

## ИЗСЛЕДВАНИЯ ВЪРХУ МИГРАЦИОННАТА СПОСОБНОСТ НА НЯКОИ РАДИОНУКЛИДИ В ПОДЗЕМНИТЕ ВОДИ

Михаил Гълъбов

Минно-геоложки университет  
"Св. Иван Рилски"  
София 1700, България  
E-mail: [galabov@aquater-bg.com](mailto:galabov@aquater-bg.com)

Станислав Ковачев

Минно-геоложки университет  
"Св. Иван Рилски"  
София 1700, България  
E-mail: [kovachev@aquater-bg.com](mailto:kovachev@aquater-bg.com)

Васил Мавродиев

Софийски университет  
"Св. Климент Охридски"  
София 1126, България  
E-mail: [wmavrodiev@yahoo.com](mailto:wmavrodiev@yahoo.com)

### РЕЗЮМЕ

Проведени са серия динамични миграционни опити за изясняване миграционната способност (главно сорбционните характеристики) на някои важни радионуклиди във филтрационна среда. Изследванията обхващат: тритий, въглерод-14, кобалт-60, стронций-90 и цезий-137, които са приоритетни при оценката на екологичния риск от хранилището за радиоактивни отпадъци "Нови хан". Опитите са проведени със специално създадена лабораторна установка и с два вида филити, които изграждат площадката и района около хранилището. Определян е основният миграционен параметър, характеризиращ сорбируемостта, а именно – коефициентът на разпределение  $K_d$ , респ. "факторът на замъсяване"  $R$  (retardation factor), както и дисперсивността  $\lambda$ . В зависимост от продължителността на опита и получените данни, за изчисляване на миграционните параметри са използвани следните методи: метод на характерните точки (при достигната относителна активност на опита  $A' > 0.85$ ), метод на правата линия (при  $0.5 < A' < 0.85$ ), метод на максимума (при  $A' < 0.5$ ). Първите два метода предполагат "непрекъснато" подаване, а третият – "пакетно" подаване на радиоактивния разтвор. Получените резултати сочат съществени различия в сорбционното поведение на изследваните радионуклиди, които могат да се характеризират както следва: тритий – практически несорбируем, C-14 – слабо сорбируем, Co-60 и Sr-90 – силно сорбируеми, Cs-137 – много силно сорбируем. Определените опитно стойности на миграционните параметри са използвани за прогнозиране на възможното разпространение на радионуклидите в подземните води от района на хранилището (същото е извършено с помощта на математическо моделиране). Най-значимо разпространение от горните радионуклиди може да има въглерод-14, който се отличава със слабо задържане в пласта и с дълъг живот ( $T_{1/2} = 5730$  години).

### 1. Общи бележки

Прогнозирането на разпространението (миграцията) на замърсителите в подземните води изисква както е известно, познаването на някои важни характеристики, отразяващи взаимодействието на замърсителите с филтрационната среда. Най-важната измежду тях без съмнение е сорбируемостта им в конкретната среда. Ефектът на задържането (сорбцията) се отразява в уравненията на филтрационното масопренасяне чрез *коефициента на разпределение* ( $K_d$ ), респ. чрез обобщените параметри "*сорбционна порестост*" ( $n_s$ ) или "*фактор на замъсяване*" ("*retardation factor*"  $R$ ). Освен тези показатели, значение имат още показателят на дисперсивност ( $\lambda$ ) на средата, коефициентът на необратимо елиминиране (разпадане)  $\gamma$  и др.

Целта на проведените лабораторни опитно-миграционни изследвания беше да изясни някои от тези характеристики (и главно сорбционните, които имат решаващо значение за скоростта на миграция на замърсителите в подпочвеното пространство и подземните води) в конкретните хидрогеоложки условия при хранилището за радиоактивни отпадъци "Нови хан".

Лабораторните опити обхващат следните скални (почвени) разновидности и радионуклиди:

- палеозойските филити, които изграждат както самата площадка на хранилището, така и цялото околно пространство;

- радионуклидите: тритий, въглерод-14, стронций-90, цезий-137 и кобалт-60, които за конкретния обект са приоритетни по значение.

Провеждани са два типа опити: "статични" (с 14 броя проби) и "динамични" (с 10 броя проби). Пробите са взети от различни точки на проучвания участък (от различни сондажи и дълбочини), за да се постигне по-добра представителност на резултатите. По-долу за краткост са представени само резултатите от "динамичните" опити, които са по принцип по-достоверни и дават по-голяма сигурност при прогнозните изчисления.

### 2. Методика на изпълнение и интерпретация на миграционните опити

Динамичните опити бяха изпълнени в специална установка, включваща: съд (резервоар) за подавания разтвор с изследвания радионуклид; филтрационна тръба (колона) с вградената в нея проба; свързващи шлаух-тръби; събирателен резервоар. Подаването на разтвора се осъществяваше посредством перисталтична двуканална помпа Masterflex C/L, осигуряваща постоянен дебит, респ. постоянна скорост на филтрация. Филтрационната колона бе с диаметър 2,25 cm, а дължината на пробните тела – между 5 и 7 cm при различните проби. Подаването на разтвора бе отдолу-нагоре. За приготвяне на разтвора се използваше пластова вода. На изхода периодично се вземаха проби от преминалия разтвор и се определяше тяхната активност.

