

ΙΣΟΤΟΠΙΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

ΥΠΟ

Ι. Α. ΛΕΟΝΤΙΑΔΗ *

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ἡ ἰσοτοπικὴ ὑδρολογία (Isotope Hydrology) ἀποτελεῖ σχετικῶς προσφάτως καθιερωθέντα κλάδον τῆς ὑδρολογίας. Ὁ κλάδος οὗτος περιλαμβάνει τεχνικάς, αἱ ὁποῖαι στηρίζονται εἰς τὴν ἐξέτασιν τῆς ὕλης ὡς συνισταμένης οὐχὶ ἐξ ἀπλῶν στοιχείων, ἀλλὰ ἐκ διακρίτων ἰσοτόπων.

Ἡ ἰσοτοπικὴ ὑδρολογία περιλαμβάνει ἀφ' ἑνὸς μὲν τὴν ὑδρολογίαν τῶν φυσικῶν ἰσοτόπων τοῦ περιβάλλοντος (Environmental Isotope Hydrology), ἀφ' ἑτέρου δὲ τὴν ὑδρολογίαν τῶν τεχνητῶν ἰσοτόπων (Artificial Isotope Hydrology).

Αἱ μέθοδοι τῆς ὑδρολογίας τῶν τεχνητῶν ἰσοτόπων στηρίζονται εἰς τὴν χρησιμοποίησιν τῶν ἰσοτόπων αὐτῶν διὰ τὴν τεχνητὴν πρόκλησιν μεταβολῆς εἰς τὴν ἰσοτοπικὴν σύστασιν τοῦ ὕδατος κατὰ ἓνα καθωρισμένο στάδιο τοῦ μελετουμένου ὑδρολογικοῦ συστήματος, καὶ τὴν μελέτην ἐν συνεχείᾳ τῆς πορείας τῆς μεταβολῆς ταύτης κατὰ τὰ ἐπερχόμενα στάδια. Αἱ διὰ τῶν μεθόδων τούτων λαμβανόμεναι πληροφορίαι ἀναφέρονται εἰς περιωρισμένον τμήμα τοῦ ὑδρολογικοῦ κύκλου.

Ἡ τεχνικὴ τῶν φυσικῶν ἰσοτόπων τοῦ περιβάλλοντος ἐκμεταλλεύεται τὴν φυσικὴν ἰχνηθέτησιν τῶν ὑδάτων, συνεπεία μεταβολῶν εἰς τὴν ἰσοτοπικὴν σύνθεσιν αὐτοῦ κατὰ τὰ διάφορα στάδια τοῦ ὑδρολογικοῦ κύκλου, διὰ τὴν παρακολούθησιν τῆς μετακινήσεως τῶν ὑδατίνων μαζῶν εἰς δευτέραν περιοχὴν τοῦ ὑδρολογικοῦ κύκλου καὶ τὴν ἐρμηνεῖαν ὀρισμένων ὑδρολογικῶν προβλημάτων.

2. ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΙΣΟΤΟΠΩΝ

Εἰς τὴν ὑδρολογίαν τῶν τεχνητῶν ἰσοτόπων ταξινομοῦνται ὅλαι αἱ ἐφαρμογαὶ ἐκεῖναι, αἱ ὁποῖαι στηρίζονται εἰς τὴν μέτρησιν, εἰς οἰοδήποτε στάδιον αὐτῶν, τῶν χαρακτηριστικῶν ἐνὸς τεχνητῶς παρασκευασθέντος ραδιοἰσοτόπου.

Τὰ ραδιοἰσότοπα γενικῶς συνιστοῦν ἀσταθῆ μορφήν τῆς ὕλης, ἢ ὁποῖα, ἀκολουθοῦσα τοὺς φυσικοὺς νόμους, τείνει νὰ μεταπέσῃ εἰς ἄλλην σταθερωτέραν μορφήν. Ἡ μετάπτωσις αὕτη πραγματοποιεῖται διὰ τῆς ἀποβολῆς τῆς πλεοναζούσης ἐνεργείας τοῦ πυρήνος των, ἥτις ἐπιτυγχάνεται διὰ τῆς ἐκπομπῆς ἀκτινοβολιῶν σωματιδιακῆς ἢ ἠλεκτρομαγνητικῆς φύσεως.

Ψηφιακὴ Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

* Ι. Α. ΛΕΟΝΤΙΑΔΗΣ, Δρ. Πυρηνικῆς Χημείας. Κ. Π. Ε. ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ.

Ἐκ τῶν διαφορῶν ἐκπεμπομένων ὑπὸ τῶν ραδιοϊσοτόπων ἀκτινοβολιῶν, ἐκεῖναι αἱ ὁποῖαι παρουσιάζουν χρησιμότητα, εἰς τὰς ἐν γένει ἐφαρμογὰς τῶν ραδιοϊσοτόπων, εἶναι τὰ νετρόνια καὶ αἱ ἀκτινοβολίαι α, β καὶ γ. Αἱ ἀκτινοβολίαι αὗται ἐν τῷ συνόλῳ τῶν εἶναι φορεῖς σημαντικῆς ποσότητος ἐνεργείας, ἐν συγκρίσει πρὸς τὴν μεταβολὴν ἐνεργείας, ἡ ὁποία λαμβάνει χώραν κατὰ τὰς μεταβολὰς εἰς τὸν ἠλεκτρονικὸν φλοιὸν τῶν ἀτόμων τῆς ὕλης.

Λόγῳ τῆς σημαντικῆς ποσότητος ἐνεργείας τὴν ὁποίαν φέρουν, αἱ ὑπὸ τῶν ραδιοϊσοτόπων ἐκπεμπόμεναι ἀκτινοβολίαι γίνονται, κατὰ τὴν διέλευσίν των διὰ μέσου τῆς ὕλης, πρόξενοι μεταβολῶν εἰς τὸν ἠλεκτρονικὸν φλοιὸν τῶν ἀτόμων τῆς ὕλης. Αἱ μεταβολαὶ αὗται λαμβάνουν χώραν συνήθως εἰς μεγάλην ἔκτασιν καὶ ὡς ἐκ τούτου καθίσταται εὐκόλος ἡ παρατήρησις των δι' εἰδικῶν ἠλεκτρονικῶν ὀργάνων.

Γενικῶς διὰ τῆς χρησιμοποιήσεως συνθέτων ἠλεκτρονικῶν ὀργάνων εἶναι δυνατὴ ἡ διάκρισις μεταξὺ τῶν διαφορῶν τύπων ἀκτινοβολιῶν, καθὼς ἐπίσης καὶ ὁ προσδιορισμὸς τῆς ἐνεργείας καὶ τῆς ποσότητος (ἐντάσεως) αὐτῶν.

Ἐπιπλέον τῆς ραδιενεργοῦ μεταπτώσεως, $-\frac{dN}{dt}$, εἶναι ἀνὰ πᾶσαν στιγμὴν ἀνάλογος τοῦ ἀριθμοῦ τῶν ραδιενεργῶν πυρήνων N, ὡς τοῦτο ἐκφράζεται ὑπὸ τῆς κάτωθι μαθηματικῆς σχέσεως :

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N \quad (1)$$

Ἡ σταθερὰ ἀναλογίας λ εἶναι χαρακτηριστικὴ δι' ἐν ἑκάστον τῶν ραδιοϊσοτόπων καὶ καλεῖται σταθερὰ ραδιενεργοῦ διασπάσεως.

Χρόνος ἡμισείας ζωῆς (Half-life) $T_{1/2}$, ἐνός ραδιοϊσοτόπου καλεῖται ὁ χρόνος, ὁ ὁποῖος ἀπαιτεῖται διὰ τὴν μείωσιν τῆς ποσότητος τοῦ ραδιοϊσοτόπου κατὰ τὸ ἡμισυ. Ὁ χρόνος ἡμισείας ζωῆς συνδέεται μετὰ τῆς σταθερᾶς ραδιενεργοῦ διασπάσεως διὰ τῆς κάτωθι μαθηματικῆς σχέσεως :

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (2)$$

Ἡ μεταβολὴ τοῦ ρυθμοῦ ραδιενεργοῦ διασπάσεως μετὰ τοῦ χρόνου καὶ τὰ χαρακτηριστικὰ τῶν ἐκπεμπομένων ὑπὸ ἐνός ραδιοϊσοτόπου ἀκτινοβολιῶν δύναται νὰ χρησιμοποιηθοῦν ὡς στοιχεῖα διὰ τὴν ἀναγνώρισιν αὐτοῦ.

Γενικῶς, αἱ ἐφαρμογαὶ τῶν ραδιοϊσοτόπων, αἱ ὁποῖαι ταξινομοῦνται εἰς τὴν ὕδρολογίαν τῶν τεχνητῶν ἰσοτόπων, διακρίνονται : α) εἰς ἐκεῖνας αἱ ὁποῖαι στηρίζονται εἰς τὴν χρῆσιν τῶν ραδιοϊσοτόπων ὡς ἰχνηθετῶν τοῦ ὕδατος ἐν διαλύσει εἰς αὐτό : β) εἰς ἐκεῖνας αἱ ὁποῖαι στηρίζονται εἰς τὴν χρῆσιν τῶν ραδιοϊσοτόπων ὑπὸ μορφῆν κλειστῶν πηγῶν καὶ : γ) εἰς ἐκεῖνας αἱ ὁποῖαι στηρίζονται εἰς τὴν χρῆσιν χημικῶν ἰχνηθετῶν καὶ τὴν ἐφαρμογὴν τῆς ραδιενεργοποιήσεως ὡς ἀναλυτικῆς μεθόδου.

2.1. Χρήσεις τῶν ραδιοϊσοτόπων ὡς ἰχνηθετῶν.

Αἱ διάφοροι μέθοδοι χρήσεως τῶν ραδιοϊσοτόπων ὡς ἰχνηθετῶν δὲν διαφέρουν, ὡς πρὸς τὴν φιλοσοφίαν των, ἀπὸ τὰς χρησιμοποιουμένας ἀπὸ μακροῦ χρόνου εἰς τὰς ὕδρολογικὰς ἐρεῦνας μεθόδους ἰχνηθετήσεως τῶν ὑδάτων διὰ προσθήκης χρωστικῶν ἢ ἄλλων χημικῶν ἰχνηθετῶν. Ἡ διαφορὰ ἐγκτεῖται εἰς τὴν ἐπιτεῦξιν ἰδιαίτερος μεγαλυτέρας εὐαισθησίας, ἀκριβείας καὶ ἀποτελεσματικότητος τῶν ἀντιστοίχων τεχνικῶν, διὰ τῆς χρησιμοποιήσεως τῶν ραδιοϊσοτόπων ὡς ἰχνηθετῶν.

Αἱ κυριώτεροι ιδιότητες ἐνός ραδιοϊσοτόπου, αἱ ὁποῖαι ἐπηρεάζουν τὴν ἐκλογὴν καὶ χρῆσιν του ὡς ἰχνηθέτου εἰς τὴν ὕδρολογίαν, εἶναι [2, 3, 4, 5] : Καλὴ διαλυτότης καὶ μικρὸς συντελεστὴς διαχύσεως, μὴ συγκράτησις ὑπὸ τῶν πετρωμάτων μετὰ τῶν ὁποίων ἔρχεται εἰς ἐπαφὴν κατὰ τὴν πορείαν τῶν ὑδάτων¹, ἱκανοποιητικὴ εὐαισθησία τῶν μεθόδων μετρήσεώς του, κατάλληλος χρόνος ἡμισείας ζωῆς, ἱκανὴ μεγίστη ἐπιτρεπομένη συγκέντρωσις² εἰς τὸ ὕδωρ κ. ἄ.

Ἐπιπλέον περιέχει ὀρισμένα χαρακτηριστικὰ τῶν κυριωτέρων γενικῶς ἐν χρῆσει ραδιοϊσοτόπων. [3, 5].

Ἡ ἀνάγκη μετρήσεως τοῦ ἰχνηθέτου ἐπὶ τόπου εἰς τὴν ὑπαιθρον περιορίζει τὴν χρῆσιν ραδιοϊσοτόπων τὰ ὁποῖα δὲν ἐκπέμπουν γ-ἀκτινοβολίαν.

Ἡ ἀπαίτησις τῆς μὴ συγκρατήσεως τῶν ἰχνηθετῶν ἀπὸ τὰ πετρώματα περιορίζει κατ' ἀρχὴν τὴν χρῆσιν τῶν κατιόντων, τὰ ὁποῖα ὡς γνωστὸν συγκρατοῦνται εἰς αὐτὰ [6].

Ἡ ἔλλειψις γ-ραδιενεργῶν ἀνιόντων ἰσοτόπων μὲ ἱκανὸν χρόνον ἡμισείας ζωῆς καὶ μεγάλην ἐπιτρεπομένην συγκέντρωσιν εἰς τὸ ὕδωρ προεκάλεσε τὴν ἀνάπτυξιν τῆς χρήσεως τῶν κατιόντων ἐνσωματωμένων εἰς μίαν σύμπλοκον ἀνιοκτὴν μορφήν [6], ὡς εἶναι τὰ σύμπλοκα τοῦ EDTA.

Εἰς τὴν διεθνή βιβλιογραφίαν ἀναφέρεται σημαντικὸς ἀριθμὸς ἐργασιῶν [2, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21] ἀναφερομένων εἰς τὴν μελέτην τῆς συμπεριφορᾶς τῶν ἰχνηθετῶν ἐναντι διαφορῶν ἐδαφῶν, τόσον ἐργαστηριακῶς, διὰ προσροφήσεως ἐπὶ στηλῶν, ὅσον καὶ ὑπὸ φυσικὰς συνθήκας.

Ἡ εὐαισθησία τῆς μεθόδου μετρήσεως τῆς ποσότητος τοῦ ἰχνηθέτου καὶ ἡ ἐπιθυμητὴ ἀκρίβεια κατὰ τὴν τοιαύτην μέτρησιν καθορίζουν τὴν ἐλαχίστην ἀπαιτουμένην εἰδικὴν συγκέντρωσιν τοῦ ἰχνηθέτου εἰς τὸ σημεῖον μετρήσεως. Ἡ συγκέντρωσις αὕτη, ἡ προβλεπομένη ἀραίωσις τοῦ ἰχνηθέτου καὶ ὁ χρόνος, ὁ ὁποῖος ἀναμένεται ὅτι θὰ διαρρεῦση ἀπὸ τῆς ἰχνηθετήσεως μέχρι τῆς μετρήσεως,

1. Εἰς ὀρισμένας περιπτώσεις (δρᾶ 2.1.4 καὶ 2.1.5.1) ἐπιδιώκεται ἀντιθέτως ἡ συγκράτησις τοῦ ἰχνηθέτου ὑπὸ τῶν πετρωμάτων.

2. Τὸ μέγεθος τοῦτο ὀρίζεται, ἀνάλογως τῆς χρήσεως τοῦ ὕδατος καὶ δι' ἐν ἑκάστον τῶν ραδιοϊσοτόπων, ὑπὸ διεθνῶν κανονισμῶν διὰ τὴν προστασίαν τοῦ πληθυσμοῦ ἀπὸ τοῦ ἐκπεμπομένου ἀπορρέοντος ἐκ τῆς ραδιενεργείας.

Χαρακτηριστικά τών κυριωτέρων έν χρήσει ραδιοϊσοτόπων.

Ίσοτόπα	T _{1/2}	Ακτινοβολία		Μεγίστη έπιτρεπομένη συγκέντρωση μCi / cm ³
		β (MeV)	γ (MeV)	
Ag ¹¹⁰	253 d	0.09	0.11 - 1.51	3 × 10 ⁻⁵
Au ¹⁹⁸	2.7 d	0.96	0.41	5 × 10 ⁻⁵
Br ⁸²	36 h	0.45	0.78	3 × 10 ⁻⁴
C ¹⁴	5730 y	0.15		8 × 10 ⁻⁴
Ca ⁴⁵	165 d	0.25		9 × 10 ⁻⁶
Co ⁶⁰	5.3 y	0.31	1.17 - 1.33	5 × 10 ⁻⁵
Cr ⁵¹	27.8 d		0.32	2 × 10 ⁻³
Cs ¹³⁷	30 y	0.51		2 × 10 ⁻⁵
Fe ⁵⁹	45 d	0.46	1.10	6 × 10 ⁻⁵
H ³	12 y	0.018		3 × 10 ⁻³
I ¹³¹	8 d	0.61	0.36	2 × 10 ⁻⁶
Ir ¹⁹²	74 d	0.66	0.31 - 0.47	4 × 10 ⁻⁵
Na ²⁴	15 h	1.39	1.37 - 2.76	2 × 10 ⁻⁴
P ³²	14 d	1.70		2 × 10 ⁻⁵
Rb ⁸⁶	19 d	1.78	1.08	7 × 10 ⁻⁵
Ru ¹⁰³	40 d	0.20	0.50	8 × 10 ⁻⁵
S ³⁵	87 d	0.16		6 × 10 ⁻⁵
Sb ¹²⁴	60 d	0.61 - 2.31	0.60 - 1.69	2 × 10 ⁻⁵
Sc ⁴⁶	84 d	0.36	0.89 - 1.12	4 × 10 ⁻⁵
Sr ⁸⁹	50 d	1.46		10 ⁻⁵
Tm ¹⁷⁰	127 d	0.97	0.084	5 × 10 ⁻⁵
Zn ⁶⁵	245 d		1.11	10 ⁻⁴

καθορίζουν την ελάχιστην ποσότητα του ραδιοϊσοτόπου, ή όποια πρέπει να χρησιμοποιηθή κατά την ίχνηθέτησιν.

Αί χρήσεις τών ραδιοϊσοτόπων ως ίχνηθετών εις την ύδρολογίαν έχουν καθιερωθή διεθνώς διά την διερεύνησιν ύπογειου συνδέσεως πηγών μετά καταβο-
βοθρών, την μέτρησιν τής παροχής επιφανειακού ύδατος, την μέτρησιν τής όρι-
ζοντίου ταχύτητος μετακινήσεως του ύπογειου ύδατος, τον προσδιορισμόν τής
κατευθύνσεως κινήσεως του ύδατος εις τους ύπογειους ύδροφόρους όρίζοντας,
την εξακρίβωσιν τής ύπάρξεως καθέτων ρευμάτων εις μίαν γεώτρησιν καί μέτρησιν
τής ταχύτητος αυτών, την εξακρίβωσιν τής πραγματικής καταστάσεως ροής του
είσαγομένου τεχνητώς ύδατος εις ύπογειους ύδροφόρους όρίζοντας, τον έντοπι-
σμόν διαρροών εις επιφανειακά άποθέματα ύδατος (λίμνας, φράγματα), την μελέ-
την τής κινήσεως καί μεταφοράς φερτών ύλων κ.ά.

2.1.1. Διερεύνησις ύπογειου συνδέσεως πηγών μετά καταβοθρών [23, 24].

Πρός τον σκοπόν τουτον, ίχνηθετείται διά καταλλήλου τεχνικής τó ύδωρ,
τό όποιον εισρέει εις την καταβóθραν, καί παρακολουθείται ή ραδιενέργεια του
ύδατος τών πηγών, ένψ κατά διαστήματα λαμβάνονται μετρήσεις τής παροχής
των.

Εις την περίπτωσιν εμφανίσεως του ίχνηθέτου εις τó ύδωρ πηγής τινος,
μετρείται ή συγκέντρωσις αυτού κατά τās διαφόρους χρονικάς στιγμάς.

Τó ποσοστόν συνδέσεως τής πηγής μετά τής καταβóθρας ύπολογίζεται εκ
τής σχέσεως (3) :

$$\text{ποσοστόν συνδέσεως} = \frac{\int_0^{\infty} C_t e^{\lambda t} Q_t dt}{A} \quad (3)$$

όπου C_t ή συγκέντρωσις του ίχνηθέτου εις τó ύδωρ τής πηγής εις χρόνον t από
τής ίχνηθετήσεως, Q_t ή παροχή τής πηγής κατά την αυτήν χρονικήν στιγμήν καί
A ή χρησιμοποιηθείσα κατά την ίχνηθέτησιν ποσότης του ίχνηθέτου.

Ό μέσος χρόνος διαδρομής, \bar{T} του ύδατος από τής καταβóθρας μέχρι τής
πηγής ύπολογίζεται εκ τής σχέσεως (4) :

$$\bar{T} = \frac{\int_0^{\infty} C_t e^{\lambda t} Q_t dt}{\int_0^{\infty} C_t e^{\lambda t} Q_t dt} \quad (4)$$

Η μέση ποσότης \bar{V} τών ύπογειων ύδάτων, τά όποια κατά την στιγμήν τής
ίχνηθετήσεως εύρισκονται μεταξύ τής καταβóθρας καί τής πηγής, εύρον δέ διέ-
ξοδον εξ αυτής, ύπολογίζεται εκ τής σχέσεως (5) :

$$\bar{V} = \int_0^{\bar{T}} Q_t dt \quad (5)$$

Πλὴν τῶν ἀνωτέρω, ἐκ τοῦ σχήματος τοῦ διαγράμματος $C_1 e^{kt}$ συναρτήσῃ τοῦ χρόνου δύνανται ἐνδεχομένως νὰ ἐξαχθοῦν συμπεράσματα περὶ τῶν συνθηκῶν ροῆς τοῦ ὕδατος ἀπὸ τὴν καταβόθραν πρὸς τὴν πηγὴν.

2.1.2. Μέτρῃσις παροχῆς ἐπιφανειακοῦ ὕδατος.

Πρὸς τὸν σκοπὸν τοῦτον, χρησιμοποιοῦνται διάφοροι μέθοδοι [22], ὡς ἡ μέθοδος ἀραιώσεως, ἡ μέθοδος ὀλοκληρώσεως καὶ ἡ μέθοδος τῆς μέσης ταχύτητος.

Ἡ μέθοδος ἀραιώσεως συνίσταται εἰς τὴν προσθήκην εἰς τὸ ρέον ὕδωρ ἰχνηθέντου ὑπὸ σταθερὰν παροχὴν ἐπὶ τι χρονικὸν διάστημα. Ἀκολουθῶς μετρεῖται εἰς τὴν κατάλληλον στιγμὴν ἡ συγκέντρωσις τοῦ ραδιοϊσοτόπου εἰς τὸ ὕδωρ, εἰς σημεῖον κείμενον κατάντη τοῦ σημείου ἰχνηθετήσεως.

