- Brennecka G.A., Borg L.E. and Wadhwa M. 2012. The age of Tissint: Sm-Nd & Rb-Sr isotope systematics, *75th Annual Meeting Met. Soc.*, August 12-17, 2012 in Cairns, Australia, #5157.
- Chennaoui Aoudjehane H. *et al.* 2012. Tissint Martian Meteorite: A fresh look at the interior, Surface, and Atmosphere of Mars, *Science*, 338, 785-788.
- DeCarli P.S. 2013. Meteorites from Mars via a Natural Two-stage Gas Gun, *Procedia Engineering*, 58, 570-573.
- El Goresy, A., Gillet, P., Miyahara, M., Ohtani, L., Ozawa, S., Lin, Y., Feng, L., Escerig, S., 2013. Multiple shock events and diamond formation on Mars, *44th LPSC, The Woodlands, Texas*, #1037.
- Ferrière L., Brandstätter F., Topa D., Schula T., Baziotis I.P., Münker C. and Koeberl C. 2013. The complex history of Tissint inferred from different types of melt inclusions and isotopic systems, *76th Annual Meeting Met. Soc.*, July 29th - August 2nd, 2013 in Edmonton, Canada, #5194.
- Fritz J., Artemieva N. and Greshake A. 2005. Ejection of Martian meteorites, *Meteorit. Planet. Sci.*, 40, 1393-1411.

- Grosshans T.E., Lapen T.J., Andreassen R. and Irving A.J. 2013. Lu-Hf and Sm-Nd ages and source compositions for depleted shergottite Tissint, 44th LPSC, The Woodlands, Texas, #2872.
- Head J.N., Melosh H.J. and Ivanov B.A. 2002. Martian meteorite launch: high-speed ejecta from small craters, *Science*, 298, 1752–1756.
- Herd C.D.K., Borg L.E., Jones J.H. and Papike J.J. 2002. Oxygen fugacity and geochemical variations in the martian basalts: implications for martian basalt petrogenesis and the oxidation state of the upper mantle of Mars, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66, 2025–2036.
- Irving A.J., Kuehner S.M., Tanaka R., Herd C.D.K., Chen G. and Lapen T.J. 2012. The Tissint depleted permafic olivine-phyric shergottite: petrologic, elemental and isotopic characterization of a recent Martian fall in Morocco, 43rd LPSC, The Woodlands, Texas, #2510.
- Levin G. V. and Straat P.A. 1976. Viking labeled release biology experiment: interim results, *Science*, 194(4271), 1322–1329.
- Lin Y. *et al.* 2013. NanoSims analysis of organic carbon from Mars: evidence for a biogenetic origin, 44th LPSC, The Woodlands, Texas, #1476.
- Liu Y., Taylor L.A., Baziotis I.P., Mc Sween H.Y., Bodnar R.J., DeCarli P.S. and Melosh H.J. 2013. Impact excavation of Martian meteorites: index from shock formed minerals, 44th LPSC, The Woodlands, Texas, #1371.
- McKay D.S., Gibson E.K., Thomas-Keptra K.L., Vali H., Romanek C.S., Clemett S.J., Chillier X.D.F., Maechling C.R. and Zare R.N., 1996. Search for life on Mars: possible relic biogenic activity in martian meteorite ALH84001, *Science*, 273, 924–930.
- Moser D.E., Chamberlain K.R., Tait K.T., Schmitt A.K., Darling J.R., Barker I.R. and Hyde B.C. 2013. Solving the Martian meteorite age conundrum using micro-baddeleyite and lauch-generated zircon, *Nature*, 499, 454–457, doi: 10.1038/nature12341.
- Sharp T.G. and DeCarli P.S. 2006. Shock effects in meteorites, *Meteorites and the early solar system II*, 653–677.
- Shaw C.S.J. and Walton E. 2013. Thermal modeling of shock melts in Martian meteorites: Implications for preserving Martian atmospheric signatures and crystallization of high-pressure minerals from shock melts, *Meteorit. Planet. Sci.*, 1–13, doi: 10.1111/maps.12100.
- Shearer C.K., Burger P.V., Papike J.J., Borg L.E., Irving A.J. and Herd C. 2008. Petrogenetic linkages among martian basalts. Implications based on trace element chemistry of olivine, *Meteorit. Planet. Sci.*, 43, 1241–1258.
- Steele A. *et al.* 2012. A reduced organic carbon component in Martian basalts, *Science*, 337, 212–215.
- Symes S.J.K., Borg L.E., Shearer C.K. and Irving A.J. 2008. The age of martian meteorite NWA 1195 and the differentiation history of the shergottites, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 72, 1696 – 1710.
- Wallis J., Wickramasinghe C., Wallis D., Miyake N., Wallis M., Di Gregorio B. and Al Mufti S. 2012. Discovery of biological structures in the Tissint Mars meteorite, *J Cosmology*, 18, 8500–8505.
- Williams R.M.E. *et al.* 2013. Martian fluvial conglomerates at Gale Crater, *Science*, 340, 1068–1072.