С всеки от радионуклидите се изпълняваха по два миграционни опита – един с т.нар. червено-кафяви филити и един с т.нар. сиво-жълти филити. Както се оказа, тези две разновидности на филитите имат много близки миграционни характеристики.

По данните от динамичните опити се определяха следните миграционни параметри:

- “Сорбционната порестост” ( $n_s$ ). Същата е обобщен параметър, който представлява:  $n_s = n_0 + \rho K_d$ ;  $n_0$  е активната порестост на средата,  $\rho$  - обемната плътност на пробата,  $K_d$  – коефициентът на разпределение, характеризиращ сорбцията.

- Коефициента на разпределение:  $K_d = (n_s - n_0) / \rho$  (след определянето на сорбционната порестост  $n_s$ ).

- Коефициента на дисперсивност ( $\lambda$ ). Същият характеризира конвективната дисперсия по фронта на замърсяването ( $D_k = \lambda v$ ,  $v$  – скоростта на филтрация).

Активната порестост на пробата ( $n_0$ ) е определяна по преминаването на трития, който е практически несорбируем и се движи с действителната скорост на водата. За него  $K_d = 0$  и  $n_s = n_0$ . За силно сорбиращите се радионуклиди (Sr-90, Co-60, Cs-134) имаме  $n_s \gg n_0$ , т.е.  $K_d \approx n_s / \rho$ . Обемната плътност ( $\rho$ ) на всяка проба е определяна по стандартния тегловен способ.

Опитните данни са обработвани в обичайната координатна система  $A^* = f(t)$  в която  $t$  е времето от началото на опита;  $A^*$  - относителната активност ( $A^* = A/A_0$ ;  $A_0$  - входната активност на подавания разтвор,  $A$  - текущата активност на изходящия разтвор по време на опита). За изчисляване на миграционните параметри са прилагани различни методи, в зависимост от продължителността на опита и достигнатите при него относителни активности. Тези методи са следните.

**а. Метод на характерните точки.** Методът е описан подробно в литературата (напр. Fried J., 1975, Гълъбов М., 1981 и др.). От кривата  $A^* = f(t)$  се определят времената  $t_{0,16}$ ,  $t_{0,5}$  и  $t_{0,84}$ , отговарящи на относителна активност  $A^*$  съответно 0,16, 0,5 и 0,84. След това:

$$n_s = \frac{v}{l} t_{0,5} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{l}{8} \left[ \frac{1 - t_{0,16}/t_{0,5}}{\sqrt{t_{0,16}/t_{0,5}}} - \frac{1 - t_{0,84}/t_{0,5}}{\sqrt{t_{0,84}/t_{0,5}}} \right]^2 \quad (2)$$

където:  $l$  е дължината на пробата;  $v$  - скоростта на филтрация при опита;

Този метод е използван за интерпретация на опитите с тритий и въглерод-14, които са кратки и бързо се достига до относителни активности над 85-90 % (понеже тритият е несорбируем, а C-14 твърде слабо сорбируем – вж. по-долу).

**б. Метод на правата линия.** Методът може да се види описан в (Шестаков В.М., 1979, Гълъбов М., 1981 и др.). Той изхожда от уравнението, описващо едномерния масопренос в условията на опита, а именно:

$$A^* = 0,5 \operatorname{erfc} \left( \frac{l - (v/n_s)t}{2\sqrt{\lambda v/n_s}} \right) = 0,5 \operatorname{erfc}(X) \quad (3)$$

В (6.4):  $\operatorname{erfc}$  – символът на т.нар. “допълнителната функция на грешките”; Останалите означения – както по-горе. С  $X$  е отбелязан аргументът на функцията  $\operatorname{erfc}$ , който се определя по опитните данни, като се използват съществуващите таблици за функцията  $\operatorname{erfc}$  и нейните родственни.

По данните от опита се построява зависимостта  $X\sqrt{t} = f(t)$ , която представлява права линия, пресичаща абсцисната ос в точка  $t_0$ , отговаряща на  $t_{0,5}$ . Миграционните параметри се изчисляват така: сорбционната порестост – по формула (1), т.е. по пресечната точка с абсцисата, а дисперсивността – по следната формула:

$$\lambda = \frac{n_s l^2}{4vB^2} \quad (4)$$

в която  $B$  е пресечната точка на правата с ординатната ос;  $l$  и  $v$  – както по-горе.

Методът на правата е използван от нас при интерпретацията на опитите с кобалт-60 и стронций-90, при които продължителността на опита позволява да се достигне  $A^* = 0,5$ , но не и да се достигнат стойности над 0,85, при които бихме могли да използваме метода на характерните точки.