Τὸ σημεῖον μετρήσεως πρέπει νὰ ἀπέχη ἀπὸ τὸ σημεῖον ἰχνηθετήσεως ἀπόστασιν μεγαλυτέραν μιᾶς ἐλαχίστης, ὀριζομένης ὡς «ἐλαχίστη ἀπόστασις καλῆς μίξεως», ἡ ὁποία καθορίζεται ἀπὸ τὰ χαρακτηριστικὰ ροῆς τοῦ ὕδατος. Ἐξ ἄλλου, ἡ παροχὴ, q , τοῦ διαλύματος ἰχνηθετήσεως πρέπει νὰ εἶναι πολὺ μικροτέρα τῆς μετρομένης παροχῆς, Q .

Ἡ μετρομένη παροχὴ, κατ' αὐτὴν τὴν μέθοδον, ὑπολογίζεται ἐκ τῆς σχέσεως (6) :

$$Q = q \frac{C_1}{C_2} \quad (6)$$

ὅπου C_1 ἡ συγκέντρωσις τοῦ ἰχνηθέντου εἰς τὸ διάλυμα ἰχνηθετήσεως καὶ C_2 ἡ συγκέντρωσις αὐτοῦ εἰς τὸ ὕδωρ εἰς τὸ σημεῖον μετρήσεως.

Ἡ μέθοδος ὀλοκληρώσεως συνίσταται εἰς στιγμιαίαν προσθήκην ποσότητος A ἐνὸς ἰχνηθέντου, εἰς τι σημεῖον τοῦ συστήματος καὶ μέτρησιν τῆς μεταβολῆς τῆς συγκεντρώσεως τοῦ ἰχνηθέντου εἰς τὸ ρέον ὕδωρ, μετὰ τοῦ χρόνου, εἰς ἕτερο σημεῖον, κατάντη τοῦ πρώτου καὶ εἰς ἀπόστασιν μεγαλυτέραν τῆς ἐλαχίστης ἀποστάσεως καλῆς μίξεως.

Ἡ μετρομένη παροχὴ, κατ' αὐτὴν τὴν μέθοδον, ὑπολογίζεται ἐκ τῆς σχέσεως (7) :

$$Q = \frac{A}{\int_{-\infty}^{+\infty} C_1 dt} \quad (7)$$

ὅπου C_1 ἡ συγκέντρωσις τοῦ ραδιοϊσοτόπου εἰς τὸ σημεῖον μετρήσεως εἰς χρόνον t .

Κατὰ μίαν παραλλαγὴν τῆς μεθόδου ταύτης, εἰς τὸ σημεῖον μετρήσεως συλλέγεται καταλλήλως ἀντιπροσωπευτικὸν «μέσον δείγμα», εἰς τὸ ὁποῖο μετρεῖται

ἡ συγκέντρωσις \bar{C} , τοῦ ἰχνηθέντου. Εἰς τὴν περίπτωσιν ταύτην ἡ μετρομένη παροχὴ ὑπολογίζεται ἐκ τῆς σχέσεως (8) :

$$Q = \frac{A}{T_s \bar{C}} \quad (8)$$

ὅπου T_s ἡ διάρκεια δειγματοληψίας.

Ἡ μέθοδος τῆς μέσης ταχύτητος συνίσταται εἰς στιγμιαίαν προσθήκην ἰχνηθέντου, εἰς σημεῖον τοῦ συστήματος, καὶ μέτρησιν τῆς ταχύτητος v μετακινήσεως τοῦ «κύματος» τοῦ ἰχνηθέντου μετὰ τὴν ἐλαχίστην ἀπόστασιν καλῆς μίξεως.

Ἡ μετρομένη παροχὴ, κατ' αὐτὴν τὴν μέθοδον, ὑπολογίζεται ἐκ τῆς σχέσεως (9) :

$$Q = v \cdot S, \quad \text{ὅπου } S \text{ ἡ διαδρομὴ τοῦ ρέοντος ὕδατος.} \quad (9)$$

2.1.3. Μέτρῃσις τῆς ὀριζοντίου ταχύτητος μετακινήσεως τοῦ ὑπογείου ὕδατος.

Πρὸς τὸν σκοπὸν τοῦτον, χρησιμοποιοῦνται κυρίως ἡ τεχνικὴ τοῦ χρόνου μεταφορᾶς (transit time technique) καὶ ἡ τεχνικὴ ἀραιώσεως (borehole dilution technique ἢ single well technique).

Κατὰ τὴν τεχνικὴν τοῦ χρόνου μεταφορᾶς, ἀπαιτοῦνται τουλάχιστον δύο γεωτρήσεις, κατὰ τὴν φορὰν ροῆς τοῦ ὑπογείου ὕδατος. Ὁ ἰχνηθέντης προστίθεται εἰς τὴν γεώτρησιν, ἡ ὁποία, εὐρίσκεται ἀνάντη. Διὰ καταλλήλων μετρητῶν ραδιενεργείας παρακολουθεῖται ἡ μεταβολὴ τῆς συγκεντρώσεως τοῦ ραδιοϊσοτόπου, μετὰ τοῦ χρόνου, εἰς τὴν ἑτέραν γεώτρησιν καὶ οὕτω ὑπολογίζεται ὁ μέσος χρόνος διαδρομῆς αὐτοῦ, \bar{T} . Ἡ ὀριζοντία ταχύτης, v , τοῦ ὑπογείου ὕδατος ὑπολογίζεται ἐκ τῆς σχέσεως (10) :

$$v = \frac{L}{\bar{T}} \quad (10)$$

ὅπου L ἡ ἀπόστασις μεταξὺ τῶν δύο γεωτρήσεων.

Εἶναι εὐνόητον ὅτι, διὰ νὰ εἶναι ἀκριβῆς ἡ διὰ τῆς τεχνικῆς τοῦ χρόνου μεταφορᾶς ὑπολογιζομένη τιμὴ τῆς ὀριζοντίου ταχύτητος τοῦ ὑπογείου ὕδατος, δὲν πρέπει νὰ λαμβάνη χώραν καθυστέρησις τοῦ ραδιενεργοῦ κύματος, λόγῳ προσροφήσεως τοῦ ἰχνηθέντου εἰς τοὺς γεωλογικοὺς σχηματισμοὺς διὰ τῶν ὁποίων διέρχεται.

Κατὰ τὴν τεχνικὴν ἀραιώσεως [28] ἀπαιτεῖται μία μόνο γεώτρησις. Διὰ καταλλήλου διατάξεως ἀπομονοῦται συγκεκριμένον τμήμα τῆς γεωτρήσεως, πρὸς περιορισμὸν τῶν ἀνοδικῶν ρευμάτων, καὶ εἰσάγεται ὁ ἰχνηθέντης, ὁ ὁποῖος κατανέμεται ὁμοιογενῶς εἰς ὅλον τὸν ἀπομονωμένον ὄγκον τοῦ ὕδατος, τῇ βοηθειᾷ συστήματος ἀναδέυσεως. Ἡ ἀνάδευσις λειτουργεῖ καθ' ὅλην τὴν διάρκειαν τῆς

στοτόπου εις τὸν ἀπομονωμένον ὄγκον ὕδατος, μετὰ τοῦ χρόνου. Ἡ ὀριζοντία ταχύτης τοῦ ὑπογείου ὕδατος ὑπολογίζεται ἐκ τῆς σχέσεως (11) :

$$v = \frac{V}{aFt} \ln \frac{c_t e^{\lambda t}}{c_0} \quad (11)$$

ὅπου c_0 ἡ συγκέντρωσις τοῦ ραδιοϊσότοπου εις τὸν ἀπομονωμένον ὄγκον V τοῦ ὕδατος τῆς γεωτρήσεως εις χρόνον μηδέν, c_t ἡ τοιαύτη εις χρόνον t , F ἡ κάθετος πρὸς τὴν κατεύθυνσιν ροῆς τοῦ ὕδατος ἐνεργὸς διατομὴ τοῦ ἀπομονωμένου τμήματος τῆς γεωτρήσεως καὶ a συντελεστής [29] ὁ ὁποῖος ἐκφράζει τὴν διαταραχὴν τὴν ὁποίαν ὑπέστησαν αἱ γραμμαὶ ροῆς τοῦ ὕδατος λόγῳ τῆς ὑπάρξεως τῆς γεωτρήσεως.

2.1.4. Προσδιορισμὸς τῆς κατευθύνσεως ροῆς τοῦ ὑπογείου ὕδατος.

Κατὰ μίαν τεχνικὴν, ἀπομονοῦται συγκεκριμένον τμήμα μιᾶς γεωτρήσεως, εις τὸ ὁποῖον διὰ εἰδικῆς συσκευῆς ἐκχύεται στιγμιαίως κατάλληλος ἰχνηθέτης. Ὁ ἰχνηθέτης οὗτος πρέπει νὰ προσροφᾶται ἐντόνως ἀπὸ τὰ τοιχώματα τῆς γεωτρήσεως.

Εἶναι εὐνόητον ὅτι ἡ μεγαλύτερα ποσότης τοῦ ἰχνηθέτου θὰ προσροφηθῆ εἰς τὸ τμήμα τῶν τοιχωμάτων τῆς γεωτρήσεως, τὸ ὁποῖον εὐρίσκεται πρὸς τὴν κατεύθυνσιν ροῆς τοῦ ὕδατος. Διὰ κατάλληλου μετρητικῆς διατάξεως ἐντοπίζεται τὸ τμήμα τοῦτο τῶν τοιχωμάτων τῆς γεωτρήσεως καὶ οὕτω προσδιορίζεται ἡ κατεύθυνσις ροῆς τοῦ ὑπογείου ὕδατος.

Κατὰ μίαν διαφορετικὴν τεχνικὴν, ὁ ἰχνηθέτης προστίθεται εἰς μίαν κεντρικὴν γεώτρησιν, ἡ δὲ κατεύθυνσις κινήσεως αὐτοῦ προσδιορίζεται τῇ βοήθειᾳ καταλλήλων γεωτρήσεων παρατηρήσεως. Εἶναι εὐνόητον ὅτι ὁ χρησιμοποιούμενος κατὰ τὴν τεχνικὴν ταύτην ἰχνηθέτης δὲν πρέπει νὰ συγκρατῆται εἰς τοὺς γεωλογικοὺς σχηματισμοὺς διὰ τῶν ὁποίων διέρχεται.

2.1.5. Ἐξακρίβωσις τῆς ὑπάρξεως καθέτων ρευμάτων εἰς μίαν γεώτρησιν καὶ μέτρησις τῆς ταχύτητος αὐτῶν.

Πρὸς τὸν σκοπὸν τοῦτον εἰσάγεται δι' εἰδικῆς διατάξεως μικρὰ ποσότης ἰχνηθέτου εἰς συγκεκριμένον σημεῖον τῆς γεωτρήσεως καὶ διὰ καταλλήλως τοποθετημένων μετρητῶν ραδιενεργείας παρακολουθεῖται ἡ κίνησις αὐτοῦ πρὸς τὰ ἄνω ἢ πρὸς τὰ κάτω, ἐνῶ ταυτοχρόνως μετρεῖται ἡ ταχύτης τῆς τοιαύτης κινήσεως.

2.1.6. Ἐξακρίβωσις τῆς πραγματικῆς καταστάσεως ροῆς τοῦ εἰσαγομένου τεχνητῶς ὕδατος εἰς ὑπογείους ὑδροφόρους ὀρίζοντας.

Κατὰ τὸν τεχνητὸν ἐμπλουτισμὸν ἑνὸς ὑδροφόρου ὀρίζοντος, ἡ ροὴ τοῦ εἰσαγομένου τεχνητῶς ὕδατος ἐπηρεάζεται ἰσχυρῶς ἀπὸ τὴν κατεύθυνσιν καὶ τὴν

ἔντασιν ροῆς τοῦ φυσικοῦ ὑπογείου ὕδατος, ὡς ἐπίσης καὶ ἀπὸ τὴν ἐνδεχομένην ὑπαρξιν σταθμῶν ἀντλήσεως εἰς τὴν παρακειμένην περιοχὴν.

Ὁ μηχανισμὸς ἀναμίξεως τοῦ τεχνητῶς εἰσαγομένου ὕδατος μετὰ τοῦ παλαιοῦ τοιοῦτου καθορίζεται ἀπὸ συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τοῦ ὑδροφόρου ὀρίζοντος.

Τὰ ραδιοϊσότοπα, πλὴν τῆς συμβολῆς τῶν κατὰ τὴν ἔρευναν τῶν χαρακτηριστικῶν ἑνὸς ὑδροφόρου ὀρίζοντος, προσφέρονται [30, 31] ἐπίσης διὰ τὴν ἐξακρίβωσιν, εἰς εὐρεῖαν κλίμακαν, τῆς πραγματικῆς καταστάσεως ροῆς (flow pattern) τοῦ εἰσαγομένου τεχνητῶς ὕδατος, ὡς καὶ τοῦ μηχανισμοῦ ἀναμίξεως τοῦτου μετὰ τοῦ φυσικοῦ ὑπογείου ὕδατος.

Πρὸς τοῦτο, μεγάλαι ποσότητες ὕδατος, περιέχοντος ἐν διαλύσει κατάλληλον ἰχνηθέτην, εἰσάγονται τεχνητῶς εἰς τὸν ὑπόγειον ὀρίζοντα καὶ παρακολουθεῖται ἡ κίνησις αὐτοῦ διὰ καταλλήλων γεωτρήσεων παρατηρήσεως, ὑπὸ διαφόρων συνθήκας ἀντλήσεως ὕδατος εἰς τὴν παρακειμένην περιοχὴν. Ἐκ τῆς μορφῆς τῆς κινήσεως ταύτης, ἐκτιμᾶται ἡ ἐπίδρασις τῆς φυσικῆς ροῆς τοῦ ὕδατος εἰς τὸν ὑδροφόρον ὀρίζοντα (aquifer-flow coefficient).

Μετὰ ταῦτα, ἀκολουθεῖ ἀντλήσις ὕδατος ἐκ τῆς αὐτῆς γεωτρήσεως, διὰ τῆς ὁποίας ἐπραγματοποιήθη ἡ φόρτισις, καὶ μετρεῖται ἡ μεταβολὴ τῆς συγκεντρώσεως τοῦ ἰχνηθέτου εἰς αὐτὸ. Ἐκ τοῦ διαγράμματος τῆς σχετικῆς συγκεντρώσεως τοῦ ἰχνηθέτου εἰς τὸ ἀντλούμενον ὕδωρ, ἐναντι τῆς σχετικῆς, ὡς πρὸς τὴν τεχνητῶς εἰσαχθεῖσαν ποσότητα ὕδατος, ἀντληθείσης ποσότητος ὕδατος, λαμβάνεται [30, 32] συντελεστής (dispersity of the porous medium), ὁ ὁποῖος χρησιμεύει διὰ τὴν μαθηματικὴν περιγραφὴν τοῦ μηχανισμοῦ ἀναμίξεως τοῦ τεχνητῶς εἰσαγομένου ὕδατος μετὰ τοῦ φυσικοῦ τοιοῦτου.

Ἐκ τυχόν ἀνωμαλιῶν εἰς τὸ διάγραμμα τῆς σχετικῆς, ὡς πρὸς τὴν μεγίστην τοιαύτην, συγκεντρώσεως τοῦ ἰχνηθέτου, ἐναντι τῆς ἀντληθείσης ποσότητος ὕδατος, εἶναι δυνατόν νὰ διαπιστωθῇ ἡ ὑπαρξίς εἰς τὸν ὑπὸ μελέτην ὑδροφόρον ὀρίζοντα ἀγωγῶν ἐκλεκτικῆς κινήσεως τοῦ ὑπογείου ὕδατος.

2.1.7. Ἐντοπισμὸς διαρροῶν εἰς ἐπιφανειακά ἀποθέματα ὕδατος (Λίμνες - Φράγματα).

Κατὰ μίαν τεχνικὴν, χρησιμοποιεῖται εὐκόλως προσροφώμενος ἰχνηθέτης, ὁ ὁποῖος προστίθεται πλησίον τοῦ πυθμένου τοῦ ἀποδέκτου ἢ ἀναμιγνύεται ὁμοιογενῶς εἰς ὀλόκληρον τὴν ποσότητα τοῦ περιεχομένου εἰς αὐτὸν ὕδατος. Μετὰ παρόδου καταλλήλου χρονικοῦ διαστήματος, μετρεῖται ἡ προσροφηθεῖσα, εἰς ἕκαστον σημεῖον τοῦ πυθμένου τοῦ ἀποδέκτου, ποσότης τοῦ ἰχνηθέτου. Τὰ σημεῖα διαρροῆς ἐντοπίζονται [33] εἰς τὰς περιοχὰς μεγαλύτερας συγκεντρώσεως τοῦ ἰχνηθέτου.

Κατὰ ἑτέραν τεχνικὴν, χρησιμοποιεῖται μὴ προσροφώμενος ὑπὸ τῶν συνι-
κατὰ τοιχώματα τοῦ ἀποδέκτου ἰχνηθέτης, ὁ ὁποῖος ἀναμιγνύεται ὁμοιογενῶς εἰς ὀλόκληρον τὴν ἐντὸς τοῦ ἀποδέκτου περιεχομένην ποσότητα ὕδατος.

Μετρήσεις ραδιενεργείας λαμβάνουν χώραν εις τὸ ὕδωρ τῶν γειτονικῶν τοῦ ἀποδέκτου ἀναβλύσεων, διὰ τὰς ὁποίας ὑπάρχει ἡ ὑποψία ὅτι ὀφείλονται εἰς διαρροὰς αὐτοῦ. Ἡ ἐμφάνισις τοῦ ἰχνηθέντος εἰς τὸ ὕδωρ τῶν ἀναβλύσεων ἀποδεικνύει [33, 34] τὴν ὑπαρξίν διαρροῆς ἢ διαρροῶν εἰς τὸν ἀποδέκτην.

Κατὰ μίαν παραλλαγὴν τῆς προηγουμένης τεχνικῆς, ὁ ἰχνηθέτης δὲν ἀναμιγνύεται εἰς ὅλον τὸ ὕδωρ τοῦ ἀποδέκτου. Ὁ ἰχνηθέτης εἰσάγεται εἰς διάτρητον σωλῆναν ἐγκατεστημένου εἰς τὴν ὑποπτον διὰ διαρροὰς περιοχὴν τοῦ πυθμένος τοῦ ἀποδέκτου.

Πλὴν τῶν ἀνωτέρω τεχνικῶν, εἶναι δυνατὸν νὰ χρησιμοποιηθῇ κατάλληλος διάταξις [33], διὰ τῆς ὁποίας ἐντοπίζονται τυχὸν συγκλίνοντα ρεύματα πρὸς συγκεκριμένα σημεῖα τοῦ πυθμένος τοῦ ἀποδέκτου.

2.1.8. Μελέτη τῆς κινήσεως καὶ μεταφορᾶς φερτῶν ὑλῶν.

Πρὸς τὸν σκοπὸν τοῦτον, ποσότης φυσικῶν φερτῶν ὑλῶν ἢ τεχνητὰ ὑποκατάστατα τούτων ἐπισημαίνονται [36 - 73] διὰ ραδιοϊσοτόπων καὶ παρακολουθεῖται ἡ κίνησις αὐτῶν διὰ καταλλήλων μετρητικῶν διατάξεων. Διὰ τῆς τεχνικῆς ταύτης ἐξάγονται συμπεράσματα τόσον ὡς πρὸς τὴν κατεύθυνσιν καὶ ταχύτητα μετακινήσεως τῶν φερτῶν ὑλῶν, ὅσον καὶ ὡς πρὸς τὴν «παροχὴν» αὐτῶν.

2.2. Χῆσις χημικῶν ἰχνηθετῶν καὶ ἐφαρμογὴ τῆς ραδιενεργοποιήσεως ὡς ἀναλυτικῆς μεθόδου.

Ὡς γνωστὸν, διὰ βομβαρδισμοῦ σταθερῶν πυρήνων διὰ διαφόρων σωματιδίων καταλλήλου ἐνεργείας, προκαλεῖται μεταστοιχείωσις τῶν σταθερῶν πυρήνων, σιὰ τῆς συσσωματώσεως εἰς αὐτοὺς τῶν προσπιπτόντων σωματιδίων. Οἱ παραγόμενοι οὕτω νέοι πυρήνες εἶναι βαρύτεροι καὶ κατὰ κανόνα εὐρίσκονται ἐκτὸς τῆς περιοχῆς σταθερότητος, ὡς πρὸς τὸν συνδυασμὸν τοῦ ἀριθμοῦ τῶν περιεχομένων ἐντὸς αὐτῶν πρωτονίων καὶ νετρονίων. Μὲ ἄλλα λόγια, οἱ νέοι αὐτοὶ πυρήνες εἶναι ραδιενεργοί, μεταπίπτουν δὲ εἰς σταθερωτέρας μορφὰς διὰ τῆς ἐκπομπῆς πυρηνικῆς ἀκτινοβολίας.

Τὰ νετρόνια πλεονεκτοῦν ἔναντι τῶν ἄλλων σωματιδίων διὰ τὴν πρόκλησιν πυρηνικῶν ἀντιδράσεων. Τοῦτο ὀφείλεται εἰς τὸ ὅτι τὰ νετρόνια εἶναι οὐδέτερα ἠλεκτρικῶς καὶ ὡς ἐκ τούτου δὲν ὑφίστανται τὴν ἐπίδρασιν ἀπωστικῶν δυνάμεων Coulomb, κατὰ τὴν διέλευσίν των διὰ μέσφ τοῦ ἠλεκτρικοῦ πεδίου, τὸ ὅποιο περιβάλλει τοὺς πυρήνας τῶν ἀτόμων, οὔτε χάνουν μέρος τῆς ἐνεργείας των, διὰ τῶν ἰονισμῶν τῶν ἀτόμων τῆς ὕλης, διὰ τῆς ὁποίας διέρχονται.