**в. Метод на максимума.** Методът е описан в (Шестаков В.М., 1979, Мироненко В.А. и др., 1988 и др.). Този метод сме използвали единствено при опитите със цезий-134, които поради изключително високата сорбируемост на цезия изискват извънредно голяма продължителност на опита и значително количество разтвор. При тези условия опитът е проведен чрез “пакетно” подаване на разтвора (т.е. в течение само на определено време) и позволява да се определят миграционните параметри и без достигане на  $A^*$  до 0,5. Данните се обработват в традиционната координатна система  $A^* = f(t)$ , след което миграционните параметри се изчисляват както следва:

$$n_s = \frac{v(t_m - 0,5t_0)}{l} \quad (5)$$

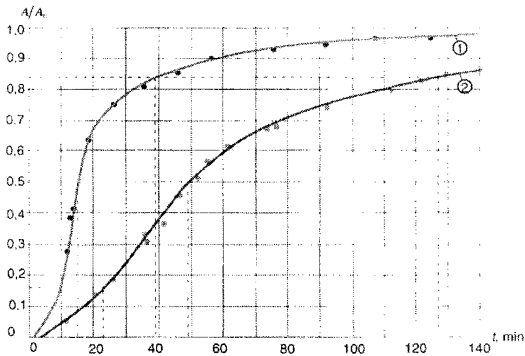
$$\lambda = 0,06l \left( \frac{t_0}{A_m^* t_m} \right)^2 \quad (6)$$

По-горе:  $t_o$  - продължителността на подаване на развора;  $A_m^*$  - максималната относителна активност достигната при опита;  $t_m$  - времето отговарящо на  $A_m^*$ .

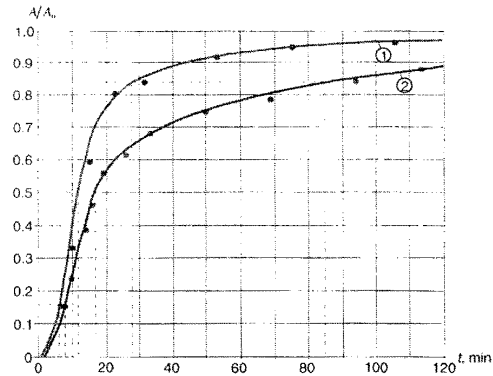
Всички гореописани методи могат да се видят илюстрирани на фигури 1 - 6.

### 3. Резултати от опитите

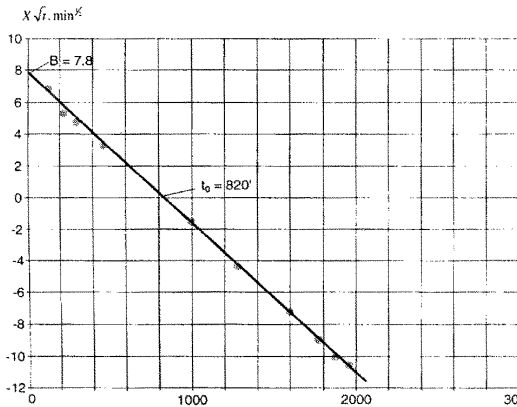
Всички резултати от изпълнените "динамични" миграционни опити са обобщени в табл. 1, а част от тях са представени и на фигури 1-6. (Компютърното оформление на фигурите е направено от Ал.Дамянов).



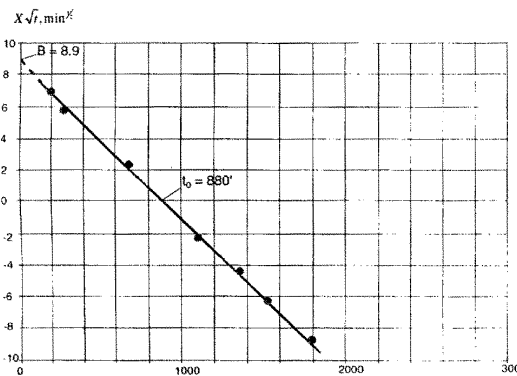
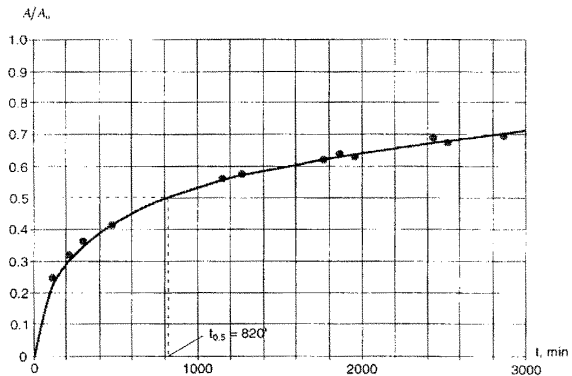
Фигура 1. Опит с Тритий (проби 1 и 2)  
 1.  $n_0 = 0.135$ ;  $\lambda = 1.5$  cm;  $K_d = 0$  cm<sup>2</sup>/g  
 2.  $n_0 = 0.16$ ;  $\lambda = 2.8$  cm;  $K_d = 0$  cm<sup>2</sup>/g



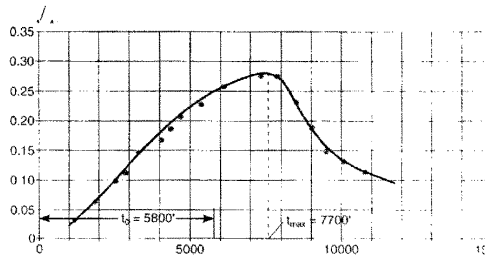
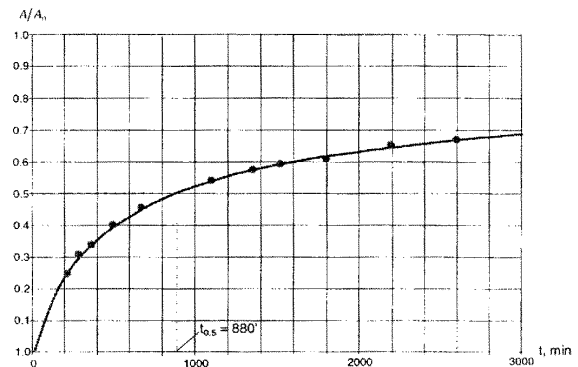
Фигура 2. Опит с Вългерод 14 (проби 1 и 2)  
 1.  $\lambda = 1.9$  cm;  $K_d = 0.48$  cm<sup>2</sup>/g  
 2.  $\lambda = 4.5$  cm;  $K_d = 0.62$  cm<sup>2</sup>/g



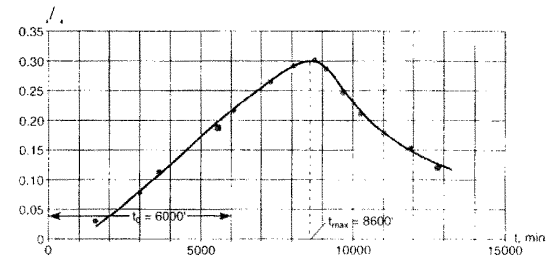
Фигура 3. Опит с Стронций 90 (проба 1)  
 $K_d = 32$  cm<sup>2</sup>/g;  $\lambda = 17.0$  cm



Фигура 4. Опит с Кобалт 60 (проба 1)  
 $K_d = 41$  cm<sup>2</sup>/g;  $\lambda = 15.3$  cm



Фигура 5. Опит с Цезий 134 (проба 1)  
 $K_d = 259$  cm<sup>2</sup>/g;  $\lambda = 2.2$  cm



Фигура 6. Опит с Цезий 134 (проба 2)  
 $K_d = 280$  cm<sup>2</sup>/g;  $\lambda = 1.6$  cm

Таблица 1. Резултати от миграционните опити

Получените резултати от динамичните опити позволяват да се направят следните изводи.

- Характеристиките, получени за двата вида филити – червено-кафявите (проби 1) и сиво-жълтите (проби 2) са много близки и това е обяснимо, като се вземе предвид, че независимо от различния си цвят те имат практически еднакъв веществен състав и зърнометрия.

- Както и при статичните опити, съотношението в сорбируемостта на различните радионуклиди се запазва, нараствайки в посоката: Н-3 → С-14 → Sr-90 → Co-60 → Cs-134.

- Получените от динамичните опити коефициенти на разпределение ( $K_d$ ) са значително по-ниски от тези, получени от статичните опити (между 3 и 5 пъти). Това е логично, тъй като при статичните опити имаме една пълна диспергираност на пробата и дълъг контактен период. В натурни условия истината ще е вероятно между тях, но във всички случаи при прогнозиране на възможната миграция на радионуклидите следва да се приемат стойностите от динамичните опити. Последните, освен че са по-близко до реалността, дават и определен запас в прогнозните изчисления.

- Коефициентът на дисперсивност  $\lambda$  е сравнително нисък - от порядъка на сантиметри (между 1,3 и 17 cm при различните опити). Както е известно, той определя интензивността на механичната дисперсия и стойностите му зависят единствено от структурата и геометрията на поровото пространство, но не и от състава на протичащата вода, респ. от съдържанието на радионуклиди в нея.

Таблица 2.

<b>Степен на сорбиране (задържане) на замърсителя</b>	<b>Коефициент на разпределение, <math>K_d</math>, cm<sup>3</sup>/g</b>
Несорбируеми	≈ 0
Слабо сорбируеми	0 – 2
Средно сорбируеми	2 – 20
Силно сорбируеми	20 – 200
Много силно сорбируеми	> 200

Ако приемем следната условна класификация на замърсителите според тяхната сорбируемост (задържане) във филтрационната среда (табл. 2.), то по отношение на

филитите изследваните от нас радионуклиди могат да се определят като:

- тритий : несорбируем;
- въглерод-14 : слабо сорбируем;
- стронций-90 и кобалт-60 : силно сорбируеми;
- цезий – 137 : много силно сорбируем.

Ще добавим, че същата последователност в сорбируемостта на радионуклидите бе установена и при "статичните" опити, като стойностите на  $K_d$  са доста по-високи (поради пълната диспергираност на пробите и дългото контактно време).