Κατὰ τὴν ραδιενεργοποίησιν διὰ νετρονίων ἰσχύει ἡ κάτωθι ποσοτικὴ σχέσις :

$$S_i = \frac{N\sigma\Phi a}{3,7 \cdot 10^{10} \text{ W}} (1 - e^{-\lambda t})$$

δπου S_i ἡ εἰδικὴ ραδιενέργεια τοῦ παραχθέντος ραδιοϊσοτόπου, N ὁ ἀριθμὸς τοῦ Avogadro, Φ ἡ ροὴ τῶν νετρονίων, W τὸ ἀτομικὸ βάρους τοῦ στοιχείου - στόχου, λ ἡ σταθερὰ ραδιενεργοῦ διασπάσεως τοῦ ραδιοϊσοτόπου, t ὁ χρόνος ἀκτινοβολήσεως καὶ σ ἡ ἐνεργὸς διατομὴ τῶν πυρήνων - στόχων.

Ἡ ἐνεργὸς διατομὴ ἐκφράζει τὴν πιθανότητα συλλήψεως ἑνὸς συγκεκριμένου νετρονίου ὑπὸ ἑνὸς συγκεκριμένου πυρήνος - στόχου. Ἡ πιθανότης αὕτη παρίσταται ὡς ὑποθετικὴ κυκλικὴ ἐπιφάνεια, ἡ ὁποία περιβάλλει τὸν πυρήνα - στόχον, καθέτως πρὸς τὴν διεύθυνσιν ροῆς τῶν νετρονίων, ἀπὸ τὴν ὁποίαν καὶ μόνον ἐὰν διέλθῃ ἓνα νετρόνιο, εἶναι δυνατὸν νὰ συλληφθῇ τοῦτο ὑπὸ τοῦ πυρήνος. Ἡ ἐνεργὸς διατομὴ, ὡς πρὸς τὰ νετρόνια, ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὴν ἐνέργειαν τῶν νετρονίων, καὶ εἶναι χαρακτηριστικὴ τοῦ ἰσοτόπου τοῦ στόχου.

Ἡ ἀνωτέρω ποσοτικὴ σχέσις ἰσχύει ὑπὸ τὴν προϋπόθεσιν ὅτι, ἀφ' ἑνὸς μὲν, ἡ ροὴ τῶν νετρονίων εἶναι σταθερὰ καὶ δὲν ἐλαττοῦται μὲ τὸ πάχος τοῦ δείγματος - στόχου, ἀφ' ἑτέρου δέ, ὁ ἀριθμὸς τῶν ἀτόμων τοῦ ἰσοτόπου - στόχου δὲν ἠλαττώθη σημαντικῶς κατὰ τὸν χρονικὸν διάστημα τῆς ἀκτινοβολήσεως.

Εἰς τὰς περισσοτέρας τῶν μέχρι ταῦτα ἀναφερθέντων ἐφαρμογῶν εἶναι δυνατὴ ἡ χρησιμοποίησις, ἀντὶ τοῦ ραδιοἰχνηθέντος, καταλλήλου χημικοῦ ἰχνηθέντος. Ἡ πορεία τοῦ χημικοῦ ἰχνηθέντος παρακολουθεῖται διὰ συλλογῆς δειγμάτων καὶ ἀναλύσεως αὐτῶν διὰ τῆς μεθόδου τῆς ραδιοενεργοποιήσεως.

Ἡ ραδιενεργοποίησις συνίσταται εἰς τὴν ἐκθεσιν ἑνὸς δείγματος εἰς κατάλληλον ἀκτινοβολίαν, ὅτε, ἀναλόγως τῆς συστάσεως αὐτοῦ, παράγονται τὰ ἀντίστοιχα ραδιοϊσότοπα. Διὰ καταλλήλου ἀναλύσεως τῆς ὑπὸ τῶν ραδιοϊσοτόπων τούτων ἐκπεμπομένης ἀκτινοβολίας, ἐπισημαίνεται ἡ παρουσία τοῦ χημικοῦ ἰχνηθέντος εἰς τὸ ἀναλυθὲν δεῖγμα. Ἐξ ἄλλου, διὰ συγκρίσεως τῆς ποσότητος τῆς ὑπὸ τοῦ πρὸς ἀνάλυσιν δείγματος ἐκπεμπομένης ἀκτινοβολίας, πρὸς τὴν ποσότητα τῆς ἀκτινοβολίας δείγματος ἀναφορᾶς, ἐπιτυγχάνονται ποσοτικοὶ προσδιορισμοί.

Πλεονεκτήματα τῶν βασιζομένων εἰς τὴν μέθοδον ταύτην ἐφαρμογῶν ἀποτελοῦν, ἀφ' ἑνὸς μὲν, ἡ ἔλλειψις κινδύνων ἐκ τῆς ραδιενεργείας διὰ τὸν πληθυσμὸν, ἀφ' ἑτέρου δέ, ἡ δυνατότης χρησιμοποίησεως ταυτοχρόνως πολλῶν χημικῶν ἰχνηθετῶν εἰς τὸ αὐτὸ πείραμα, μὲ τὴν αὐτὴν οἰκονομικὴν ἐπιβάρυνσιν.

Μειονεκτήματα τῶν ἐφαρμογῶν τούτων εἶναι ἡ μικροτέρα εὐαισθησία τῶν ἀπαραιτῶν μετρήσεων, ἡ ἀνάγκη χρησιμοποίησεως σημαντικῶν ποσοτήτων ἰχνηθέντος, ἢ διὰ τῆς συλλογῆς μεγάλου ἀριθμοῦ δειγμάτων οἰκονομικὴ ἐπιβάρυνσις τῶν ἀντιστοίχων ἐργασιῶν, ἢ ἀνάγκη ἀποστολῆς τῶν συλλεγομένων δειγμάτων εἰς ἐργαστήριον ἐφοδιασμένον διὰ καταλλήλων ἐγκαταστάσεων ραδιενεργοποιήσεως καὶ ἀναλύσεως (ἀντιδραστήρα) κ.ἄ.

2. 3. Χρήσις τῶν ραδιοϊσοτόπων ὑπὸ μορφῆν κλειστῶν πηγῶν.

Αἱ ἀντίστοιχοι ἐφαρμογαὶ στηρίζονται γενικῶς εἰς τὸ γεγονός ὅτι αἱ ἐπιδράσεις τῆς ὕλης ἐπὶ τῶν κυριωτέρων ἐν χρήσει ἀκτινοβολιῶν ἀκολουθοῦν ἐν πολλοῖς γνωστοῖς μαθηματικοῖς νόμοις.

Οὕτω, π.χ. ἡ σχετικὴ ἐλάττωσις τῆς ἐντάσεως στενῆς δέσμης μονοενεργητικῆς ἠλεκτρομαγνητικῆς ἀκτινοβολίας, διὰ παρεμβολῆς μεταξὺ πηγῆς καὶ μετρητοῦ ποσότητος ὕλης, ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὴν χημικὴν σύστασιν τῆς ὕλης καὶ τὴν ποσότητα αὐτῆς.

Προκειμένου περὶ ὕλης ἀποτελουμένης ἐξ' ἐνὸς στοιχείου ἢ ὡς ἄνω σχετικῆς ἐλάττωσις τῆς ἐντάσεως τῆς ἀκτινοβολίας δίδεται ἀπὸ τὴν κάτωθι ἀπλῆν μαθηματικὴν σχέσιν :

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu_m x} \quad (13)$$

ὅπου I_0 ἡ μετρούμενη ἔντασις τῆς ἀκτινοβολίας πρὸ τῆς παρεμβολῆς τῆς ὕλης μεταξὺ τῆς πηγῆς καὶ τοῦ μετρητοῦ, I ἡ τοιαύτη ἔντασις μετὰ τὴν παρεμβολὴν τῆς ὕλης, μ_m συντελεστὴς ἐξαρτώμενος ἀπὸ τὸ εἶδος τῆς ὕλης καὶ τὴν ἐνέργειαν τῆς ἠλεκτρομαγνητικῆς ἀκτινοβολίας, ὁ ὁποῖος καλεῖται μαζικὸς συντελεστὴς ὀλικῆς ἀπορροφῆσεως, καὶ x τὸ πάχος τῆς ὕλης μεταξὺ πηγῆς καὶ μετρητοῦ.

Προκειμένου περὶ ὕλης ἀποτελουμένης ἐκ περισσοτέρων τοῦ ἐνὸς στοιχείων,

$$\bar{\mu}_m = \sum_{i=1}^n \mu_{m_i} \rho_i \quad (14)$$

ὅπου $\bar{\mu}_m$ ὁ μέσος μαζικὸς συντελεστὴς ἀπορροφῆσεως, n ὁ ἀριθμὸς τῶν συστατικῶν, μ_{m_i} ὁ μαζικὸς συντελεστὴς ἀπορροφῆσεως ἐνὸς συγκεκριμένου συστατικοῦ καὶ ρ_i ἡ σχετικὴ ἀναλογία τούτου κατὰ βάρους.

Ὅσον ἀφορᾷ εἰς τὰ νετρόνια, ταῦτα, στερούμενα ἠλεκτρικοῦ φορτίου, συνιστοῦν τὴν πλέον διεισδυτικὴν ἐντὸς τῆς ὕλης ἀκτινοβολίαν. Ἀναλόγως τῆς ἐνεργείας τῶν, διακρίνονται εἰς ταχέα νετρόνια (10 Mev ἕως 10 Kev), ἐπιθερμικὰ νετρόνια (10 Kev ἕως 1 ev) καὶ θερμικὰ νετρόνια (1 ev ἕως 0,01 ev).

Τὰ νετρόνια, κατὰ τὴν στιγμὴν τῆς δημιουργίας τῶν, κέκτεινται σημαντικὴν ἐνέργειαν. Κατὰ τὴν διόδον τῶν διὰ μέσου τῆς ὕλης συγκρούονται μετὰ τῶν πυρηνῶν κυρίως τῶν συνιστῶντων τὴν ὕλην ἀτόμων. Ἀποτέλεσμα τῶν τοιούτων συγκρούσεων εἶναι πρωτίστως ἡ ἐπιβράδυνσις τῶν νετρονίων, δευτερευόντως δέ, ἐφ' ὅσον ἡ ἐνέργειά τῶν ἔχει κατέλθει εἰς σημαντικῶς χαμηλὰ ἐπίπεδα, ἡ σύλληψις τῶν ὑπὸ τῶν πυρηνῶν τῶν ἀτόμων τῆς ὕλης.

Ἡ μέση ἐνέργεια τὴν ὁποίαν χάνει ἕκαστον νετρόνιον, κατὰ μίαν ἐλαστικὴν κρούσιν μεθ' ἐνὸς πυρηνῶς μαζικοῦ ἀριθμοῦ A , εἶναι ἀνάλογος τοῦ λόγου

$$\frac{A}{(A+1)^2} \quad (15)$$

Τοῦτο σημαίνει ὅτι ὁ ρυθμὸς ἐπιβραδύνσεως τῶν νετρονίων εἶναι τόσο ἐντονώτερος, ὅσον ἡ μᾶζα τῶν πυρηνῶν, μετὰ τῶν ὁποίων συγκρούονται, εἶναι μικρότερα. Ἰδιαιτέρως ἐντονος εἶναι ὁ ρυθμὸς ἐπιβραδύνσεως τῶν νετρονίων κατὰ τὰς συγκρούσεις τῶν μετὰ πυρηνῶν ὑδρογόνου.

Ἐκ τῶν διαφόρων περιπτώσεων, εἰς τὰς ὁποίας ἔχει καθιερωθῆ ἡ χρήσις τῶν ραδιοϊσοτόπων ὑπὸ μορφῆν κλειστῶν πηγῶν εἰς τὴν ὑδρολογία, ἐκτίθενται, κατωτέρω, ἐν συντομίᾳ, ἡ συνεχῆς μέτρησις τοῦ πάχους χιόνου, ὁ προσδιορισμὸς τῆς ποσότητος τῶν ἐν αἰωρῆσει φερτῶν ὑλῶν, ὁ προσδιορισμὸς ὑγρασίας ἐδάφους, ὁ προσδιορισμὸς τῆς πυκνότητος ἐδάφους καὶ ἡ ἀνάλυσις τοῦ ἐδάφους ἀπὸ ἀπόψεως συστάσεως.

2. 3. 1. Συνεχεῖς μετρήσεις τοῦ πάχους χιόνου.

Πρὸς τὸν σκοπὸν τοῦτον δύνανται νὰ χρησιμοποιηθοῦν διάφοροι διατάξεις. Μία ἐξ αὐτῶν συνίσταται ἐκ ραδιενεργοῦ πηγῆς, τοποθετημένης εἰς κοιλότητα τοῦ ἐδάφους καὶ καταλλήλου μετρητοῦ ραδιενεργείας, τοποθετημένου ἄνωθεν αὐτῆς.

Ὁ ὑπὸ τοῦ μετρητοῦ ραδιενεργείας καταγραφόμενος ρυθμὸς κρούσεων ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὴν ποσότητα τῆς χιόνου, ἡ ὁποία παρεμβάλεται μεταξὺ πηγῆς καὶ μετρητοῦ. Ἡ ἀκριβὴς ἀντιστοιχία, μεταξὺ ρυθμοῦ κρούσεων καὶ πάχους τοῦ στρώματος τῆς χιόνου, προσδιορίζεται διὰ καταλλήλου βαθμολογήσεως τῆς περιγραφόμενης διατάξεως.

Τὸ ὅλον σύστημα εἶναι δυνατόν νὰ εὑρίσκειται εἰς ἀσύρματον ἢ ἐνσύρματον ἐπικοινωνίαν με κεντρικὸν σταθμόν. Οὕτω, ἡ τεχνικὴ αὕτη ἀποκτᾷ σημαντικὴν σημασίαν, κυρίως προκειμένου διὰ μὴ εὐκόλως προσιτᾶς, κατὰ τὴν περίοδον τῶν χιόνων, περιοχᾶς.

2. 3. 2. Προσδιορισμὸς τῆς ποσότητος τῶν ἐν αἰωρῆσει φερτῶν ὑλῶν.

Πρὸς τὸν σκοπὸν τοῦτον τοποθετεῖται ἐντὸς τῆς ροῆς τοῦ ὕδατος, τοῦ ὁποίου ἐπιθυμοῦμε νὰ μετρήσωμεν τὴν περιεκτικότητα εἰς φερτὰς ὑλᾶς, ἐν αἰωρῆσει κατάλληλος διάταξις [73], λειτουργοῦσα αὐτομάτως. Δι' αὐτῆς μετρεῖται ἐναλλάξ, ἀφ' ἐνὸς μὲν, ἡ ἔντασις ἀκτινοβολίας, διερχομένης διὰ τοῦ ὕδατος, τοῦ ὁποίου ἐπιθυμοῦμε νὰ μετρήσωμεν τὴν περιεκτικότητα εἰς φερτὰς ὑλᾶς ἐν αἰωρῆσει, ἀφ' ἐτέρου δέ, ἡ ἔντασις τῆς αὐτῆς ἀκτινοβολίας, διερχομένης ἐκ τοῦ αὐτοῦ ὄγκου ἀπεσταγμένου ὕδατος.

Ἐξ ἐκάστου, ὡς ἀνωτέρω, ζεύγους μετρήσεων ὑπολογίζεται ἡ περιεκτικότης εἰς φερτὰς ὑλᾶς ἐν αἰωρῆσει, ἐπὶ τῇ βάσει τῆς σχέσεως (16) :

$$\frac{N_\mu}{N_\nu} = e^{-t/s} \quad (16)$$

ὁ ἀριθμὸς κρούσεων εἰς τὴν περίπτωσιν τοῦ μίγματος ὕδατος καὶ φερτῶν ὑλῶν, N_ν αἱ ἀντίστοιχοι κρούσεις εἰς τὴν περίπτωσιν τοῦ ἀπεσταγμένου ὕδατος,

f ή σχετική αναλογία κατά βάρος του μίγματος εις φερτάς ύλας και s σταθερά του συστήματος, της οποίας ή φυσική έννοια δίδεται από την σχέσιν :

$$S = 1 / \rho_v \chi (\mu_\phi - \rho_v \mu_v / \rho_\phi) \quad (17)$$

όπου μ_v και ρ_v ο μαζικός συντελεστής απορροφήσεως και ή πυκνότης αντίστοιχως του απεσταγμένου ύδατος, μ_ϕ και ρ_ϕ τὰ αντίστοιχα μεγέθη όσον αφορά τὰς φερτάς ύλας και χ τὸ μήκος της ἐπ' εὐθείας διαδρομῆς της ἀκτινοβολίας ἐντὸς ἀμφοτέρων, του απεσταγμένου ύδατος και του μίγματος ύδατος και φερτῶν ύλων.

Τὰ ἀνωτέρω ἰσχύουν διὰ περιεκτικότητα εις φερτάς ύλας μέχρι 50000 ppm ($f = 0,05$).

2.3.3. Προσδιορισμὸς ὑγρασίας ἐδάφους.

Ἡ τεχνικὴ αὕτη [74, 75] στηρίζεται εις τὴν ιδιότητα τῶν πυρήνων τῶν ἀτόμων του ὑδρογόνου νὰ ἐπιβραδύνουν τὰ ταχέα νετρόνια εις ἐντονώτερον ρυθμὸν ἀπὸ οἰοδήποτε ἄλλο στοιχεῖο.

Οὕτω, ἐὰν πηγὴ ταχέων νετρονίων εὐρίσκεται εις κατάλληλον ἀπόστασιν ἀπὸ μετρητὴν θερμικῶν νετρονίων, ἀμφότερα δὲ περιβάλλονται ἀπὸ ὕλην, αἱ ἐνδείξεις του μετρητοῦ θὰ ἐπηρεάζονται πρωτίστως ἀπὸ τὴν περιεκτικότητά της ὕλης εις ὑδρογόνον.

Δεδομένου ὅτι τὸ πλεῖστον του ὑδρογόνου εις τὸ ἔδαφος εὐρίσκεται ὑπὸ μορφήν ὕδατος, τὸ ἀνωτέρω φαινόμενον δύναται νὰ χρησιμοποιηθῆ ἐπιτυχῶς διὰ τὸν προσδιορισμὸν ὑγρασίας εις τὸ ἔδαφος.

Κατὰ τὰς σχετικὰς μετρήσεις, δεόν νὰ λαμβάνεται ὑπ' ὄψιν ὅτι αἱ ἀντίστοιχοι ἐνδείξεις ἐπηρεάζονται ἐπίσης ἀπὸ τὴν χημικὴν σύστασιν του ἐδάφους, καθὼς και ἀπὸ τὴν ποσότητα του ὕδατος, τὸ ὁποῖον εὐρίσκεται «ἠνωμένον», εις ὀρισμένης κατηγορίας πετρώματα. Ἡ ἐπίδρασις τῶν παραγόντων τούτων, εις τὴν ἀκρίβειαν τῶν λαμβανομένων ἀποτελεσμάτων, δύναται νὰ περιορισθῆ σημαντικῶς διὰ κατάλληλων βαθμολογήσεων της μετρητικῆς διατάξεως και παραλλήλου συνδυασμοῦ τῶν σχετικῶν μετρήσεων μετ' ἄλλων τοιούτων, ὡς π.χ. μετρήσεων ὀλικῆς πυκνότητος, λιθολογικῶν μετρήσεων και προσδιορισμοῦ της χημικῆς συστάσεως του ἐδάφους.

2.3.4. Προσδιορισμὸς πυκνότητος ἐδάφους.

Ὡς ἤδη ἀνεφέρθη, τὸ ποσοστὸν ἀπορροφήσεως γ -ἀκτινοβολίας, κατὰ τὴν διέλευσιν της διὰ μέσου ὕλης σταθεροῦ πάχους, εἶναι συνάρτησις κυρίως του φάσματος ἐνεργείας της ἀκτινοβολίας, της συστάσεως της ὕλης και της πυκνότητος αὐτῆς. Τὰ αὐτά, κατ' ἀναλογίαν, ἰσχύουν και προκειμένου διὰ τὸ ποσοστὸν σκεδάσεως, καθ' ὀρισμένην γωνίαν, της γ -ἀκτινοβολίας.

Διὰ τὸν προσδιορισμὸν πυκνότητος του ἐδάφους, δύναται νὰ χρησιμοποιηθῶν διατάξεις [74,75], στηριζόμεναι τόσον εις τὴν μέτρησιν της ἐντάσεως γ -ἀκτι-

νοβολίας, ἢ ὁποία διέρχεται διὰ μέσου ἐδάφους εὐρισκομένου μεταξὺ της πηγῆς και του μετρητοῦ, ὅσον και εις τὴν μέτρησιν της σκεδαζομένης γ -ἀκτινοβολίας ἐντὸς ἐδάφους περιβάλλοντος πηγὴν και μετρητὴν.

Κατ' ἀμφοτέρας τὰς τεχνικάς, δεόν νὰ λαμβάνεται ὑπ' ὄψιν ὅτι ἡ χημικὴ σύστασις του ἐδάφους και ἡ ποσότης ὑγρασίας ἐντὸς αὐτοῦ συνιστοῦν σημαντικούς παράγοντας, οἱ ὁποῖοι ἐπηρεάζουν τὴν ἀκρίβειαν της προσδιοριζομένης πυκνότητος του ἐδάφους. Ἡ ἐπίδρασις αὕτη δύναται νὰ περιορισθῆ διὰ κατάλληλων βαθμολογήσεων τῶν μετρητικῶν διατάξεων.

2.3.5. Ἀνάλυσις της συστάσεως ἐδάφους.

Πρὸς τὸν σκοπὸν τούτον, ἐφαρμόζεται τεχνικὴ διὰ νετρονικῆς ἐνεργοποιήσεως, ὡς αὕτη ἀνεπτύχθη εις 2.2.