Получените експериментално стойности на миграционните параметри са използвани след това при извършените прогнозни изчисления и математическото моделиране на възможната миграция на радионуклидите в подпочвеното пространство и подземните води в района на хранилището.

## ЛИТЕРАТУРА

- Гълъбов, М. 1981. *Динамика на подземните води*. С., Техника.
- Гылыбов, М. М., П. Пенчев 1984. К методике определения гидрогеологических параметров массопереноса в водоносных пластах. – *Спис. Бълг. геол. д-во*, 3.
- Мироненко, В. М., Е. В. Мольский, В. Г. Румынин. 1988. *Изучение загрязнения подземных вод*. М., Недра.
- Шестаков, В. М. 1979. *Динамика подземных вод*. М., Изд. Моск. у-та.
- Fried, J. *Groundwater pollution*. Elsevier Sci. Publ. Co., 1.

Препоръчана за публикуване от  
катедра "Хидрогеология и инженерна геология", ГПФ

## INVESTIGATIONS ON THE MIGRATION ABILITY OF SOME RADIONUCLIDES IN GROUNDWATER

**Michail Galabov**

University of Mining and Geology  
"St. Ivan Rilski"  
Sofia 1700, Bulgaria  
E-mail: [galabov@aquater-bg.com](mailto:galabov@aquater-bg.com)

**Stanislav Kovachev**

University of Mining and Geology  
"St. Ivan Rilski"  
Sofia 1700, Bulgaria  
E-mail: [kovachev@aquater-bg.com](mailto:kovachev@aquater-bg.com)

**Vassil Mavrodiev**

University of Sofia  
"St. Kl. Ohridski"  
Sofia – 1126, Bulgaria  
E-mail: [wmavrodiev@yahoo.com](mailto:wmavrodiev@yahoo.com)

### ABSTRACT

A series of dynamic migration tests were carried out aiming at clarifying the migration ability (mainly sorption characteristics) of some important radionuclides in filtration media. The investigations include: Tritium, Carbon-14, Cobalt-60, Strontium-90 and Cesium-137, which are in primary importance in the assessment of the environmental risk from "Novi Khan" radioactive waste disposal. The tests were carried out with laboratory set, especially designed for the purpose. Two types of phyllites, building the site and the area around the waste disposal, were subject of investigation. The main migration parameters, characterising the sorbability (distribution coefficient  $K_d$ , resp. "retardation factor"  $R$ ), as well as the dispersivity  $\lambda$ , were determined. The parameters were calculated by the following methods, depending on the duration of the test and the obtained data: *method of characteristic points* (at reached relative activity during the test  $A^* > 0.85$ ), *method of the straight line* (at  $0.5 < A^* < 0.85$ ) and *method of maximum* (at  $A^* < 0.5$ ). At the first two methods a "continuous" feeding with radioactive solution was realised; at the third one – a "package" feeding was used. The results obtained reveal substantial differences in sorption behaviour of the radionuclides under investigation, which can be characterised as follows: Tritium – unsorbable, C-14 – low sorption, Sr-90 and Co-60 – high sorption, Cs-137 – very high sorption. The values of migration parameters, determined by the tests, were used for prognostication of the possible propagation of radionuclides in groundwater around the site of waste disposal (it was made by means of mathematical modelling). The most substantial propagation among the above mentioned radionuclides has Carbon-14, which is distinguished by low retention in the aquifers and has a long life ( $\tau_{1/2} = 5730$  years).

### 1. General notes

Prognosis of propagation (migration) of contaminants in groundwater can be made, as it is known, on the basis of some important factors, characterizing the interaction between contaminants and filtration media. The most substantial one undoubtedly is their sorbability in the soil media. The effect of retention (sorption) is presented in the equation of filtration mass-transport by the distribution coefficient ( $K_d$ ), respectively by the generalized parameters "sorption porosity" ( $n_s$ ) or "retardation factor" ( $R$ ). Besides them, the dispersivity factor ( $\lambda$ ) of the media, the coefficient of irreversible elimination (decay)  $\gamma$  etc. are significant as well.

Laboratory experimental investigations were carried out aiming at clarifying some of these characteristics (mainly the sorption ones, which are of decisive importance for the migration velocity of contaminants in the subsoil and groundwater) in the particular hydrogeological conditions at "Novi Khan" radioactive waste disposal.

The laboratory tests were made with the following soil varieties and radionuclides:

- Paleozoic phyllites, which build both the site of waste disposal and the whole surrounding area;
- Radionuclides: Tritium, Carbon-14, Strontium-90, Cesium-137 and Cobalt-60, being of primary importance for the present project.

Two types of tests were carried out: "static" (with 14 samples) and "dynamic" (with 10 samples). The samples were taken from different points of the site under investigation (from

different boreholes and depths) in order to get more representative results. Below are shown the results of "dynamic" tests, which are in principle more reliable and give more certitude in the prognosis calculations.