Ἡ ἀντίστοιχος μετρητικὴ διάταξις [74, 75] συνίσταται ἀπὸ κατάλληλον πηγὴν νετρονίων και μετρητὴν γ -ἀκτινοβολιῶν. Ἡ πηγὴ νετρονίων χρησιμεύει διὰ τὴν ραδιενεργοποίησιν ἀτόμων τῶν στοιχείων της ὕλης ἐκ της ὁποίας συνίσταται τὸ ἔδαφος, τὸ ὁποῖον περιβάλλει τὴν μετρικὴν διάταξιν. Ἡ ἐκπεπομένη ὑπὸ τῶν οὕτω ραδιενεργῶν ἀτόμων γ -ἀκτινοβολία ἀναλύεται τῇ βοθηαῖα καταλλήλων ἠλεκτρονικῶν ὀργάνων.

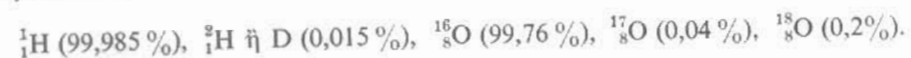
Ἡ κατάλληλος βαθμολόγησις της μετρικῆς διατάξεως και ἡ ἱκανοποιητικὴ ἐμπειρία του ἐρμηνεύοντος τὰ ἀποτελέσματα τῶν σχετικῶν μετρήσεων εἶναι ἀπαραίτηται διὰ τὴν ἐπίτευξιν ἱκανοποιητικῆς ἀκρίβειας κατὰ τὴν ποσοτικὴν ἀνάλυσιν του ἐδάφους.

3. ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Ἡ ὑδρολογία τῶν φυσικῶν ἰσοτόπων του περιβάλλοντος συμπεριλαμβάνει, ἀφ' ἐνὸς μὲν τὴν τεχνικὴν τῶν σταθερῶν ἰσοτόπων του περιβάλλοντος, ἀφ' ἑτέρου δὲ τὴν τοιαύτην τῶν ραδιενεργῶν φυσικῶν ἰσοτόπων.

3.1. Ἰσοτοπικὴ σύστασις του ὕδατος.

Τὸ μόριον του ὕδατος ἀποτελεῖται, ὡς γνωστὸν, ἀπὸ τὰ στοιχεῖα ὑδρογόνου και ὀξυγόνου. Τὰ στοιχεῖα ταῦτα ἔχουν τὰ κάτωθι σταθερὰ ἰσότοπα (ἐντὸς παρενθέσεως ἢ μέση ἰσοτοπικὴ ἀφθονία ἢ ποσοστιαία ἀναλογία) :



Εἰς τὰ ἀνωτέρω ἰσότοπα δεόν ὅπως προστεθῆ και τὸ φυσικὸν ραδιενεργὸν ἰσότοπον του ὑδρογόνου τὸ Τρίτιον (${}^3_1\text{H}$ ἢ T, πρβλ. πίνακα I).

Οὕτω ἡ ἰσοτοπικὴ σύστασις του ὕδατος καθίσταται πολύπλοκος με ἀποτελεσμα νὰ ἐμφανίζονται 18 διάφοροι ἰσοτοπικαὶ μορφαὶ του μορίου τούτου.

Ἐκ τῶν διαφόρων ἰσοτοπικῶν μορφῶν τοῦ μορίου τοῦ ὕδατος παρουσιάζουν ἐνδιαφέρον, ἀπὸ ὑδρολογικῆς πλευρᾶς, αἱ κάτωθι: $H_2^{16}O$, $HD^{16}O$, $HT^{16}O$, $H_2^{18}O$.

Ἐπὶ πλέον εἰς τὸ φυσικὸν ὕδωρ ἀπαντᾶται καὶ πλῆθος ἐνώσεων ἄλλων στοιχείων, ὑπὸ διαλυτὴν μορφήν. Ἐξ αὐτῶν ἐνδιαφέρον, ἀπὸ ὑδρολογικῆς πλευρᾶς, παρουσιάζουν τὰ ἰσότοπα τοῦ ἄνθρακος καὶ κυρίως τὸ φυσικῶς ραδιενεργὸν ἰσότοπον αὐτοῦ ^{14}C . Τοῦτο ἀπαντᾶ εἰς τὸ φυσικὸν ὕδωρ κυρίως ὑπὸ τὴν μορφήν τοῦ εὐδιαλύτου ὀξίνου ἀνθρακικοῦ ἰόντος (HCO_3^-).

3. 2. Τεχνικὴ τῶν σταθερῶν ἰσοτόπων τοῦ περιβάλλοντος.

3. 2. 1. Περιγραφή.

Ὡς γνωστὸν, ἡ μᾶζα ἐνὸς μορίου ἐπηρεάζει τὰς φυσικὰς ιδιότητες αὐτοῦ. Οὕτω, ἡ τάσις ἀτμῶν τῶν διαφόρων ἰσοτοπικῶν μορφῶν τοῦ μορίου τοῦ ὕδατος εἶναι μικροτέρα, ὅσον ἡ μᾶζα τοῦ μορίου εἶναι μεγαλυτέρα.

Ἐπὶ κανονικᾶς συνθήκας θερμοκρασίας καὶ πίεσεως (STP), οἱ λόγοι (α_D , $\alpha^{18}O$) τῶν τάσεων τῶν ἀτμῶν (P) τῶν διαφόρων μορφῶν τοῦ ὕδατος ἔχουν ὡς κατωτέρω:

$$\alpha_D = \frac{P_{H_2O}}{P_{HDO}} = 1.08$$

$$\alpha^{18}O = \frac{P_{H_2^{18}O}}{P_{H_2^{16}O}} = 1.009$$

Ὡς φυσικὴ συνέπεια τούτων, ὁ προκύπτων ἀτμὸς κατὰ τὴν ἐξάτμισιν τοῦ φυσικοῦ ὕδατος εἶναι πτωχότερος, ὅσον ἀφορᾷ τὰ βαρύτερα μόρια ($HD^{16}O$, $H_2^{18}O$), ἐνῶ ἀντιθέτως τὸ παραμένον ὑγρὸν παρουσιάζεται πλέον συμπυκνωμένον ὡς πρὸς αὐτά.

Διὰ τὴν ἔκφρασιν τῆς ὡς ἄνω συμπυκνώσεως ἢ ἀραιώσεως εἰς βαρῆα ἰσότοπα, ἔχει καθιερωθῆ ὁ ὅρος τῆς ἐπὶ τοῖς χιλίοις διαφορᾶς (δ) τῆς ἰσοτοπικῆς ἀναλογίας, ὡς πρὸς ἓν δείγμα ἀναφορᾶς (S).

Ὡς δείγμα ἀναφορᾶς, εἰς τὴν ὑδρολογίαν, χρησιμοποιεῖται γενικῶς τὸ καλούμενον SMOW (Standard Mean Ocean Water, πρότυπον μέσον ὕδωρ Ὠκεανῶν). Ἡ ἐκλογή τοῦ δείγματος τούτου ἐγένετο, ἀφ' ἐνὸς μὲν διότι παρουσιάζει ἰκανοποιητικὴν σταθερότητα ὡς πρὸς τὴν ἰσοτοπικὴν σύστασιν αὐτοῦ, ἀφ' ἑτέρου δὲ διότι ὁ Ὠκεανὸς θεωρεῖται ὡς τὸ ἀρχικὸν καὶ τελικὸν στάδιον κάθε σημαντικοῦ ὑδρολογικοῦ κυκλώματος. Οὕτω, αἱ τιμαὶ $\delta^{18}O$ καὶ δ_D ὑπολογίζονται ὡς κατωτέρω:

$$\delta^{18}O = \frac{(a^{18}O/a^{16}O) \text{ δείγματος} - (a^{18}O/a^{16}O) \text{ ἀναφορᾶς}}{(a^{18}O/a^{16}O) \text{ ἀναφορᾶς}} \times 1000$$

$$\delta_D = \frac{(a_D/a_H) \text{ δείγματος} - (a_D/a_H) \text{ ἀναφορᾶς}}{(a_D/a_H) \text{ ἀναφορᾶς}} \times 1000$$

(a = ἀπόλυτος συγκέντρωσις)

Αἱ διαφοραὶ τῶν ἰσοτοπικῶν ἀναλογιῶν μετρῶνται διὰ φασματογράφου μάζης. Ἡ συνήθης ἀκρίβεια τῶν μετρήσεων τούτων εἶναι 2⁰/₁₀₀ διὰ τὸ D καὶ 0,2⁰/₁₀₀ διὰ τὸ ^{18}O . Δεδομένου ὅμως ὅτι ἡ ἀναλογία D/H εἶναι συνήθως 5 - 8 φορές ὑψηλοτέρα τῆς τοιαύτης τοῦ $^{18}O/^{16}O$, ἡ ἀκρίβεια δι' ἀμφότερα τὰ μεγέθη εἶναι πρακτικῶς συγκρίσιμος.

Αἱ συγκεντρώσεις τῶν σταθερῶν ἰσοτόπων τοῦ ὕδατος κατὰ τὰ διάφορα στάδια τοῦ ὑδρολογικοῦ κύκλου κυμαίνονται μεταξὺ 0 διὰ τὸ SMOW καὶ περίπου -200 διὰ τὸ D καὶ -30 διὰ τὸ ^{18}O (εἰς τὸν πολικὸν πάγον). Ἐπίσης παρουσιάζονται καὶ θετικαὶ τιμαί, μέχρι +20 διὰ τὸ D καὶ +2 διὰ τὸ ^{18}O , εἰς καταστάσεις ἐντόνου ἐξατμίσεως ὑδάτων.

Ἐάν ἡ ἐξάτμισις τοῦ ὕδατος λάβῃ χώραν ὑπὸ συνθήκας ἰσορροπίας, ἡ σχετικὴ ἀπόκλισις τῆς ἰσοτοπικῆς συστάσεως τοῦ ἀτμοῦ, d_v , ἀπὸ τὴν τοιαύτην τοῦ ὕδατος, δίδεται δι' ἕκαστον στοιχεῖον ἀπὸ τὴν σχέσιν:

$$d_v = \frac{\alpha_v - \alpha_w}{\alpha_w} = \frac{1}{\alpha} - 1 \quad (18)$$

ἐνθα α = ἀπόλυτος συγκέντρωσις

α = λόγος τάσεων ἀτμῶν

v = ἀτμὸς

w = ὕδωρ

Κατὰ τὴν συμπύκνωσιν τοῦ ἀτμοῦ ὑπὸ συνθήκας ἰσορροπίας, ἡ σχετικὴ ἀπόκλισις τῆς ἰσοτοπικῆς συστάσεως τοῦ συμπυκνώματος, d_c , ἀπὸ τὴν τοιαύτην τοῦ ἀτμοῦ, δίδεται ἀπὸ τὴν σχέσιν (19):

$$d_c = \alpha - 1 \quad (19)$$

Αἱ σχέσεις (18) καὶ (19) ἰσχύουν, ὡς ἤδη ἐλέγχθη, εἰς περιπτώσεις κατὰ τὰς ὁποίας ἡ φυσικὴ μεταβολὴ (ἐξάτμισις, συμπύκνωσις) λαμβάνει χώραν ὑπὸ συνθήκας ἰσορροπίας. Ὄταν ἡ φυσικὴ μεταβολὴ δὲν λαμβάνῃ χώραν ὑπὸ συνθήκας ἰσορροπίας (π.χ. ταχεῖα ἐξάτμισις καὶ συμπύκνωσις), ἡ κλασματώσις δὲν εἶναι πλέον ἀπλῆ συνάρτησις τοῦ λόγου τάσεων ἀτμῶν, ἀλλὰ ὑπεισέρχονται καὶ ἄλλοι παράγοντες, ἡ ἐπίδρασις τῶν ὁποίων συνοψίζεται εἰς τὸν χαρακτηρισμὸν «κινητικὰ φαινόμενα» (Kinetic Effects).

Κατὰ τὴν ἐξάτμισιν τοῦ ὕδατος τῶν Ὠκεανῶν, ὁ προκύπτων ἀτμὸς εἶναι πτωχότερος εἰς βαρῆα ἰσότοπα· παρουσιάζει δηλ. ἀρνητικὰς τιμὰς τοῦ δ . Ὄταν ὁ ἀτμὸς οὗτος συναντήσῃ ψυχρὰ στρώματα ἀέρος, σχηματίζεται ἓνα συμπύκνωμα (σύννεφον), τὸ ὁποῖον εἶναι πλουσιώτερον τοῦ ἀτμοῦ εἰς βαρῆα ἰσότοπα. Ὁ παραμένων ἀτμὸς εἶναι κατ' ἀκολουθίαν πτωχότερος εἰς τὰ ἰσότοπα ταῦτα, ἀπ' ὅτι ὁ ἀρχικὸς τοιοῦτος.

Τὸ συμπυκνωθὲν ὕδωρ πίπτει ὡς βροχή, ἐνῶ ὁ παραμένων ἀτμὸς συνήθως κινεῖται πρὸς τὴν ἐνδοχώραν, ὅπου συναντᾶ ἔτι ψυχροτέρας μάζας καὶ υφίσταται νέαν συμπύκνωσιν, μὲ περαιτέρω ἐλάττωσιν τῆς περιεκτικότητος αὐτοῦ εἰς βαρέα ἰσότοπα.

Δεδομένου ὅτι ὁ συντελεστὴς ἰσοτοπικῆς κλασματώσεως [διὰ τὸ δξυγόνον ὁ λόγος $(\alpha_{H_2,^{18}O} / \alpha_{H_2,^{16}O})$ ὑγρᾶς φάσεως / $(\alpha_{H_2,^{18}O} / \alpha_{H_2,^{16}O})$ ἀερίου φάσεως] ἐλαττοῦται ἀξανομένης τῆς θερμοκρασίας, ἡ ἐλάττωσις τῆς περιεκτικότητος τοῦ ἀτμοῦ εἰς βαρέα ἰσότοπα εἶναι ἐντονωτέρα, ὅσον ἡ θερμοκρασία, εἰς τὴν ὁποίαν λαμβάνει χώραν ἡ συμπύκνωσις, εἶναι μικρότερα.

Πάντα τὰ ἀνωτέρω ἔχουν, μεταξύ ἄλλων, τὰ κάτωθι ἐνδιαφέροντα τὴν ὑδρολογίαν ἀποτελέσματα :

3.2.1.1. Ἡ πίπτουσα βροχὴ εἰς τὰς παρακτίους περιοχὰς (ἀποτέλεσμα, ὡς ἐπὶ τὸ πλεῖστον, τῶν πρώτων συμπυκνώσεων τοῦ προκύπτοντος ἐκ τῆς ἐξατμίσεως τῶν θαλασσῶν ἀτμοῦ) ἔχει συνήθως τὴν αὐτὴν περίπου ἰσοτοπικὴν σύστασιν μὲ τὸ ὕδωρ τῶν θαλασσῶν, ἐνῶ τὸ ὕδωρ τῆς βροχῆς, ἡ ὁποία πίπτει εἰς τὴν ἐνδοχώραν (προῖον περαιτέρω συμπυκνώσεων τοῦ ἀρχικοῦ ἀτμοῦ), εἶναι γενικῶς, τηρουμένων σταθερῶν τῶν ὑπολοίπων συνθηκῶν, τόσο πτωχότερον εἰς βαρέα ἰσότοπα ὅσον ἡ ἀπόστασις ἀπὸ τὴν θάλασσαν εἶναι μεγαλυτέρα.

3.2.1.2. Εἰς μίαν περιοχὴν, εἰς τὴν ὁποίαν παρατηρεῖται ἐποχιακὴ διακύμανσις τῆς θερμοκρασίας, παρουσιάζονται χαρακτηριστικαὶ ἐποχιακαὶ μεταβολαὶ καὶ εἰς τὴν συγκέντρωσιν εἰς βαρέα ἰσότοπα τοῦ ὕδατος τῆς βροχῆς.

3.2.1.3. Τὸ ὕδωρ τῆς βροχῆς, ἡ ὁποία πίπτει τὰ ὑψίπεδα, παρουσιάζεται πτωχότερον εἰς βαρέα ἰσότοπα, ἀπ' ὅτι τὸ ὕδωρ τῆς βροχῆς εἰς πεδινὰς περιοχὰς.

Ἡ ἀκρίβεια μετρήσεως τῶν ἰσοτοπικῶν ἀναλογιῶν $^{18}O / ^{16}O$ καὶ D / H ἐπιτρέπει τὴν διάκρισιν ὕδατος βροχῆς περιοχῶν παρουσιαζουσῶν μεταξὺ τῶν ὑψομετρικῆν διαφορὰν 200 μέτρων.

3.2.1.4. Τὸ ὕδωρ τῆς βροχῆς περιοχῶν μεγάλου γεωγραφικοῦ πλάτους εἶναι πτωχότερον εἰς βαρέα ἰσότοπα ἀπ' ὅτι τὸ ὕδωρ βροχῆς περιοχῶν μικροτέρου γεωγραφικοῦ πλάτους.

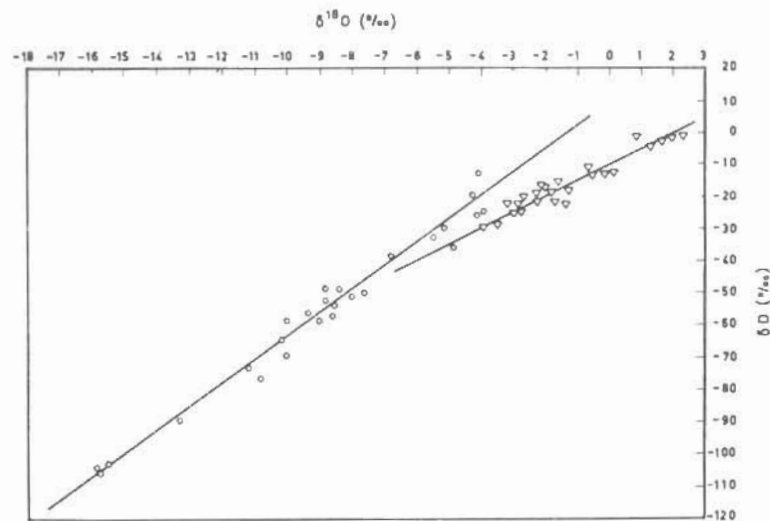
3.2.1.5. Ὑπάρχει σταθερὰ σχέσις μεταξύ τῆς τιμῆς δ τοῦ D καὶ τῆς τοιαύτης τοῦ ^{18}O . Ἡ σχέσις αὕτη εἶναι τοῦ τύπου :

$$\delta_D = X\delta^{18}O + Y$$

Προκειμένου δι' ὕδωρ βροχῆς, ὡς καὶ δι' ὕδατα τὰ ὁποῖα δὲν ἔχουν ὑποστῆ ἐξάτμισιν, οἱ συντελεσταὶ X καὶ Y ἔχουν συνήθως τὰς τιμὰς 8 καὶ 10 ἀντιστοίχως.

Εἰς ὕδωρ, τὸ ὁποῖον ἔχει ὑποστῆ ἐξάτμισιν (ἐπιφανειακὰ ἀποθέματα, λίμναι, ποταμοὶ κλπ.) οἱ συντελεσταὶ X καὶ Y ἔχουν διαφόρους τιμὰς, συγκεκριμένως τὸ μὲν X ποικίλλει μεταξύ 4 καὶ 6, τὸ δὲ Y δύναται νὰ λάβῃ καὶ ἀρνητικὰς τιμὰς (Σχῆμα 1).

Ἐξ ὄλων τῶν ἀνωτέρω, εἶναι ἐμφανὲς ὅτι ἡ ἰσοτοπικὴ σύστασις τοῦ ὕδατος ὡς πρὸς τὰ σταθερὰ βαρέα ἰσότοπα τοῦ ὑδρογόνου καὶ τοῦ δξυγόνου, εἶναι



Σχ. 1. Μεταβολαὶ τῆς συγκέντρωσεως D καὶ ^{18}O εἰς ὕδατα βροχῆς (ο) καὶ Λιμνῶν (▽).

χαρακτηριστικὴ δι' ἐκάστην περιοχὴν καὶ ὡς ἐκ τούτου δύναται νὰ θεωρηθῇ ὡς ἰχνηθέτης διὰ τὴν διερεύνησιν τῆς περιοχῆς τροφοδοσίας τῶν ὑπογείων ὑδάτων.

3.2.2. Πρακτικαὶ ἐφαρμογαί.

Πολλαὶ πρακτικαὶ ἐφαρμογαὶ τῆς τεχνικῆς τῶν σταθερῶν ἰσοτόπων τοῦ περιβάλλοντος ἀναφέρονται εἰς τὴν διεθνή βιβλιογραφίαν. Μερικαὶ ἐξ αὐτῶν εἶναι αἱ κάτωθι :

3.2.2.1. Εἰς μίαν μελέτην, ἡ ὁποία ἔλαβε χώραν εἰς Hodna (Ἀλγερία) ὑπὸ τοῦ ΔΟΑΕ, τὸ πρόβλημα συνίστατο εἰς τὴν διασάφησιν τοῦ μηχανισμοῦ τροφοδοσίας τοῦ φρεατικοῦ ὀρίζοντος τῆς περιοχῆς.

Συνήθως εἰς ἓνα σύστημα δύο ὑδροφόρων ὀρίζοντων, μὴ ἐπικοινωνούντων μεταξύ των, τὸ ὕδωρ τοῦ ἀρτεσιανοῦ ὀρίζοντος παρουσιάζεται πτωχότερον εἰς βαρέα ἰσότοπα ἀπὸ τὸ ὕδωρ τοῦ φρεατικοῦ τοιοῦτου. Τοῦτο ὀφείλεται εἰς τὸ γεγονός ὅτι αἱ περιοχαὶ τροφοδοσίας τοῦ ἀρτεσιανοῦ ὀρίζοντος εὐρίσκονται εἰς μεγαλυτέρον ὑψόμετρον ἀπὸ τὰς περιοχὰς τροφοδοσίας τοῦ φρεατικοῦ τοιοῦτου.

Εἰς τὴν συγκεκριμένην περίπτωσιν, αἱ ἰσοτοπικαὶ ἀναλύσεις ἐδειξαν ὅτι τὰ ὕδατα τῶν δύο ὀρίζοντων εἶχον τελείως διάφορον ἰσοτοπικὴν σύστασιν, γε-

γονός τὸ ὁποῖον ἀπέκλεισε τὴν ἐπικοινωνίαν μεταξύ των (διὰ μέσου ρηγμάτων εἰς τοὺς μεταξύ των ἀδιαπεράτους σχηματισμοὺς) καὶ ἐπέτρεψε τὴν συγκέντρωσιν τῆς ἐρεύνης εἰς ἄλλους δυνατοὺς ὑδρολογικῶς μηχανισμοὺς.

3.2.2.2. Εἰς μίαν μελέτην, εἰς τὴν πεδιάδα τοῦ Πάδου (Ἰταλία), ὑπὸ τοῦ Πανεπιστημίου τῆς Λίλλης, αἱ ἰσοτοπικαὶ ἀναλύσεις ἐπέτρεψαν τὸν ὑπολογισμὸν τῆς συνεισφορᾶς εἰς τὸν ἐμπλουτισμὸν τοῦ φρεατίου ὀρίζοντος ποταμίων ὑδάτων προερχομένων ἐκ τῶν Ἄλπεων.

Τὰ ποτάμια ὕδατα, ὡς προερχόμενα ἐκ περιοχῶν μεγάλου ὑψομέτρου, παρουσιάζονται πτωχότερα εἰς βαρῆα ἰσότοπα ἀπ' ὅτι τὸ ὕδωρ βροχῆς μιᾶς πεδινῆς περιοχῆς.

Εἰς τὴν συγκεκριμένην περίπτωσιν ἡ τιμὴ $\delta^{18}\text{O}$ τοῦ ὕδατος τοῦ φρεατικοῦ ὀρίζοντος ἦτο -12 , εἰς τὴν ἄμεσον γειτονίαν τῶν ποταμῶν (ὄση καὶ ἡ τιμὴ $\delta^{18}\text{O}$ τῶν ποταμίων ὑδάτων) καὶ -7 (ὄση καὶ ἡ ἀντίστοιχος μέση τιμὴ τῶν ὑδάτων βροχῆς εἰς τὴν πεδιάδα), εἰς ἰκανὴν ἀπόστασιν ἐξ αὐτῶν.

Ἐκ τῆς τιμῆς $\delta^{18}\text{O}$ εἰς τὰ διάφορα σημεῖα τῆς πεδιάδος ὑπελογίσθη τὸ ποσοστὸν συνεισφορᾶς τοῦ ποταμίου ὕδατος εἰς τὸν φρεάτιον ὀρίζοντα.

3.2.2.3. Εἰς μίαν μελέτην, εἰς τὴν περιοχὴν Antalya (Τουρκία), αἱ ἰσοτοπικαὶ ἀναλύσεις ἀπέδειξαν, ἀντιθέτως ἀπ' ὅτι ἐπιστεῦετο, ὅτι αἱ λίμναι τῆς ἐνδοχώρας οὐδόλως ἢ ἐλάχιστα συνεισφέρουν εἰς τὴν τροφοδοσίαν τῶν παραλιακῶν πηγῶν.

Τοῦτο κατέστη δυνατόν ἐκ τοῦ γεγονότος ὅτι τὸ ὕδωρ τῶν λιμνῶν, λόγῳ ἐντόνου ἐξατμίσεως, παρουσιάζεται ἐμπλουτισμένον εἰς βαρῆα ἰσότοπα, ἐνῶ ἡ ἰσοτοπικὴ σύστασις τοῦ ὕδατος τῶν παραλιακῶν πηγῶν εὐρέθῃ πτωχότερα εἰς βαρῆα ἰσότοπα, τοῦ ὕδατος τῆς βροχῆς τῆς περιοχῆς.

Ἐκ τῆς μελέτης ταύτης προσδιορίσθη ὅτι ἡ περιοχὴ τροφοδοσίας τῶν πηγῶν εὐρίσκετο εἰς ὑψόμετρον 1000 - 1100 μέτρων.

3. 3. Τεχνικὴ τῶν ραδιενεργῶν φυσικῶν ἰσοτόπων.

Τὸ σύνολο σχεδὸν τῶν φυσικῶν ραδιενεργῶν ἰσοτόπων (πρβλ. πίν. 1, σελ. 482) εὐρίσκει διαφόρους ἐφαρμογὰς εἰς τὴν ὑδρολογίαν.

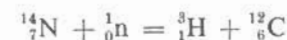
Τὸ παρὸν κεφάλαιον θὰ περιορισθῇ εἰς τὴν ἀνάπτυξιν τῆς μεθόδου «χρονολογήσεως» τῶν ὑπογείων ὑδάτων.

Ἐκ τῶν διαφόρων ραδιενεργῶν ἰσοτόπων, τὰ ὁποῖα δύνανται νὰ χρησιμοποιηθοῦν διὰ τὴν χρονολόγησιν τῶν ὑπογείων ὑδάτων, τὴν εὐρύτεραν χρῆσιν ἔχουν εὐρεῖ τὸ T , ὁ ^{14}C καὶ τὸ ^{32}Si . Καὶ τὰ τρία ταῦτα ραδιοϊσότοπα παράγονται κατὰ σταθερὸν ρυθμὸν εἰς τὴν φύσιν τῇ ἐπιδράσει τῆς κοσμικῆς ἀκτινοβολίας. Λόγῳ τῶν διαφορετικῶν ἰδιαιτέρων χαρακτηριστικῶν τῶν, τὰ τρία ταῦτα ἰσότοπα χρησιμοποιοῦνται διὰ τὸν προσδιορισμὸν διαφορετικῶν περιοχῶν ἡλικιῶν, συγκεκριμένως τὸ T δι' ὑπόγεια ὕδατα ἡλικίας μέχρι 50 ἐτῶν, τὸ ^{32}Si μεταξύ 50 καὶ 2000 ἐτῶν, καὶ ὁ ^{14}C δι' ἡλικίας μεγαλύτερας τῶν 500 ἐτῶν.

3.3.1. Χρονολόγησις ὑπογείων ὑδάτων διὰ Τρίτιου.

3.3.1.1. Γενικά

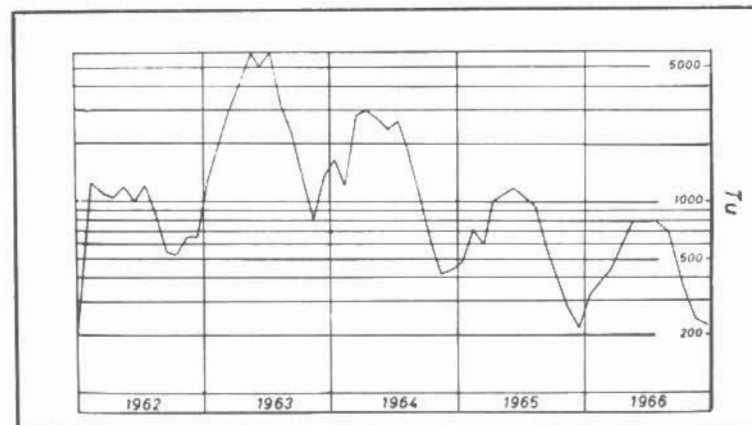
Τὸ Τρίτιον, ραδιενεργὸ ἰσότοπον τοῦ ὑδρογόνου, ἔχει χρόνον ἡμισείας ζωῆς 12,26 ἔτη. Παράγεται φυσικῶς εἰς τὰ ἀνώτερα στρώματα τῆς ἀτμοσφαιρας, διὰ τῆς ἐπιδράσεως τῆς κοσμικῆς ἀκτινοβολίας ἐπὶ ἀτόμων ἀζώτου, κατὰ τὴν κάτωθι ἀντίδρασιν :



Ὁ ρυθμὸς τῆς ὡς ἀνωτέρω παραγωγῆς τοῦ Τρίτιου ὑπολογίζεται [83] εἰς 0.25 ἄτομα / cm^2 / sec. Τὸ οὕτω παραγόμενον Τρίτιον ἀντιδρᾷ μὲ τὸ δξυγόνον τῆς ἀτμοσφαιρας, σχηματιζομένου ὕδατος ἐπισημασμένου διὰ Τρίτιου, HTO , τὸ ὁποῖον πίπτει εἰς τὴν γῆν μετὰ τῆς βροχῆς.

Ἡ εἰς φυσικῶς παραγόμενον Τρίτιον συγκέντρωσις τοῦ ὕδατος τῆς βροχῆς ποικίλλει μεταξύ 6 καὶ 16 μονάδων Τρίτιου (1 μονὰς Τρίτιου ἰσοδυναμεῖ πρὸς ἓν ἄτομον Τρίτιου ἀνὰ 10 ἄτομα ὑδρογόνου [18]).

Ἡ ἰσορροπία, μεταξύ τοῦ σταθεροῦ ρυθμοῦ παραγωγῆς τοῦ Τρίτιου, τῶν διαφόρων μεταβολῶν αὐτοῦ κατὰ τὸν κύκλον τοῦ ὕδατος εἰς τὴν φύσιν καὶ τοῦ



Σχ. 2. Περιεκτικότης εἰς T ὑδάτων βροχῆς τῆς περιοχῆς Βιέννης Αἰστρίας κατὰ τὴν περίοδον 1962 - 1966.

σταθεροῦ ρυθμοῦ διασπάσεως αὐτοῦ, διατηράθη ἀπὸ τὰς θερμοπυρηνικὰς δοκιμὰς εἰς τὴν ἀτμόσφαιραν τῆς περιόδου 1952 - 1963.

Κατὰ τὰς δοκιμὰς αὐτὰς εἰσῆλθον εἰς τὴν ἀτμόσφαιραν τεράστιαι ποσότητες Τρίτιου, μὲ ἄμεσον ἐπακόλουθον τὴν μεταβολὴν τῆς συγκεντρώσεως τοῦ Τρίτιου εἰς τὸ ὕδωρ τῆς βροχῆς. Αὕτη ἐφθασε τὴν μεγίστην αὐτῆς τιμὴν κατὰ τὴν ἀνοίξιν τοῦ 1963 (Σχῆμα 2), ἔκτοτε δὲ βαίνει ἐλαττωμένη.

Τὸ γεγονός ὅτι ἡ συγκέντρωσις τοῦ Τριτίου, εἰς τὸ ὕδωρ τῶν βροχοπτώσεων, ἐξακολουθεῖ νὰ παραμένῃ ἀκόμη καὶ σήμερον εἰς σημαντικῶς ὑψηλότερον ἐπίπεδον ἀπὸ τὴν πρὸ τοῦ 1952 περίοδον, παρ' ὅλον ὅτι αἱ πυρηνικαὶ δοκιμαίαι ἐσταμάτησαν εἰς τὴν ἀτμόσφαιραν, ὀφείλεται εἰς τὰς τεραστίαις ποσότητες Τριτίου, αἱ ὁποῖαι εἰσῆλθον κατὰ τὰς δοκιμάς εἰς τὴν ἀτμόσφαιραν. Ἐξ αὐτῆς ἐξακολουθοῦν ἀκόμη καὶ σήμερον νὰ εἰσέρχωνται εἰς τὴν τροπόσφαιραν. Αἱ κατὰ συστηματικὸν τρόπον μετρήσεις τῆς περιεκτικότητος τοῦ ὕδατος τῶν βροχοπτώσεων, εἰς Τρίτιον, ἤρχισαν, εἰς Ottawa τοῦ Καναδά, ἀπὸ τὴν ἀρχὴν τῆς θερμοπυρηνικῆς ἐποχῆς. Ἀπὸ τοῦ 1961, ὑπὸ τὴν αἰγίδα τοῦ Διεθνoῦς Ὁργανισμοῦ Ἀτομικῆς Ἐνεργείας (Δ.Ο.Α.Ε.), αἱ μετρήσεις αὐταὶ ἐπεξετάθησαν εἰς πλῆθος σταθμῶν εἰς ὁλόκληρον τὸν κόσμον. Ἐκ τῶν μετρήσεων τούτων ἐξήχθησαν τὰ ἀκόλουθα συμπεράσματα :

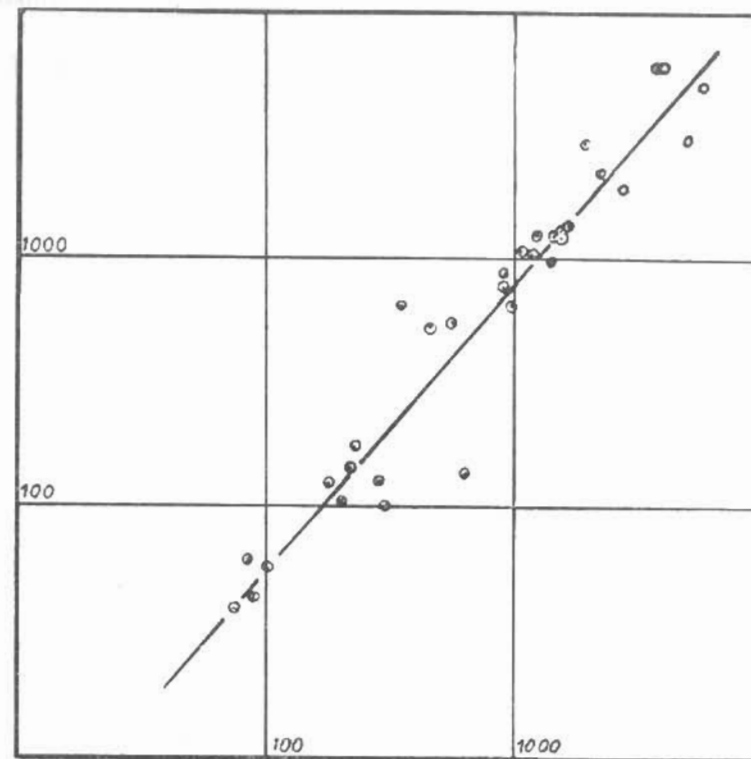
α. Ἡ μεγίστη συγκέντρωσις Τριτίου εἰς τὸ ὕδωρ τῶν βροχοπτώσεων παρατηρεῖται κατὰ τὸ τέλος τῆς ἀνοιξέως καὶ τὸ θέρος. Τὸ γεγονός τοῦτο ὀφείλεται εἰς τὴν καλουμένην «ἐαρινὴν εἰσαγωγὴν» τοῦ Τριτίου εἰς τὴν ἀτμόσφαιραν ἐκ τῆς στρατοσφαίρας.

β. Ἡ εἰς Τρίτιον περιεκτικότης τοῦ ὕδατος τῶν βροχοπτώσεων αὐξάνει μετὰ τοῦ γεωγραφικοῦ πλάτους. Τοῦτο ὀφείλεται εἰς τὸ γεγονός ὅτι τὸ Τρίτιον εἰσάγεται εἰς τὴν τροπόσφαιραν ἐκ τῆς στρατοσφαίρας κυρίως εἰς τὰς πολικὰς περιοχάς.

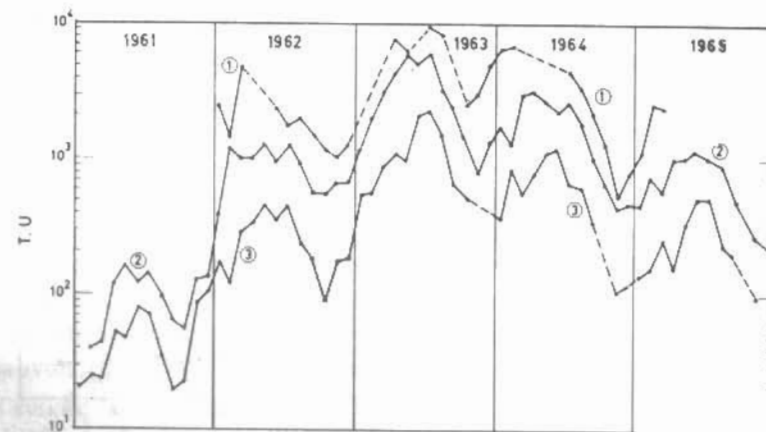
γ. Εἰς τὸ βόρειον ἡμισφαίριον ἡ περιεκτικότης εἰς Τρίτιον εἶναι ὑψηλότερα ἀπ' ὅτι εἰς τὸ νότιον ἡμισφαίριον. Τοῦτο ὀφείλεται, ἀφ' ἐνὸς μὲν εἰς τὸ γεγονός ὅτι αἱ θερμοπυρηνικαὶ ἐκρήξεις ἔλαβον χώραν εἰς τὸν βόρειον ἡμισφαίριον, ἀφ' ἑτέρου δὲ εἰς τὴν διαφορετικὴν κυκλοφορίαν τῶν ἀερίων στρωμάτων εἰς τὰ δύο ἡμισφαίρια. Εἰς τοὺς λόγους τούτους δεόν ὅπως προστεθῇ καὶ τὸ γεγονός ὅτι οἱ ἐκ τοῦ ὠκεανίου ὕδατος ὑδρατμοὶ (χαμηλῆς περιεκτικότητος εἰς Τρίτιον) ἀραιώνουν τὸ Τρίτιον, τὸ ὁποῖον περιέχεται εἰς τοὺς ὑδρατμοὺς τῆς ἀτμοσφαίρας, εἰς μεγαλύτερον βαθμὸν εἰς τὸ νότιον ἡμισφαίριον, παρ' ὅτι εἰς τὸ βόρειον τοιοῦτον, λόγῳ τῆς διαφορετικῆς ἀναλογίας θαλάσσης ἀνὰ τετραγωνικὸν χιλιόμετρον ἐπιφανείας ξηρᾶς εἰς τὰ δύο ἡμισφαίρια.

δ. Εἰς περιοχὰς παρομοίας γεωγραφικῆς θέσεως, παρατηρεῖται ἱκανοποιητικὴ ἀντιστοιχία εἰς τὴν τιμὴν τῆς συγκέντρωσεως τοῦ Τριτίου εἰς τὸ ὕδωρ τῶν βροχοπτώσεων. Ὡς παράδειγμα τούτου δίδεται, εἰς τὸ σχῆμα 3, ἡ ἀντιστοιχία μεταξὺ τῶν μετρήσεων Τριτίου εἰς τὴν Βιέννην Αὐστρίας (πλάτος 48° N) καὶ τὴν Ottawa τοῦ Καναδά (πλάτος 45° N). Ἀνεξαρτήτως πλάτους, αἱ διάφοροι περιοχαὶ δύνανται νὰ ταξινομηθοῦν εἰς ὁμάδας, αἱ ὁποῖαι ἐπηρεάζονται ἀπὸ ἀερίους μάζας τῆς αὐτῆς προελεύσεως καὶ εἰς τὰς ὁποίας, κατὰ συνέπειαν, αἱ γραμμαὶ ἰσοσυγκέντρωσεως τοῦ Τριτίου εἶναι παράλληλοι (Σχήματα 4 καὶ 5). Ἐκ τούτων καθίσταται ἐμφανές ὅτι κατὰ κανόνα εἶναι δυνατὴ μὲ ἱκανοποιητικὴν ἀκρίβειαν, ἡ ἀναφορὰ εἰς τὴν προϊστορίαν Τριτίου μίας συγκεκριμένης περιοχῆς, ἐκ συγχρόνων μετρήσεων Τριτίου εἰς τὴν περιοχὴν ταύτην

Τιμαὶ T εἰς ὕδατα βροχῆς τῆς περιοχῆς Βιέννης εἰς T. U.



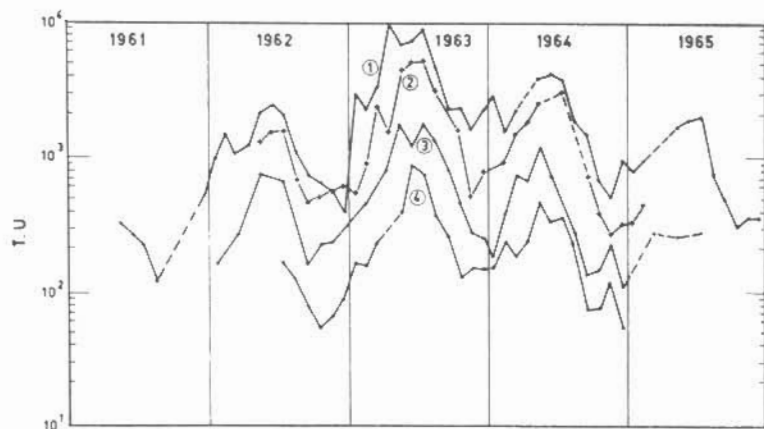
Τιμαὶ T εἰς ὕδατα βροχῆς τῆς περιοχῆς Ὀττάβα - Καναδά εἰς T.U.
Σχ. 3. Συσχέτισις τιμῶν T εἰς ὕδατα βροχῆς περιοχῶν παραπλησίου γεωγραφικοῦ πλάτους (Vienna, Austria, 48° N. Ottawa, Canada, 45° N).



Σχ. 4. Τιμαὶ T εἰς ὕδατα βροχῆς περιοχῶν Εὐρώπης.
(1) Βορείου, (2) Βιέννης, (3) Βαλέντσιας Ἰσπανίας.

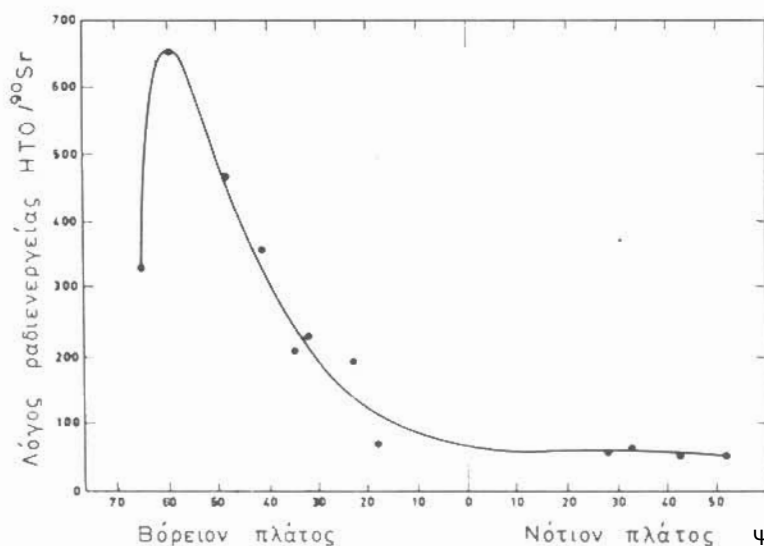
καί συσχετισμού τούτων μετά προγενεστέρων μετρήσεων άλλων χαρακτηριστικών περιοχών.