### 2. Methods of implementation and interpretation of migration tests

The dynamic tests were carried out in a special set, including a reservoir for the feeding solution with the different radionuclides, filtration tube (column) with the built of sample, connecting microbore tubings, collecting reservoir. The feeding of solution was realized by means of a peristaltic dual channel pump "Master-flex C/L", assuring a constant flow rate, resp. constant velocity of filtration. The column had a diameter of 2.5 cm and the length of samples varied between 5 and 7 cm. The solution was fed from below upwards. It was prepared by using water from the aquifer. Samples of the solution were taken periodically at the outlet and their activity was determined.

Two migration tests were made with each of the radionuclides – one with the so called red-brown phyllites and another one with the so called grey-yellow phyllites. It was found out that these two phyllite varieties possessed very close migration characteristics.

The following parameters were determined on the basis of the results of dynamic tests:

- "Sorption porosity" ( $n_s$ ). It is a generalized parameter, representing  $n_s = n_o + \rho K_d$ ;  $n_o$  is the effective porosity,  $\rho$  – bulk

density of the sample,  $K_d$  – distribution coefficient, characterizing the sorption.

- *Distribution coefficient:*  $K_d = (n_s - n_0) / \rho$  ( after determining the “sorption porosity”  $n_s$ ).

- *Dispersivity coefficient* ( $\lambda$ ). It characterizes the convection dispersivity ( $D_c = \lambda v$ ,  $v$  is the filtration velocity).

The effective porosity of the sample ( $n_0$ ) was found from the passage of Tritium, which is practically unsorbable and moves with the pore velocity of water. For it  $K_d = 0$  and  $n_s = n_0$ . For radionuclides with highly expressed sorption (as Sr-90, Co-60 and Cs-134)  $n_s \gg n_0$ , i.e.  $K_d \approx n_s / \rho$ . The bulk density of each sample was determined by the conventional weight method.

Experimental data were processed in the ordinary co-ordinate system  $A^* = f(t)$  where  $t$  is the time from the beginning of the test;  $A^*$  - relative activity ( $A^* = A / A_0$ ;  $A_0$  – input activity of the solution,  $A$  – current activity of outgoing solution during the test). Migration parameters were calculated by different methods depending on the duration of the test and the relative activity reached during the test. The methods are the following.

**a. Method of characteristic points.** This method is described in detail in the literature (for instance, *Fried J., 1975, Galabov M., 1981 etc.*). Proceeding from the curve  $A^* = f(t)$ , the times  $t_{0.16}$ ,  $t_{0.5}$  and  $t_{0.84}$  corresponding to the relative activity  $A^* = 0.16$ ,  $0.5$  and  $0.84$ , were determined. Then

$$n_s = \frac{v}{l} t_{0.5} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{l}{8} \left[ \frac{1 - t_{0.16} / t_{0.5}}{\sqrt{t_{0.16} / t_{0.5}}} - \frac{1 - t_{0.84} / t_{0.5}}{\sqrt{t_{0.84} / t_{0.5}}} \right]^2 \quad (2)$$

where:  $l$  is the length of the sample;  $v$  – filtration velocity during the test.

This method was used for interpretation of the tests with Tritium and Carbon-14, which are of short duration and a relative activity above 85 – 90 % is quickly reached (because Tritium is unsorbable, and C-14 is with low sorbability – see below).

**b. Method of the straight line.** The method is described in (*Shestakov V.M., 1979, Galabov M., 1981 etc.*). It is based on the equation of one-dimensional mass-transport in test conditions, namely:

$$A^* = 0,5 \operatorname{erfc} \left( \frac{l - (v/n_s)t}{2\sqrt{\lambda v/n_s}} \right) = 0,5 \operatorname{erfc}(X) \quad (3)$$

Table 1. Results from migration tests

In (3):  $\operatorname{erfc}$  – symbol of the “complementary error function”. The other symbols are the same as above mentioned.  $X$  is the argument of the function  $\operatorname{erfc}$ , which is determined from the test data, by using the existing tables for the  $\operatorname{erfc}$  function and its related functions.

On the basis of the test data, the relationship  $X\sqrt{t} = f(t)$  was plotted. It represents a straight line, intersecting the abscissa in point  $t_0$ , corresponding to  $t_{0.5}$ . Migration parameters are calculated as follows: “sorption porosity” – by formula (1), i.e. by the intersection point with the abscissa, and the dispersivity  $\lambda$  – by the following formula:

$$\lambda = \frac{n_s l^2}{4vB^2} \quad (4)$$

where  $B$  is the intersection point of the straight line with the ordinate;  $l$  and  $v$  – as mentioned above.

The straight line method was used for interpretation of the tests with Cobalt-60 and Strontium-90, where the duration of test made possible to reach  $A^* = 0.5$ , but not values over 0.85, when the method of characteristic points could be used.

**c. Method of the maximum.** It is described in (*Shestakov V.M., 1979, Mironenko V.M. et al., 1988 etc.*). This method was used only at the test with Cesium-134, because of the exceptionally high sorbability of Cesium. Under such conditions the test was carried out by “package” feeding of solution (during a fixed part of time) and allows to determinate the migration parameters without  $A^*$  reaching 0.5. The data are processed in the traditional co-ordinate system  $A^* = f(t)$ , and then the parameters are calculated as follows:

$$n_s = \frac{v(t_m - 0,5t_0)}{l} \quad (5)$$

$$\lambda = 0,06l \left( \frac{t_0}{A_m^* t_m} \right)^2 \quad (6)$$

where:  $t_0$  – duration of feeding with solution;  $A_m^*$  – maximum relative activity reaching during the test;  $t_m$  – time corresponding to  $A_m^*$ .