Είς την βιβλιογραφίαν [84] αναφέρεται ότι είναι δυνατή επίσης ή αναφορά είς την προϊστορίαν Τριτίου μίας περιοχής, εκ συσχετισμού μετά τυχόν υπαρ-



Σχ. 5. Τιμαί T είς ύδατα βροχής περιοχών Βορείου 'Αμερικής. (1) Whitehorse, (2) Croennedal, (3) Hatteras, (4) Bermuda.

χουσών μετρήσεων Στροντίου - 90 (^{90}Sr) διά την έν λόγω περιοχήν. Τοῦτο βασίζεται είς τὸ γεγονός ότι ἀμφότερα τὰ ἰσότοπα μεταφέρονται διά παρομοίων



Σχ. 6. Μεταβολή τῆς τιμῆς τοῦ λόγου τῆς ραδιενεργείας τοῦ ΗΤΟ, ὡς πρὸς τὴν ραδιενέργειαν τοῦ ^{90}Sr , συναρτήσεως τοῦ γεωγραφικοῦ πλάτους.

στρατοσφαιρικῶν μηχανισμῶν, ὑπὸ τὴν προϋπόθεσιν ὅτι ἡ ἐπίδρασις τῆς ἠπειρωτικῆς ἐπανεξατμίσεως (re- evaporation) εἶναι ἀμελητέα.

Εἰς τὸ σχῆμα 6 παρουσιάζεται ἡ μεταβολὴ τῆς τιμῆς τοῦ λόγου τῆς ραδιενεργείας τοῦ ΗΤΟ ὡς πρὸς τὴν ραδιενέργειαν τοῦ ^{90}Sr , συναρτήσεως τοῦ γεωγραφικοῦ πλάτους, συμφώνως πρὸς μετρήσεις γενομένας κατὰ τὸ 1963. Ἡ μέθοδος αὕτη παρουσιάζει σημαντικὴν πρακτικὴν ἀξίαν, δεδομένου ὅτι ὑπάρχουν ἀποτελέσματα συστηματικῶν μετρήσεων Στροντίου - 90 διὰ πολὺ περισσοτέρας περιοχάς, παρὰ διὰ Τρίτιον.

3.3.1.2. Τεχνικὴ Χρονολογήσεως.

Ἡ ὅλη τεχνικὴ χρονολογήσεως ὑπογείων ὑδάτων, διὰ Τρίτιον, στηρίζεται εἰς τὸ γεγονός ὅτι εἰς μίαν ὑδατίνην μάζαν, καθ' ὅσον διάστημα αὕτη εὑρίσκεται ἐπὶ τῆς ἐπιφανείας, ἀποκαθίσταται ἰσορροπία, μεταξύ τοῦ ἐκ τῆς ἀτμοσφαιρας, διὰ διαφόρων μηχανισμῶν προσλαμβανομένου Τριτίου καὶ τῶν συνεπειᾶ τῆς ραδιενεργοῦ διασπάσεως αὐτοῦ, ἢ ἄλλης αἰτίας, ἀπωλειῶν. Ὅταν ἡ ὑδατίνη μάζα ἀπομονωθῇ τῆς ἀτμοσφαιρας, ἢ εἰς Τρίτιον περιεκτικότης αὐτῆς ἐλαττοῦται κατὰ γνωστὴν μαθηματικὴν σχέσιν, συμφώνως πρὸς τοὺς νόμους τῆς ραδιενεργοῦ διασπάσεως. Ἐκ τῆς ἐλαττώσεως ταύτης, εἶναι δυνατόν νὰ ὑπολογισθῇ ὁ διαρρέυσας χρόνος ἀπὸ τὴν στιγμὴν κατὰ τὴν ὁποίαν ἡ ὑδατίνη μάζα ἀπεμονώθη τῆς ἀτμοσφαιρας καὶ ὁ ὅποιος συνήθως χαρακτηρίζεται ὡς ἡλικία τῆς ὑδατίνης μάζης.

Ἐκ τοῦ γεγονότος ὅτι, λόγω κυρίως τῶν θερμοπυρηνικῶν δοκιμῶν εἰς τὴν ἀτμόσφαιραν, ἡ συγκέντρωσις τοῦ Τριτίου εἰς τὸ ὕδωρ τῆς βροχῆς παρουσιάζει σημαντικὰς μεταβολάς, ὡς πρὸς τὸν χρόνον, δι' οἷονδήποτε ὑπολογισμὸν ἡλικίας ὑπογείων ὑδάτων ἀπαιτεῖται, κατὰ πρῶτον λόγον, ἡ γνώσις μὲ ἱκανοποιητικὴν ἀκρίβειαν, τῶν τιμῶν Τριτίου τοῦ ὕδατος κατὰ τὴν τροφοδοσίαν. Κατὰ τὴν σχετικὴν μαθηματικὴν ἐπεξεργασίαν, αἱ τιμαὶ αὗται συνιστοῦν τὴν καλουμένην «συνάρτησιν εἰσόδου» (Input Function).

Λόγω τῆς ὑγρᾶς φάσεώς του, τὸ ὕδωρ κινεῖται διαρκῶς ἐντὸς διαφορτικῶν μέσων καὶ κατὰ συνέπειαν λαμβάνει χώραν μοριακὴ διάχυσις, ὑδροδυναμικὴ διασπορὰ καὶ μίξις. Ὡς ἐκ τούτου, διὰ τὸν ὑπολογισμὸν τῆς ἡλικίας τοῦ ὕδατος πλὴν τῆς γνώσεως τῆς συναρτήσεως εἰσόδου, ἀπαιτεῖται καὶ ἡ χρησιμοποίησις μαθηματικοῦ μοντέλου, τὸ ὁποῖον νὰ περιγάφῃ τὴν συμπεριφορὰν τοῦ συγκεκριμένου ὑδρολογικοῦ συστήματος. Ἡ περιγραφή ἐνὸς ὁποιοῦδήποτε ὑδρολογικοῦ συστήματος δι' ἐνὸς μαθηματικοῦ μοντέλου δὲν εἶναι βεβαίως εὐκόλος ὑπόθεσις. Ἐν τούτοις, ἔχουν προταθῆ εἰς τὴν βιβλιογραφίαν [85] μερικὰ ἀπλᾶ μαθηματικὰ μοντέλα, τὰ ὁποῖα, ἐφαρμοσθέντα εἰς πλῆθος περιπτώσεων, ἀπεδείχθησαν ἱκανοποιητικὰ εἰς τὴν πρᾶξιν.

Γενικῶς παρουσιάζονται αἱ κάτωθι περιπτώσεις :

Εἰς Τρίτιον περιεκτικότης τοῦ ὑπογείου ὕδατος εἶναι μικροτέρα τοῦ ὀρίου μετρήσεως Τριτίου (I T. U).

Εἰς τὴν περίπτωσιν ταύτην συμπεραίνεται εὐκόλως ὅτι ἢ εἰς τὴν ὑδατίνην ταύτην μάζαν ποσότης ὕδατος συγχρόνου ἢ μεταγενεστέρου τῆς περιόδου ἐνάρξεως τῶν θερμοπυρηνικῶν δοκιμῶν (1953) εἶναι ἀμελητέα. Ἡ κατάσταση αὕτη παρουσιάζεται συνήθως εἰς περιπτώσεις ἀρτεσιανῶν ὑδροφόρων ὀριζόντων (Confined Aquifers), εἰς τοὺς ὁποίους, ἄφ' ἐνὸς μὲν ἢ ἀνάμειξις μὲ ξένον ὕδωρ εἶναι ἀμελητέα, ἄφ' ἑτέρου δὲ αἱ ταχύτητες μετακινήσεως τοῦ ὕδατος εἶναι πολὺ μικραί.

β. Ἡ εἰς Τρίτιον περιεκτικότης τοῦ ὑπογείου ὕδατος εἶναι σημαντικὴ καὶ ἀμετάβλητος ὡς πρὸς τὸν χρόνον ἢ μεταβάλλεται βραδέως χωρὶς σημαντικὰς διακυμάνσεις.

Εἰς τὴν περίπτωσιν ταύτην συμπεραίνεται ὅτι σχετικῶς «νέον» ὕδωρ ἀναμιγνύεται καλῶς, εἰς τὸν ὑδροφόρον ὀρίζοντα, μὲ παλαιὸν ὕδωρ καὶ ὅτι τὸ μέγεθος τοῦ ὑπογείου ταμιευτήρος εἶναι σημαντικόν, ὥστε νὰ ἀμβλύνωνται οἱ διακυμάνσεις τῆς συναρτήσεως εἰσαγωγῆς. Εἰς τὴν περίπτωσιν ταύτην χρησιμοποιεῖται τὸ καλούμενον «μοντέλο καλῆς ἀναμίξεως» (Well - Mixed Model). Ἡ κατάσταση αὕτη παρουσιάζεται συνήθως εἰς περιπτώσεις πλουσιῶν ὀριζόντων ὑψηλῆς σχετικῶς ταχύτητος.

Ἡ εἰς τὰς περιπτώσεις ταύτας ὑπολογιζομένη ἡλικία τοῦ ὕδατος ἀνταποκρίνεται εἰς τὴν πραγματικὴν μέσην τοιαύτην, μόνον ἐφ' ὅσον ἡ τροφοδοσία εἶναι ἐνιαίας προελεύσεως. Εἰς συστήματα τὰ ὁποῖα τροφοδοτοῦνται ἀπὸ ὕδατα διαφορετικῆς ἡλικίας, ἡ ὑπολογιζομένη ἡλικία εἶναι πάντοτε μικροτέρα τῆς πραγματικῆς μέσης τοιαύτης.

γ. Ἡ εἰς Τρίτιον περιεκτικότης τοῦ ὑπογείου ὕδατος εἶναι σημαντικὴ καὶ παρουσιάζει σημαντικὰς διακυμάνσεις ὡς πρὸς τὸν χρόνον.

Εἰς τὴν περίπτωσιν ταύτην συμπεραίνεται ὅτι εἰς τὸ σημεῖον δειγματοληψίας ὑπάρχει σημαντικὴ ποσότης νέου ὕδατος. Τὸ μαθηματικὸν μοντέλο τὸ ὁποῖον συνιστᾶται δι' αὐτὴν τὴν περίπτωσιν εἶναι τὸ καλούμενον «Μοντέλο διασπορᾶς» (Dispersive Model) [86].

Ἡ κατάσταση αὕτη παρουσιάζεται συνήθως εἰς συστήματα, ὡς τὰ καρστικά, εἰς τὰ ὁποῖα ἡ ταχύτης τοῦ ὕδατος εἶναι μεγάλη καὶ ἡ ἡλικία αὐτοῦ μικρά. Ἡ αὕτη ἐπίσης κατάσταση παρουσιάζεται καὶ εἰς συστήματα εἰς τὰ ὁποῖα παλαιὸν ὕδωρ ἀναμιγνύεται μὲ σχεδὸν πρόσφατον ὕδωρ, εἰς μεταβαλλομένην μετὰ τοῦ χρόνου ἀναλογίαν [87].

3.3.1.3. Παραδείγματα Ἐφαρμογῶν.

α. Εἰς περιοχὴν τῆς λεκάνης τῆς Βιέννης ἔλαβε χώραν [87] ἐπισταμένη μελέτη διὰ σταθερῶν ἰσοτόπων καὶ φυσικῶν ραδιενεργῶν τοιούτων. Κατὰ τὴν μελέτην ταύτην συνελέγησαν καὶ ἀνελύθησαν πολλὰ δείγματα ἐκ φρεάτων, πηγῶν, γεωτρήσεων καὶ θερμῶν πηγῶν. Ἐκ τῶν ἀποτελεσμάτων τῆς μελέτης ταύτης ἀναφέρονται τὰ κάτωθι :

Ἡ προέλευσις ὄλων τῶν ὑδάτων τῆς περιοχῆς εἶναι κοινή. Τὸ συμπέρασμα τοῦτο συνήχθη ἐκ τοῦ γεγονότος ὅτι ἢ εἰς σταθερὰ ἰσότοπα σύστασις ὄλων τῶν ὑδάτων τῆς περιοχῆς ἦτο ὁμοίομορφος.

Ἡ κυκλοφορία τοῦ ὕδατος εἰς τὰ καρστικά ἐδάφη τῆς περιοχῆς εἶναι ταχυτάτη μὲ ἄμεσον ἀνταπόκρισιν εἰς τὰς βροχοπτώσεις. Τὸ συμπέρασμα τοῦτο συνήχθη ἐκ τοῦ γεγονότος ὅτι ἡ συγκέντρωσις Τριτίου εἰς τὰ ὕδατα τῶν καρστικῶν πηγῶν ἦτο εἰς τὰ αὐτὰ σχεδὸν ἐπίπεδα καὶ παρουσίαζε τὰς αὐτὰς περιπτώσεις μεταβολᾶς, ἐν συγκρίσει μὲ τὸ ὕδωρ τῶν βροχοπτώσεων.

Αἱ ἐμφανίσεις τῶν ὑπογείων ὑδάτων ὑπὸ μορφήν ὑπερχειλίσεως, αἱ ὁποῖαι ἐπιστεύετο ὅτι τροφοδοτοῦνται ἀπὸ τὸν κύριον ὑδροφόρον ὀρίζοντα, τροφοδοτοῦνται ἀπὸ τοὺς χειμάρρους τῆς πλησίον περιοχῆς, διὰ μέσου τοῦ ἀβαθοῦς ὑδροφόρου ὀρίζοντος.

Τὸ συμπέρασμα τοῦτο συνήχθη ἐκ τοῦ γεγονότος ὅτι ἡ συγκέντρωσις εἰς Τρίτιον τῶν ὑδάτων τούτων ἦτο εἰς πολὺ ὑψηλότερα ἐπίπεδα ἀπ' ὅτι εἰς τὰ ὑπόλοιπα ὑπόγεια ὕδατα.

Ἡ κυκλοφορία τοῦ ὕδατος εἰς τὸν κύριον ὑδροφόρον ὀρίζοντα εἶναι σχετικῶς ταχεία. Τὸ συμπέρασμα τοῦτο συνήχθη ἐκ τοῦ γεγονότος ὅτι ἡ συγκέντρωσις εἰς Τρίτιον τῶν ὑπογείων ὑδάτων ἔβαινε ἐλαττωμένη ἀξανομένου τοῦ βάθους, ἦτο δὲ ὑπολογίσιμος (13 T.U) ἀκόμη καὶ εἰς βάθος 140 μέτρων. Τὸ ὕδωρ τῶν θερμῶν πηγῶν τῆς περιοχῆς προέρχεται ἀπὸ μίξιν παλαιοῦ ὕδατος, ἐκ τοῦ βαθέος ὀρίζοντος, μετὰ νέου τοιούτου, ἐκ πλέον ἐπιφανειακοῦ ὀρίζοντος, εἰς ἀναλογίαν μεταβαλλομένην ἐντόνως μετὰ τοῦ χρόνου.

Τὸ συμπέρασμα τοῦτο συνήχθη ἐκ τοῦ γεγονότος ὅτι ἡ περιεκτικότης εἰς Τρίτιον τῶν ὑδάτων τῶν θερμῶν πηγῶν ἦτο ὑπολογίσιμος, μεταβαλλομένη μετὰ τοῦ χρόνου καὶ παρουσιάζουσα ἐντόνους σχετικῶς διακυμάνσεις.

β. Εἰς μίαν μελέτην, ἡ ὁποία ἔλαβε χώραν εἰς Καναδᾶν [88], αἱ ἀναλύσεις Τριτίου ἐπέτρεψαν τὴν ἐξαγωγήν τοῦ συμπεράσματος ὅτι ὁ ποταμὸς Ottawa τροφοδοτεῖται κυρίως ἀπὸ ὕδωρ δύο διαφορετικῶν προελεύσεων, ἦτοι κατὰ τὰ $\frac{3}{4}$ ἀπὸ ὕδωρ τῶν πλησίον τῆς ἐπιφανείας στρωμάτων καὶ μόνον κατὰ τὸ $\frac{1}{4}$ ἀπὸ ὑπόγεια ὕδατα.

γ. Εἰς μίαν μελέτην, ἡ ὁποία ἔλαβε χώραν εἰς Ἑλβετίαν [89], αἱ ἀναλύσεις τῶν σταθερῶν ἰσοτόπων τοῦ Ὄξυγόνου καὶ τοῦ φυσικῶς ραδιενεργοῦ Τριτίου ἐπέτρεψαν τὴν ἐξαγωγήν μεταξὺ ἄλλων, τῶν κάτωθι συμπερασμάτων :

Ἡ μεγάλης δυναμικότητος πηγὴ Funtenen τροφοδοτεῖται ἀπὸ περιοχὴν ὑψομέτρου τῆς τάξεως τῶν 1200 μέτρων, ἡ δὲ μέση ἡλικία τῶν ὑδάτων τῆς ἀνέρχεται εἰς 13 περίπου ἔτη.

Τὸ συμπέρασμα τοῦτο ἐστηρίχθη, ἄφ' ἐνὸς μὲν εἰς τὴν σταθερὰν τιμὴν τοῦ $\delta^{18}\text{O}$, ἄφ' ἑτέρου δὲ εἰς τὴν, βάσει τοῦ «ἐκθετικῶν μοντέλου» (Exponential Model), ἐπεξεργασίαν τῶν τιμῶν Τριτίου.

Ἡ καρστικὴ πηγὴ Vendline τροφοδοτεῖται ἀπὸ ὕδωρ τῆς αὐτῆς προελεύσεως, μέσφ δύο διαφορετικῶν ταμιευτήρων, διαφορετικοῦ μέσου χρόνου παρα-

μονής εις αυτά, εις αναλογίαν παρουσιάζουσιν διακυμάνσεις, μετά του χρόνου, λόγω προφανώς διαφορετικής μεταβολής της υδροστατικής πίεσεως επί εκάστου ταμειυτήρος.

Το συμπέρασμα τούτο συνήχθη εκ του γεγονότος ότι, αφ' ενός μὲν ἡ τιμὴ $\delta^{14}\text{C}$ εἰς τὸ ὕδωρ τῆς πηγῆς ἦτο σταθερά, αφ' ἑτέρου δὲ ἡ τιμὴ Τριτίου παρουσιάζει μεγάλας διακυμάνσεις μετά του χρόνου.

δ. Εἰς μίαν μελέτην τῶν D.B. Smith and al [90], αἱ ἀναλύσεις Τριτίου ἐπέτρεψαν τὴν διερεύνησιν τοῦ μηχανισμοῦ διηθήσεως (Infiltration) τοῦ ὕδατος εἰς ἐδάφη μικρᾶς καὶ μεγάλης διαπερατότητος.

3.3.2. Χρονολόγησις ὑπογείων ὑδάτων διὰ ^{14}C .

3.3.2.1. Γενικά

Ὁ ἄνθραξ 14, ραδιενεργὸν ἰσότοπον τοῦ ἄνθρακος, ἔχει χρόνον ἡμισείας ζωῆς 5730 ἔτη. Παράγεται φυσικῶς εἰς τὰ ἀνώτερα στρώματα τῆς ἀτμοσφαιρας, δι' ἐπιδράσεως τῆς κοσμικῆς ἀκτινοβολίας ἐπὶ ἀτόμων ἀζώτου, κατὰ τὴν κάτωθι ἀντίδρασιν :

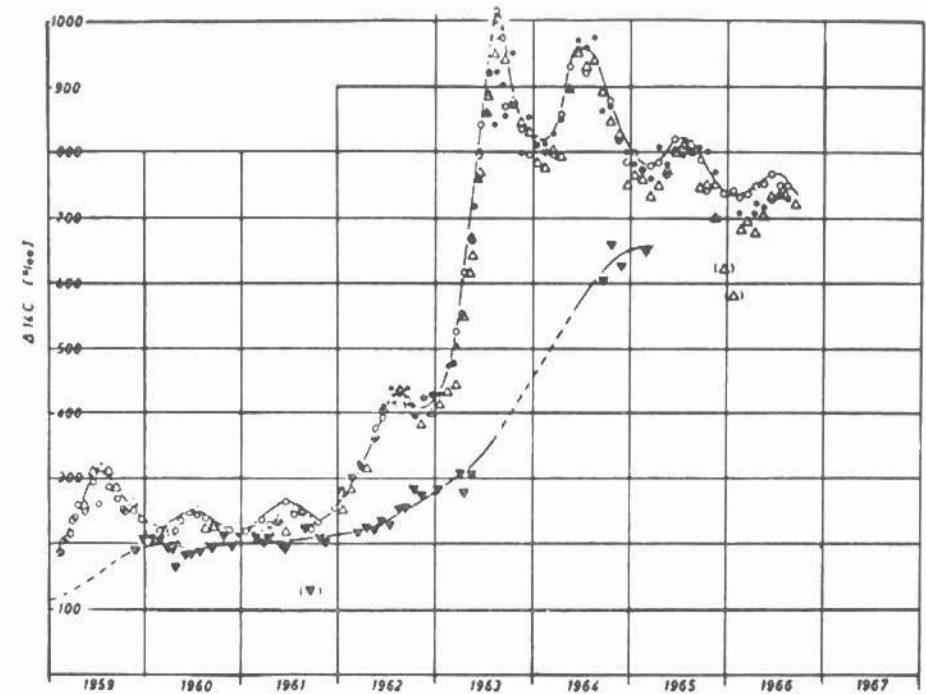


Ὁ ρυθμὸς τῆς ὡς ἄνω παραγωγῆς εἶναι περίπου $2,5 \text{ ἄτομα} / \text{cm}^2 / \text{sec}$. Τὸ οὕτω παραγόμενον ἄτομον τοῦ ^{14}C δεξιδοῦται πρὸς διοξειδίου τοῦ ἄνθρακος ($^{14}\text{CO}_2$), ἀναμιγνύεται μὲ τὸ εἰς τὴν ἀτμόσφαιραν ὑπάρχον εἰς σημαντικὰς ποσότητας $^{12}\text{CO}_2$ καὶ μετέχει εἰς τὸν γνωστὸν κύκλον αὐτοῦ εἰς τὴν φύσιν. Πολὸν ἔνωρις, εἰς τὴν ἱστορίαν τοῦ πλανῆτου μας ἀπεκατεστάθη ἰσορροπία μεταξὺ παραγωγῆς καὶ ραδιενεργοῦ διασπάσεως τοῦ ^{14}C καὶ ὡς ἐκ τούτου ὁ λόγος $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ἦτο σταθερὸς εἰς τὴν ἀτμόσφαιραν, εἰς τὴν ζῶσαν ὕλην, ἢ ὁποία χρησιμοποιεῖ τὸ CO_2 κατὰ τὸν κύκλον ζωῆς αὐτῆς καὶ εἰς ὑλικά, ὡς τὸ ὕδωρ, τὸ ὁποῖον ἀντιδρᾷ μὲ τὸ CO_2 , ὅσον διάστημα τούτο (τὸ ὕδωρ) εὐρίσκεται ἐν ἐπαφῇ μετὰ τῆς ἀτμοσφαιρας. Διὰ τὴν τιμὴν αὐτὴν τοῦ λόγου $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ἐπεκράτησεν ὁ ὅρος «σύγχρονος περιεκτικότης εἰς ^{14}C » (Modern ^{14}C Content).

Ἀφ' ἧς στιγμῆς ἡ ζῶσα ὕλη νεκρωθῆ ἢ τὸ ὕδωρ παύσῃ νὰ εὐρίσκεται εἰς ἐπαφὴν μὲ τὴν ἀτμόσφαιραν, ἡ τιμὴ τοῦ λόγου $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ φθίνει συμφώνως πρὸς τοὺς νόμους τῆς ραδιενεργοῦ διασπάσεως. Ἡ σύγκρισις τῆς ἠλαττωμένης τιμῆς τοῦ λόγου $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ πρὸς τὴν σύγχρονον περιεκτικότητα εἰς ^{14}C μᾶς δίδει τὸν χρόνον ὁ ὁποῖος παρήλθεν ἀπὸ τὴν νέκρωσιν τῆς ζώσης ὕλης ἢ τὴν ἀπομόνωσιν τοῦ ὕδατος κ.ο.κ.

Ἡ ἀπλῆ, ὡς ἄνωτέρω εἰκὼν περιεπλέχθη κατὰ τι εἰς τὸν αἰῶνα μας, λόγω τῆς ἐκ δύο κυρίως αἰτιῶν διαφοροποιήσεως τῆς τιμῆς τῆς συγχρόνου περιεκτικότητος εἰς ^{14}C (Σχῆμα 7). Αἱ ὑπεύθυνοι, διὰ τὴν διαφοροποίησιν ταύτην αἰτίαι εἶναι αφ' ἑνὸς μὲν ἡ τεραστίαι αὐξήσεις τῆς καταναλώσεως προϊόντων πετρελαίου

καὶ ἄνθρακος, ἢ ὁποία ἠῤῥξησε τὴν εἰς ἀνενεργὸν CO_2 περιεκτικότητα τῆς ἀτμοσφαιρας, αφ' ἑτέρου δὲ ἡ, συνεπεία τῶν πυρηνικῶν δοκιμῶν, εἰσοδος εἰς τὴν ἀτμόσφαιραν τεραστίων ποσοτήτων ^{14}C . Διὰ τὴν ὁμοιομορφίαν τῆς ἐκφράσεως



Σχ. 7. Σχετικὴ αὐξήσις (‰) τῆς τιμῆς ^{14}C τοῦ CO_2 τῆς ἀτμοσφαιρας, λόγω τῶν θερμοπυρηνικῶν ἐκρήξεων.

Ἄνω Καμπύλη : Εὐρώπη. Κάτω καμπύλη : Νότιος Ἀφρική.
 [ο Vermunt : 1800 m, 67°N, 10°E, Δ Shieswing, 55°N, 10°E
 ο Trapani : 38°N, 13°E. ∇ Pretoria : 26°S, 28E].

τῶν ἀποτελεσμάτων ἐπεκράτησεν, ὅπως ὡς ἔτος ἀναφορᾶς διὰ τὴν σύγχρονον περιεκτικότητα εἰς ^{14}C λαμβάνεται τὸ 1950.

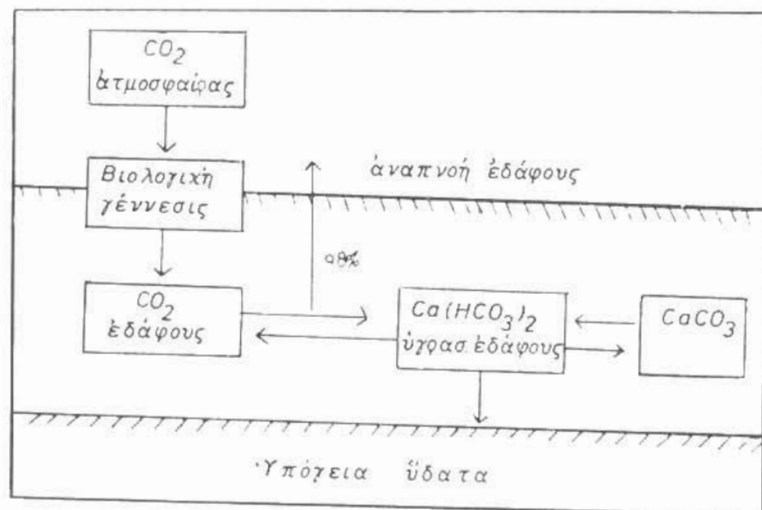
3.3.2.2. Τεχνικὴ χρονολογήσεως ὑπογείων ὑδάτων διὰ ^{14}C .

Εἰς τὰ ὑπόγεια ὕδατα ὁ ἄνθραξ εὐρίσκεται ὑπὸ μορφήν διαλελυμένου διοξειδίου τοῦ ἄνθρακος, δξίνου ἀνθρακικοῦ καὶ ἀνθρακικοῦ ἰόντος. Ἐκ τῶν μορφῶν τούτων, εἰς τὴν συνήθη τιμὴν pH τῶν ὑπογείων ὑδάτων, αἱ δύο πρῶται εἶναι αἱ ἐπικρατέστεραι.

Ἐν ἐπαφῇ μετὰ τῆς ἀτμοσφαιρας εὐρισκόμενον ὕδωρ δὲν δύναται νὰ περιέχη ἐν διαλύσει περισσότερον τῶν $1,2 \text{ mmol HCO}_3 / \text{λίτρον}$. Τὸ ὕδωρ τούτο,

διδεισδύον εντός του εδάφους περνά από την αεριζομένην ζώνην του εδάφους όπου ή μερική πίεσις του διοξειδίου του άνθρακος είναι περίπου 100 φορές (ή και περισσότερον) μεγαλύτερα της εις την ατμόσφαιραν τοιαύτης, λόγω βιολογικής διασπάσεως της οργανικής ύλης και διαλύει διοξείδιον του άνθρακος βιολογικής γενέσεως. Ός εκ τούτου συνήθως ή περιεκτικότης εις δξινον άνθρακικόν ιόν των ύπογειων υδάτων είναι πολύ μεγαλύτερα της των επιφανειακών υδάτων.

Πλὴν του ως άνωτέρω εμπλουτισμοῦ των ύπογειων υδάτων εις δξινον άνθρακικόν ιόν βιολογικής προελεύσεως παρατηρεΐται και εμπλουτισμὸς αὐτῶν εις δξινον άνθρακικόν ιόν μη βιολογικής προελεύσεως. Τοῦτο είναι συνέπεια



Σχ. 8. Μηχανισμοί επηρεάζοντες την ισοτοπικήν σύνθεσιν του C των άξινων άνθρακικών ιόντων, εις τὰ ύπόγεια ύδατα (γένεσις).

της επιδράσεως αερίου διοξειδίου του άνθρακος παρουσία υγρασίας επί πετρωμάτων άνθρακικού άσβεστίου. Άμφότεροι οί μηχανισμοί δύνανται νά συννοησθούν διά του διαγράμματος του σχήματος 8.

Κατά τὰ άνωτέρω, ή εις ^{14}C περιεκτικότης του ύδατος εξαρτάται από την παρουσίαν άνθρακικών αλάτων και δύναται νά ποικίλλη μεταξύ του 50% και του 100% της συγχρόνου περιεκτικότητος εις ^{14}C των ζώντων ύλικών.

Εάν θεωρήσωμεν ότι δυνάμεθα νά μετρήσωμεν με την άπαραίτητον ακρίβειαν και τὸ 1% της συγχρόνου περιεκτικότητος εις ^{14}C , συμπεραίνεται ότι ή μεγίστη ήλικία, ή όποία δύναται νά προσδιορισθῆ με σχετικήν ακρίβειαν, διά της μεθόδου χρονολογήσεως διά του ^{14}C , είναι 37000 έτη.

Γενικώς, μόνον μέρος των διαλελυμένων δξίνων άνθρακικών προέρχονται από CO_2 βιολογικής προελεύσεως, τὸ όποιον περιέχει ^{14}C εις την αὐτήν ήλικίαν. Η ύπόλοιπος ποσότης του δξίνου άνθρακικού

ιόντος προέρχεται, ως άνεφέρθη, εκ του CaCO_3 , τὸ όποιον εις τὰς περισσοτέρας περιπτώσεις δέν περιέχει ^{14}C , καθ' όσον τὰ άσβεστολιθικά πετρώματα είναι γενικώς πολύ παλαιά και ή άρχική ποσότης του ^{14}C έχει πλέον μηδενισθῆ λόγω ραδιενεργου διασπάσεως.

Ότω, ή προκύπτουσα διαφορά μεταξύ της ήλικίας του ύδατος, ή όποία προσδιορίζεται, εάν λάβωμεν ως άρχικήν περιεκτικότητα εις ^{14}C των ύπογειων υδάτων τὸ 100% της συγχρόνου τοιαύτης των ζώντων ύλικών, και εκείνης, ή όποία προσδιορίζεται εάν λάβωμεν ως τοιαύτην τὸ 50% της συγχρόνου εις ^{14}C περιεκτικότητος, άνέρχεται εις 5568 έτη.

Εκ των άνωτέρω, πρὸς τὸν ύπολογισμὸν της πραγματικῆς ήλικίας του ύδατος, καθίσταται αναγκαία ή γνώσις της άρχικῆς ποσότητος των δξίνων άνθρακικών ιόντων των προερχομένων εκ βιολογικού CO_2 , ήτοι της άρχικῆς εις ^{14}C περιεκτικότητος του ύπογειου ύδατος.

Η άρχική αὐτή ποσότης ύπολογίζεται υπό ώρισμένων έρευνητῶν επί τη βάσει της εις ^{13}C περιεκτικότητος των δξίνων άνθρακικών ιόντων των ύπογειων υδάτων.

Ο ^{13}C είναι σταθερόν ισότοπον του άνθρακος. Αί τιμαί του εις την φύσιν εκφράζονται εις μονάδας δ, ως διά τὸ ^{18}O και τὸ D :

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C}) \text{ δειγματος} - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C}) \text{ αναφορᾶς}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C}) \text{ αναφορᾶς}} \times 1000$$

Ός δείγμα αναφορᾶς λαμβάνεται CaCO_3 εξ άσβεστολιθικών σχηματισμῶν της Νοτίου Καρολίνας (USA). Η τιμή δ του ^{13}C εις άσβεστολίθους είναι περίπου 0, ενῶ ή τοιαύτη οργανικής προελεύσεως άνθρακος είναι -25. Εκ της τιμῆς $\delta^{13}\text{C}$ των διαλελυμένων δξίνων άνθρακικών είναι δυνατόν νά ύπολογισθῆ ή άρχική εις ^{14}C περιεκτικότης του ύπογειου ύδατος, διά πολλαπλασιαμοῦ της συγχρόνου περιεκτικότητος εις ^{14}C επί τὸν συντελεστήν $\frac{\delta^{13}\text{C}}{-25}$.

Η μέθοδος αὐτή έχει χρησιμοποιηθῆ επιτυχῶς εις πολλά περιπτώσεις, παρ' όλον ότι εις ώρισμένα εδάφη εύρέθη ότι ή τιμή του $\delta^{13}\text{C}$ του CO_2 βιολογικής προελεύσεως κυμαίνεται μεταξύ -15 και -18.

Άλλοι έρευνηταί χρησιμοποιούν ως συντελεστήν, διά την εύρεσιν της εις ^{14}C άρχικῆς περιεκτικότητος του ύπογειου ύδατος, τὸν λόγον :

$$\left(\{ \text{Cόλικός} \} - \frac{1}{2} \{ \text{HCO}_3^- \} \right) / \{ \text{Cόλικός} \}$$

Παραδείγματα Έφαρμογῶν

α. Εις μίαν μελέτην, [91] εις τὸ Τέξας, έχρησιμοποιήθη ή τεχνική χρονολογήσεως των ύπογειων υδάτων διά του ^{14}C , πρὸς προσδιορισμὸν της ήλικίας του ύδατος εις μεγάλον άπομονωμένον (confined) υδροφόρον όρίζοντα. Αὐτή εύρέθη διά χρησιμοποίησεως της τιμῆς ^{13}C του ύπογειου ύδατος, πρὸς προσδιο-

ρισμόν τῆς περιεκτικότητος αὐτοῦ εἰς ^{14}C , ποικίλλουσα ἀπὸ 0 ἔτη (εἰς τὴν περιοχὴν ἐμπλουτισμοῦ τοῦ ὀρίζοντος) ἕως 30.000 ἔτη. Αἱ, βάσει τῶν εὐρεθεισῶν ἡλικιῶν τοῦ ὕδατος εἰς διάφορα σημεῖα τοῦ ὑδροφόρου ὀρίζοντος, ὑπολογισθεῖσαι ταχύτητες αὐτοῦ (1.5 - 2 μέτρα/ἔτος) εὐρέθησαν ἐν πλήρει συμφωνίᾳ μὲ τὰς ὑπολογισθεῖσας τοιαύτας βάσει ὑδρολογικῶν δεδομένων.

β. Ἡ μέθοδος προσδιορισμοῦ τῆς ἀρχικῆς τιμῆς ^{14}C τοῦ ὑπογείου ὕδατος ἐκ τῆς τιμῆς ^{13}C αὐτοῦ, ἐν συνδυασμῷ μετὰ τῶν δεδομένων χημικῶν ἀναλύσεων, ἐχρησιμοποίηθη μὲ ἐπιτυχίαν καὶ εἰς μελέτην [92], διεξαχθεῖσαν εἰς Φλωρίδα τῆς ΗΠΑ, ἀφορῶσαν εἰς τὸν προσδιορισμόν τῆς ἡλικίας καὶ τῆς ταχύτητος μετακινήσεως τοῦ ὕδατος εἰς ἀρτεσιανὸν ὀρίζοντα τῆς περιοχῆς.

γ. Εἰς μίαν μελέτην [93], ἡ ὁποία ἔλαβε χώραν εἰς δύο κλειστοὺς ὑδροφόρους ὀρίζοντας τῆς Νοτίου Ἀφρικῆς, ἡ διὰ τῆς τεχνικῆς τοῦ ^{14}C προσδιορισθεῖσα ἡλικία τοῦ ὕδατος εὐρέθη μεταβαλλομένη κατὰ γραμμικὴν συνάρτησιν μετὰ τῆς ἀποστάσεως ἐκ τῆς περιοχῆς ἐμπλουτισμοῦ.

Ἡ ταχύτης μετακινήσεως τοῦ ὕδατος εἰς τοὺς μελετηθέντας ὀρίζοντας εὐρέθη σταθερά καὶ ἴση πρὸς 2 μέτρα/ἔτος, διὰ τὸν ἕνα ὑδροφόρον, καὶ 4 μέτρα/ἔτος, διὰ τὸν ἕτερον.

3.3.3. Χρονολόγησις ὑπογείων ὑδάτων διὰ τῆς τεχνικῆς τοῦ ^{32}Si .

Τὸ ^{32}Si , ραδιενεργὸν ἰσότοπον τοῦ πυριτίου, ἔχει χρόνον ἡμισείας ζωῆς περίπου 600 ἔτη. Παράγεται φυσικῶς εἰς τὴν ἀτμόσφαιραν διὰ διασπάσεως τοῦ Ἀργοῦ, τῆ ἐπιδράσει τῆς κοσμικῆς ἀκτινοβολίας.

Ἡ ὀλικὴ ἔτησιᾶ παραγωγή τοῦ ^{32}Si ἐκ τῆς κοσμικῆς ἀκτινοβολίας ὑπολογίζεται εἰς 2 ἕως 6 γραμμάρια.

Τὰ οὕτω παραγόμενα ἄτομα ^{32}Si ὀξειδοῦνται πρὸς $^{32}\text{SiO}_2$, τὸ ὁποῖον παρασύρεται ὑπὸ τῆς βροχῆς.

Ἡ περιεκτικότης εἰς ^{32}Si , τῆς βροχῆς εἶναι περίπου 0.2 dpm/t εἰς τὴν τροπικὴν ζώνην 0.8 dpm/t εἰς μέσα πλάτη καὶ 0.3 dpm/t εἰς πολικὰς περιοχάς.

Αἱ βασικαὶ ἀρχαὶ χρησιμοποίησεως τοῦ ^{32}Si , διὰ τὴν χρονολόγησιν τῶν ὑπογείων ὑδάτων εἶναι αἱ αὐταὶ μὲ τὰς τοιαύτας τοῦ ^{14}C καὶ T.

Λόγω τοῦ μέσου χρόνου ἡμιζωῆς τοῦ ^{32}Si , ἐν σχέσει πρὸς τὸ T καὶ τὸν ^{14}C , τοῦτο καλύπτει τὴν μεταξὺ αὐτῶν περιοχὴν, ἀπὸ ἀπόψεως ἡλικιῶν τῶν ὑπογείων ὑδάτων. Συγκεκριμένως, ἡ χρῆσις τοῦ ^{32}Si ἔχει ἀποτελεσματικότητα προκειμένου δι' ὕδατα ἡλικίας ἀπὸ 50 ἕως 2.000 ἐτῶν.

Ὁ προσδιορισμὸς τῆς περιεκτικότητος τοῦ ὕδατος εἰς ^{32}Si στηρίζεται εἰς τὴν μέτρησιν τῆς ραδιενεργείας τοῦ ^{32}P , ὁ ὁποῖος προκύπτει ἀπὸ τὴν ραδιενεργὸν διάσπασιν αὐτοῦ. Λόγω τῆς πολὺ μικρᾶς περιεκτικότητος τοῦ ὕδατος εἰς ^{32}Si , ἀπαιτοῦνται συνήθως ἀρκετοὶ τόννοι ὕδατος δι' ἑκάστην ἀνάλυσιν. Τοῦτο ἀσφαλῶς ἀποτελεῖ σημαντικὸν μειονέκτημα, πλὴν ὁμως, ἡ σημασία τῶν σχετικῶν ἀποτελεσμάτων προσέδωσε ὄθησιν εἰς τὴν χρησιμοποίησιν τῆς μεθόδου ταῖς τελευταῖα ἔτη. Ἐν τούτοις, δὲν ἔχει ἐξακριβωθῆ μὲχρι σήμερον, μετ' ἀκρι-

βείας, ὁ μηχανισμὸς ἀλληλεπιδράσεως, προκειμένου διὰ τὸ πυρίτιον, μεταξὺ ὕδατος καὶ πετρωμάτων.

Ἡ προκύπτουσα ἐκ τῆς ἐφαρμογῆς τῆς τεχνικῆς ταύτης ἡλικία τῶν ὑπογείων ὑδάτων ἔχει ἀξίαν μόνον ὡς ἀνώτατον ὄριον. Ἀντιθέτως, διὰ τὴν χρονολόγησιν τοῦ ὕδατος τῶν παγετῶνων, κυρίως τῶν πολικῶν περιοχῶν, ἡ τεχνικὴ τοῦ ^{32}Si εὐρε σημαντικὴν ἐφαρμογὴν.

Διὰ περισσοτέρας πληροφορίας ἐπὶ τῆς τεχνικῆς τοῦ ^{32}Si καὶ διὰ παραδείγματα ἐφαρμογῶν αὐτῆς, ὁ ἀναγνώστης παραπέμπεται εἰς τὴν ἐργασίαν «Silicon - 32 Hydrology» τῶν D. Lal, V. N. Nijampurkar, S. Rama, παρουσιασθεῖσαν εἰς τὸ διεθνὲς Συνέδριον «Isotope Hydrology» 1970 εἰς Βιέννην.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΑΙ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΤΗΣ ΙΣΟΤΟΠΙΚΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΕΝ ΕΛΛΑΔΙ

Ἀπὸ τὴν ὁμάδα τῶν Ἰχνηθετήσεων τῆς Δ/νσεως Τεχνολογικῶν Ἐφαρμογῶν τοῦ Κ.Π.Ε. «Δημόκριτος», ἐν συνεργασίᾳ μετὰ τοῦ Δ.Ο.Α.Ε., τῆς Δ/νσεως Ἐγγείων Βελτιώσεων Ἰσοτοπικῆς Γεωργίας καὶ τοῦ ΕΘΙΓΜΕ (Ἰσοτοπικῆς Βιομηχανίας) ἔχει μέχρι σήμερον ἐκτελεσθῆ ἵκανὸς ἀριθμὸς ὑδρολογικῶν ἐρευνῶν, κατὰ τὰς ὁποίας ἐγένετο χρῆσις μεθόδων τῆς ἰσοτοπικῆς ὑδρολογίας. Μεταξὺ αὐτῶν ἀναφέρονται αἱ κάτωθι :

4.1. Χρῆσις Τριτίου διὰ τὴν ἰχνηθέτησιν καρστικῶν ὑπογείων ὑδάτων [76].

2.4.2. Χρῆσις τῆς ἀναλύσεως διὰ νετρονικῆς ἐνεργοποίησεως εἰς τὴν διερεύνησιν ὑπογείων ὑδάτων [77].