All the methods described above are illustrated in the applied figures.

### 3. Test results

All the results of “dynamic” migration tests are presented in table 1 and part of them are shown in figures 1 – 6. (Computer design of the figures is made by Al. Damyanov).





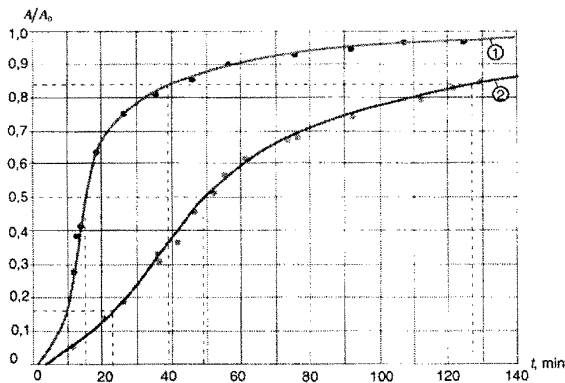


Figure 1. Test with  $^3\text{H}$  (samples 1 and 2)  
 1.  $n_0 = 0.135$ ;  $\lambda = 1.5$  cm;  $K_d = 0$  cm $^3$ /g  
 2.  $n_0 = 0.16$ ;  $\lambda = 2.8$  cm;  $K_d = 0$  cm $^3$ /g

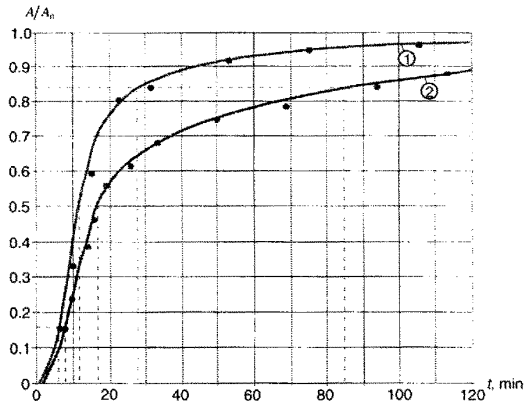


Figure 2. Test with  $^{14}\text{C}$  (samples 1 and 2)  
 1.  $K_d = 0.48$  cm $^3$ /g;  $\lambda = 1.9$  cm;  
 2.  $K_d = 0.62$  cm $^3$ /g;  $\lambda = 4.5$  cm;

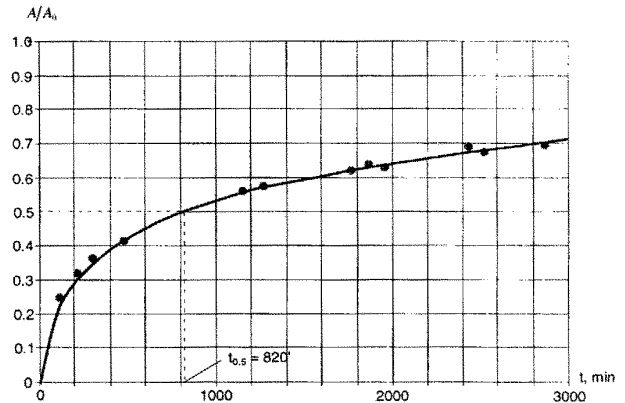
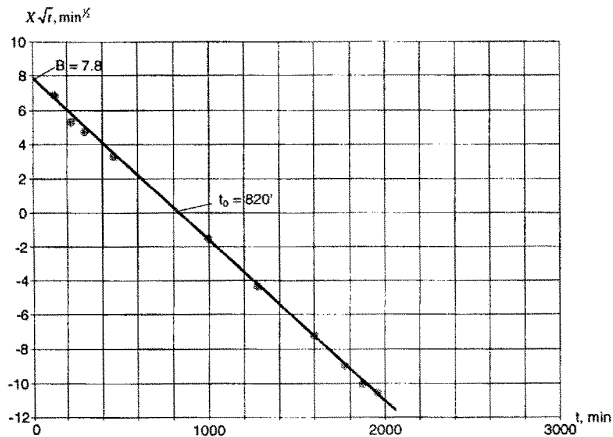


Figure 3. Test with  $^{90}\text{Sr}$  (sample 1)  
 $K_d = 32$  cm $^3$ /g;  $\lambda = 17.0$  cm