2.4.3. Χρῆσις μὴ ραδιενεργοῦ In-E.D.T.A. ὡς ἰχνηθέτου διὰ τὸν προσδιορισμόν ταχυτήτων εἰς ἀνισότροπα μέσα [78].

4.4. Ἐφαρμογὴ τῆς τεχνικῆς μετρήσεως ταχυτήτων ρευμάτων ἐντὸς μεγάλου ἀποδέκτου ὕδατος διὰ τὴν ἐντόπισιν διαρροῶν ὕδατος εἰς αὐτόν [79].

4.5. Διερεύνησις τοῦ ὑδρολογικοῦ συστήματος τῆς περιοχῆς Στυμφαλίας - Ἄργους - Τριπόλεως διὰ φυσικῶν ἰσοτόπων [80].

4.6. Διερεύνησις τῆς συνδέσεως τῆς καταβόθρας Παρθενίου καὶ πηγῶν τῆς περιοχῆς [23].

4.7. Διερεύνησις ὑπὸ φυσικᾶς συνθήκας τῆς καταλληλότητος τοῦ ^{51}Cr -E.D.T.A., ὡς ἰχνηθέτου καρστικῶν ὑδάτων [21].

4.8. Διερεύνησις τῆς συνδέσεως τῆς καταβόθρας Σκοτεινῆς μετὰ πηγῶν τοῦ Ἀργολικοῦ πεδίου [24].

4.9. Διερεύνησις τῆς συνδέσεως τῆς καταβόθρας Νεστάνης μετὰ πηγῶν τῶν πέριξ περιοχῶν [81].

4.10. Διερεύνησις τῆς συνδέσεως τῶν καταβόθρων Μηλέας καὶ Λίμνης Τάκας μετὰ πηγῶν τῶν πέριξ πειοχῶν [82].

4.11. Ὑδρογεωλογικὴ μελέτη τῆς περιοχῆς τῶν Καμμένων Βούρλων (ἔρευνα ὑπὸ ἐκτέλεσιν).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. X. ΔΗΜΗΤΡΟΥΛΑΣ, Ι. ΛΕΟΝΤΙΑΔΗΣ : «Τὰ φυσικά ισότοπα του περιβάλλοντος ως ίχνη-θέται δια την μελέτην της μετακινήσεως του ύδατος εις την φύσιν». DEMO 73/2 G.
2. R. HOURS : «Applications de la radioactivité à l'hydraulique souterraine». DC/R/AR/60 - 12.
3. E. HALEVY, A. NIR : «Use of radioisotopes in studies of ground water flow». TaHal, Tel - Aviv — P.N. 82.
4. W.J. KAUFMAN, ORLOB : «Measuring groundwater movement with radioactive and chemical tracers». Journ Am. Wat. works Assoc. 48, 5, p. 559 - 572.
5. H. SCHOELLER : «Les eaux souterraines». Masson et Cie, Paris 1962.
6. H.W. FEELY, A. WALTON, C.R. BARNETT, F. BAZAN : «The potential applications of radioisotope techniques to water resource investigation and utilisation», NYO 9040.
7. G. KNUTSSON, K. LJUNGGREN, H.G. FORSBERG : «Field and laboratory tests of Chromium 51 EDTA and tritium water as a double tracer of groundwater flow», Radioisotopes in Hydrology. IAEA, Vienna (1963), 347 - 363.
8. G. KNUTSSON, H.C. FORSBERG : «Laboratory evaluation of ⁵¹Cr - EDTA as a tracer for groundwater flow», Radioisotopes in Hydrology, IAEA, Vienna (1966), 629 - 652.
9. A. LALLEMAND : «Contribution à la selection de traceurs radioactifs pour l'hydrologie», EUR 4222 f.
10. GARBER, SKULBERG : «Sorption phenomena of radionuclides to clay particles in river water». Int. Journ. Air wat. Poll., Pergamon Press, vol. 8, 1964.
11. G. STEWART : «Experiences using tritium in scientific Hydrology» Proceedings of the sixth intern. Confer. Radiocarbon and Tritium dating, Pullmann 1965. U.S.A.E.C. pp. 643 - 658.
12. GLOBOUSS : «Utilisation de complexes radioactifs comme traceurs de l'eau dans les études hydrologiques». Pochvedenie S.S.S.R., 1961, 9, pp. 105 - 110. Traduction C.E.A. No R 1661.
13. C. DIMITROULAS, T. PAPANIMITROPOULOS, N. PAKAKIS : «The loss of tracers in various geological formations», Memoires de IAH, Belgrade (1963), Tome VI, pp. 113 - 120.
14. W.T. LACY, W. DE LAGUNA : «Method for preparing radioactive cations for tracing ground water». Science 124 (1956), p. 402.
15. R. HOURS : «Les traceurs radioactifs en Hydrologie». La Houille blanche, No special A/1955.
16. E. HALEVY, A. NIR, Y. HARPAZ, S. MANDEL : «Laboratory and field experiments on the suitability of various tracers», Conf. Genève 1958, vol. 20, P/1613, pp. 158 - 161.
17. R.J. HEEMSTRA, W.J. WATKINS : «Laboratory evaluations of nine water tracers», Neleconics, vol. : 19, no I, pp. 92 - 96.
18. B. DEGOT, P. LEVEQUE, G. COURTOIS, M. GASNIER, S. GODAR : «Deux utilisations du brone - 82 en hydrodynamique souterraine». Radioisotopes in Hydrology, IAEA, Vienna (1963), pp. 324 - 346.
19. HAZZAA, SAAD, GIRGIS : «Determination of the porosity of groundwater aquifers by the radioactive tracer technique», Int. Jour. App. Rad. 1965, Vol. 16.
20. J. LEONTIADIS, C. DIMITROULAS : «Adsorption of Cr - E.D.T.A. on carbon active columns» DEMO 71/13 E & G.

21. C. DIMITROULAS, J. LEONTIADIS : «Investigation, under natural Conditions, of the feasibility of ⁵¹Cr - E.D.T.A. as Tracer of Karst Groundwater» DEMO 71/12 E & G.
22. Ι. ΛΕΟΝΤΙΑΔΗΣ, ΧΡ. ΔΗΜΗΤΡΟΥΛΑΣ : «Τὰ ραδιοϊσότοπα εις μετρήσεις παροχής ύγρων εις κλειστά και άνοικτά συστήματα». Τεχνικά Χρονικά 1/523 (Ιανουάριος 1970), 41 - 45.
23. J. LEONTIADIS, C. DIMITROULAS : «The Use of Radioisotopes in tracing Karst Ground - water in Greece. I. Further Investigation on the possible Interconnection between Partheni Sinkhole and various Springs of the near Area», DEMO 71/10 E & G.
24. C. DIMITROULAS, J. LEONTIADIS : «The Use of Radioisotopes in tracing Karst Ground - water in Greece. II. Investigation on the possible Interconnection between Skotini Sinkhole and Springs of Argos Area». DEMO 71/14 E & G.
25. G. TAYLOR : «The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe». Proceedings of the Royal Society, London V. 223A (1954) p. 446 - 68.
26. L. YOUNG, G. WILSON : National Engineering Laboratory, Glasgow, Fluids Report No. 60 (1957).
27. K.J. WHITEMAN : Brit. Hydromechanics Research Assn Report No TN 505 (1955).
28. E. HALEVY, H. MOSER, D. ZELHOFER, A. ZUBER : «Borehole dilution technique : A critical review», Isotopes in Hydrology (Proc. Symp. Vienna, 1966), IAEA, Vienna (1967) pp. 531 - 564.
29. W. DROST, D. KLOTZ, A. KOCH, H. MOSER, F. NEUMAIER, W. RAUERT : «The Borehole Dilution Method of Measuring Groundwater Filtration Velocity», C.S.F - Bericht R 16.
30. R. STERNAU, S. SCHWARZ, A. MERCADO, Y. HARPAZ, A. NIR, E. HALEVY : «Radioisotopes tracers in large - scale recharge studies of groundwater», Isotopes in Hydrology (Proc. symp. Vienna, 1966), IAEA, Vienna (1967), pp. 489 - 505.
31. J. SCHWARZ : «Recharge and Mixing Investigations at Hof Hacarmel well Field» TaHal - water planning for Israel Ltd, P.N. 294 (1963).
32. MERCADO A. : «Recharge and Mixing Tests at Yavne 20 well Field». TaHal - water planning for Israel Ltd, P.N. 611 (1966).
33. J. GUIZERIX, J. MILINARI, B. GAILLARD, R. CORDA : «Localisation des fuites sur un grand réservoir à l'aide de traceurs radiactifs», Isotopes in Hydrology (Proc. Symp. Vienna 1966), IAEA, Vienna (1967) pp. 601 - 16.
34. W.J. KAUFMANN, D.K. TODD : «Application of tritium tracer to canal seepage measurements». Tritium in the Physical and Biological Sciences (Proc. Symp. Vienna (1961) I, IAEA, Vienna (1962), pp. 83 - 94.
35. R.A. ELDER, S. VISANDER : «Capabilities and potential of USAEC's current meter for ultra - low - velocity measurements», Isotopes in Hydrology (Proc. Symp. Vienna, 1966), IAEA, Vienna (1967) pp. 683 - 95.
36. RAMETTE, M., HEUZEL, M. : «Le Rhône à Lyon, Étude de l'entraînement des galets à l'aide de traceurs radioactifs». Houille Blanche, numéro spécial A (1962).
37. HUBELL, D.W., SAYRE, W.W. : «Sand transport studies with radioactive tracers». Proc. ASCE Hydraulics Division HY 3 90, Paper 3900 (1964).
38. SMITH, D.B. PARSONS, T.V. : «Radioisotope techniques for determining silt movement from spoil grounds in the Firth of Forth» : Isotopes in Hydrology (Proc. Symp. Vienna 1966), IAEA, Vienna (1967) 167.
39. ARLMAN, J.J., SVASEK, J.N., VERKERK, B. : «Die Anwendung von radioaktiven Isotopen zum Studium des Sandtransportes durch strömendes Wasser. The use of radioisotopes for the study of littoral drift». Philips tech. Rev. 21 (1960) 157 - 66; Philips tech. Rdsch. 21, N 2 - 6 153; Revue tech. Philips 21 (1960) 169 - 79.

40. COURTOIS, G.: «Emploi des radioéléments en sédimentologie». *Isotopes in Hydrology* (Proc. Symp. Vienna, 1966), IAEA, Vienna (1967), 117.
- CAMPBELL, B.L., SEATONBERRY, B.W.: «Surface labelling of sand with ^{51}Cr by thermal decomposition of ammonium dichromate ^{51}Cr ». *Ibid.*, 227.
41. CORDEIRO, S.: «Expériences relatives à l'emploi à grande échelle de l'argent 110 pour l'étude des mouvements des sédiments marins» 1ère Réunion des techniciens portugais de l'énergie nucléaire, Lisbonne, 1958 (en portugais).
42. SMITH, D.B., EAKINS, J.D.: «Radioactive methods for labelling and tracing sand and pebbles in investigations of littoral drift». *Radioisotopes in Scientific Research II*, UNESCO, Paris (1958) 619 - 50; see also *Int. J. appl. Radiat. Isotopes* 3 (1957) 203.
43. MEYN, G.: «Technique de marquage radioactif pour l'étude des mouvements de sable dans les eaux côtières allemandes» C.R. Réunion Bruxelles, 2 - 5 Oct. 1963, Eurisotop, Cah. Inf. 8, Communication 14 (1965) 195 - 200.
44. PETERSEN, B.R.: «Some radioactive surface labelling methods» *Ingenören* 3 (1960) *Int. Ed.* 4 (1960) 99 - 102.
45. GÖTTE, H.: «Procédé pour marquer superficiellement le sable naturel avec des radionuclides». Brevet DAS 1.146.427 du 5/10/1961.
46. PETERSEN, B.R.: «Radioactive surface labelling of powdered materials by means of gold - 198». *Production and Use of Short - Lived Radioisotopes from Reactors* (Proc. Sem. Vienna, 1962) I, IAEA, Vienna (1963) 269 - 74.
47. CAMPBELL, B.L.: «Sediment research in Australia». *Atom. Energy, Sydney* (Oct. 1964) 13 - 18.
48. BOUGAULT, H., CAILDOT, A., COURTOIS, G., JEANNEAU, B.: «Dépôts superficiels de radioéléments sur les sables et les vases». *Isotopes in Hydrology* (Proc. Symp. Vienna, 1966), IAEA, Vienna (1967) 233.
49. GIBERT, A., CORDEIRO, S.: «A general method for sand labelling with radioactive nuclides». *Int. J. appl. Radiat. Isotopes* 13 (1962) 41 - 46.
50. KRONE, R.B.: «An underwater scintillation detector for emitters» *Manual University of Calif. Berkeley, Hydraulics Lab.* (1960).
51. CRICKMORE, M.J., LEAN, G.M.: «The measurement of sand transport by means of radioactive tracers» *Proc. R. Soc. A* 266 1326 (1962) 402 - 21.
52. CRICKMORE, M.J., LEAN, G.M.: «The measurement of sand transport by the time integration method with radioactive tracers». *Proc. R. Soc. A* 270 1340 (1962) 27 - 47.
53. LEAN, G.M., CRICKMORE, M.J.: «Methods for measuring sand transport using radioactive tracers». *Radioisotopes in Hydrology* (Proc. Symp. Tokyo, 1963), IAEA, Vienna (1963) 111 - 30.
54. RUSSELL, R.: «The use of fluorescent tracers for the measurement of littoral drift». *Proc. 7th conf. on Coastal Engineering* 1 (1961) 418 - 44.
55. PILON, J.J.: «Mésures par traceurs radioactifs du mouvement des sables aux Pays - Bas 1957 - 1962». C.R., Réunion Bruxelles, 2 - 5 Oct. 1963, Eurisotop, Cah. Inf. 8, Communication 15 (1965) 201 - 314.
56. COURTOIS, G.: «Possibilités d'emploi d'un nombre limité de grains radioactifs dans les études quantitatives de mouvements de sédiments». *Int. J. appl. Radiat. Isotopes* 15 (1964) 655 - 63; see also *Eurisotop, Cah. Inf. 8, Communication* 20 (1965) 333 - 48.
57. COURTOIS, G., SAUZAY, G.: «Les méthodes de bilan des taux de comptage de traceurs radioactifs appliquées à la mesure des débits massiques de charriage». *Hydrology* 3 (1966).

58. HARTLEY, P.E.: «A technique for digital computer processing of data from radioisotope sediment tracing studies» *Int. J. appl. Isotopes Radiat.* 18 (1967) 713 - 20.
59. HARTLEY, P.E.: *Rep. AAEC/TM 303* (1965).
60. BYERLY, J.R.: «The relationship between watershed geology and beach radioactivity». *Institute of Engineering Research, Hydraulics Engineering Lab., Wave Research Projects HEL - 4 - 3*, University of Calif, Berkeley (1962).
61. TASHJIAN, Z., CHERRY, J., GORDON, G., GABLINGER, M.: «Radiometric determination of thorium in coastal sands for tracing littoral sediment» *Hydraulics Engineering Lab., University of Calif., Berkeley, HEL 5 - 3* (1964).
62. KLINGEMAN, P.C., KAUFMANN, W.J.: «Transport of Radionuclides with San Francisco Bay Sediments». *Progress Report 1961/62, SERL 63/7*.
63. GRANT GROSSE, M., NELSON, J.L.: «Sediment movement on the continental shelf near Washington and Oregon». *Science* 154 (1966) 879 - 85.
64. PUTMAN, J.L., SMITH, B.D., ALLEN, F., ROWAN, G.: «Thames siltation investigation, Preliminary experiments of the use of radioactive tracers for indicating mud movements». *AERE/I/R/1576*, Harwell (1954).
65. HOURS, R., NESTEROFF, W.D., ROMANOVSKY, V.: «Méthode d'étude de l'évolution des plages par traceurs radioactifs». *Trav. Cent. Rech. Étude océanogr.* 1 11 (1955).
66. INOSE, S., KATO, M., SATO, S., SHIRAISHI, N.: «The field experiment of littoral drift using radioactive glass sand». *Int. Conf. peaceful Uses atom. Energy* (Proc. Conj. Geneva, 1955) 15 UN, New York (1956) 211 - 19.
67. GIBERT, A.: «Essais sur la possibilité d'employer le ^{109}Ag dans l'étude du transport du sable par la mer». *Ministério das Obras, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisbonne, Publication 63* (1955), see also publications 143 (1960) and 150 (1960).
68. HIRANANDANI, M.G., GOLE, C.V.: «Radioactive tracer studies of Bombay Harbour». *XXth Int. Navigation Congress, Baltimore, 1961, S II - 5 pp.* 81 - 100.
69. BONNEFILLE, R., PERNECKER, L., HEUZEL, M.: «Étude de la diffusion de la vase eu Gironde à l'aide d'un traceur radioactif». *Rapport interne CREC HJI R411, T 465 DHM* (Dec. 1965).
70. KATO, M., HOMMA, M., SATO, S., SAKAGISHI, S.: «Radiotracer experiments on littoral drift in Japan». *Radioisotopes in Hydrology* (Proc. Symp. Tokyo, 1963), IAEA, Vienna (1963) 143 - 74.
71. ANGUENOT, F., CARBONNEL, J.P., COURTOIS, G., DANION, R., FORSBERG, H., HEUZEL, M.: «Emploi de radioéléments dans le transport solide par charriage du Stung - Sen au Cambodge». C.R. Réunion Bruxelles, 2 - 5 Oct. 1963, Eurisotop, Cah. Inf. 8, Communication 10 (1965) 143 - 70.
72. SVASEK, J. N.: «Problèmes posés par l'application de traceurs radioactifs dans le domaine de l'hydraulique». *Eurisotop, Cah. Inf.* 3 (1965) 60 - 66.
73. BACH SELLERS, CHARLES A. ZIEGLER and JOHN PAPADOPOULOS: «Development of a Radioisotope Gage for Monitoring Sediment Concentration in Rivers and Streams». «Isotope techniques in the hydrologic cycle», *Geophysical Monograph Series No 11, American Geophysical Union, 1967, pp.* 3 - 10.
74. «Nuclear well logging in Hydrology», IAEA - T.R.S No 126, 1971.
75. «Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology», IAEA - T.R.S. No 91, 1968.

76. B.J. BURDON, E. ERIKSSON, B.R. PAYNE, T. PAPADIMITROPOULOS, N. PAPAKIS : «The use of Tritium in tracing Karst Groundwater in Greece». Proceedings of the I.A.E.A. symposium «Radioisotopes in Hydrology», Tokyo, 1963, pp. 309 - 320.
77. C. DIMITROULAS, T. PAPADIMITROPOULOS, N. PAPAKIS : «Groundwater Investigation by the use of neutron activation analysis». Memoires de l'Association Internationale des Hydrogeologues, 5, Athènes, 1962, pp. 83 - 103.
78. C. DIMITROULAS, T. PAPADIMITROPOULOS, N. PAPAKIS : « Non radioactive In - E.D.T.A. as tracer for the determination of Ground water velocities in anisotropic media». Memoires de l'association internationale de Hydrogeologues, Tome VII, Reunion de Hanovre, 1967, 227 - 30.
79. C. DIMITROULAS, T. PAPADIMITROPOULOS, N. PAPAKIS : «Determination of leakages from a large water reservoir using Radioisotopic current meter». Memoires de l'association internationale de Hydrogeologues, Reunion de Istanbul, 1967, 8 :
80. I.A.E.A. report on the Hydrological system of Stymfalia - Argos - Tripolis area. 1969.
81. J. LEONTIADIS, C. DIMITROULAS : «The use of radioisotopes in karst Groundwater in Greece. III. Investigation on the possible interconnection between Nestani sinkhole and various springs of the near area. «Demo 72/3 E & G 1972.
82. J. LEONTIADIS, C. DIMITROULAS : «The use of radioisotopes in tracing karst Groundwater in Greece. IV. Investigation on the possible interconnection between sinkholes of Milea and Taka lake with various springs of the near area» Demo 73/4 E & G.
83. I. AL, D. & B. PETERS : «Cosmic ray produced isotopes and their application to problems in geophysics «Progress in Elementary particle and cosmic Ray Physics.» T.C. Wilson and S.A. Wilson, S.A. Wonthysen, eds, Vol. 7, p. 74, North Holland Publishing Co., Amsterdam 1962.
84. «Tritium and other Environmental isotopes in the Hydrological Cycle» IAEA Technical reports series No 73. 1967.
85. NIR, A. : «On the interpretation of tritium age measurements of ground water». Jour.t Geophys. Research, vol. 69, no 12, pp. 2589 - 2595, 1964.
86. T. DINÇER, G.H. DAVIS : «Some considerations on Tritium Dating and the estimates of Tritium input Function». Memoires of the Congress of Istanbul, 1967 8 (International Assoc. of Hydrogeologists).
87. G.H. DAVIS, B.R. PAYNE et al. : «Seasonal Variations in the Tritium Content of Groundwaters of the Vienna basin, Austria «Isotopes in Hydrology», Vienna 1967 p.p. 451-467.
88. R.M. BROWN : «Distribution of Hydrogen Isotopes in Canadian Waters.» Isotopes in Hydrology, Vienna 1970, pp. 3 - 21.
89. U. SIEGENTHALER et al. : «Tritium and oxygen - 18 in natural water samples from Switzerland». Isotopes in Hydrology. Vienna 1970, pp. 373 - 385.
90. D.B. SMITH, P.L. WEARN : «Water movement in the Unsaturated zone of high and low permeability Strata by measuring natural Tritium». Isotopes in Hydrology, Vienna 1970, pp. 73 - 87.
91. F.J. PEARSON, DR. E. WHITE : «Carbon 14 ages and flow rates of water in Carrizo Sand, Atascosa County, Texas». Water Res. Research, V. 8, p. 251, 1967.
92. F. J. PEARSON, B.B. HANSHAW : «Sources of dissolved carbonate species in groundwater and their effects on carbon - 14 dating». Isotopes in Hydrology, Vienna 1970, pp. 271 - 286.
93. J. C. VOORHIES : «Carbon 14 dating of groundwaters». Isotopes in Hydrology, Vienna 1970, pp. 225 - 239.