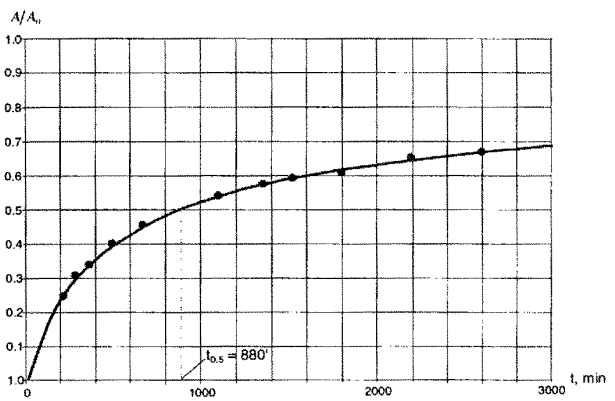
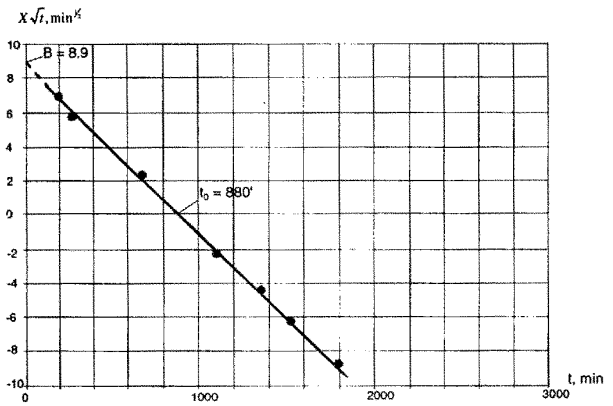


Figure 4. Test with  $^{60}\text{Co}$  (sample 1)  
 $K_d = 41$  cm $^3$ /g;  $\lambda = 15.3$  cm

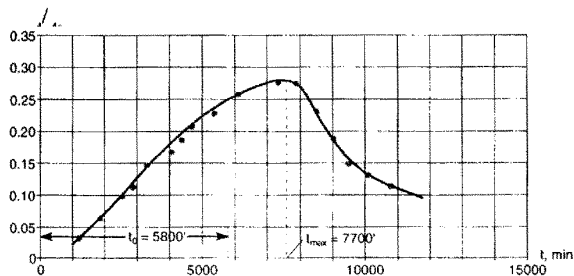


Figure 5. Test with  $^{134}\text{Cs}$  (sample 1)  
 $K_d = 259$  cm $^3$ /g;  $\lambda = 2.2$  cm

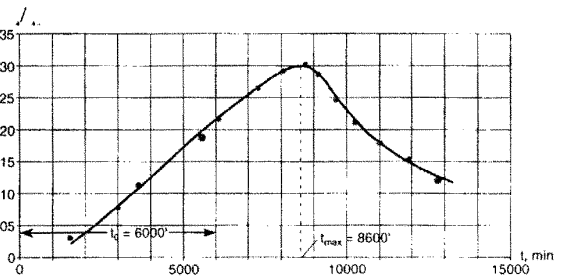


Figure 6. Test with  $^{134}\text{Cs}$  (sample 2)  
 $K_d = 280$  cm $^3$ /g;  $\lambda = 1.6$  cm

The following conclusions can be made on the basis of the migration tests results.

- The characteristics obtained for the two types of phyllites – red-brown (samples 1) and grey-yellow (samples 2) are very close and it is easy to explain (having in mind their similar composition and grain-size distribution).

- The correlation between sorbability of different radionuclide remains the same (as with the “static” tests), increasing in direction H-3 < C-14 < Sr-90 < Co-60 < Cs-134.

- Coefficients of distribution ( $K_d$ ) obtained at dynamic tests are considerably lower than these obtained at static tests (between 3 and 5 times). It is logical, because at static tests there is a full fragmentation of the sample and a long contact period. In all cases, at prognosticating of possible migration of radionuclides, the values obtained from dynamic tests should be accepted. They are not only closer to the reality, but also provide some reserve in the prognosis calculations.

- Dispersivity coefficient  $\lambda$  is relatively low – in order of centimeters ( between 1.3 and 17 cm at different tests). As it is known, it defines the intensity of the mechanical dispersion and its values depend only on the structure and geometry of pores, but not on the composition of the flowing water, resp. on the radionuclide content in it.

Assuming the following conditional classification of contaminants according to their sorbability (retention) in filtration media (see table 2), then radionuclides under consideration with regard to phyllites can be defined as follow:

- Tritium: unsorbable
- Carbon-14: with low sorbsbility
- Strontium-90 and Cobalt-60: with high sorbability
- Cesium-137: with very high sorbability.

Table 2.

<b>Degree of sorbability of the contaminant</b>	<b>Distribution coefficient <math>K_d</math>, <math>cm^3/g</math></b>
Lack sorption	$\approx 0$
Low sorption	0-2
Moderate sorption	2-20
High sorption	20-200
Very high sorption	> 200

The same sequence in sorbability of radionuclides was found out also with “static” test, the values of  $K_d$  being considerably higher.

The obtained experimental values of the migration parameters were used afterwards in the prognosis calculations and mathematical modeling of the possible migration of radionuclides in the subsoil and groundwater in the area of waste disposal “Novi Han”.

#### REFERENCES

- Galabov M., *Groundwater dynamics*. Ed. “Technika”, 1981.
- Galabov M., P.Penchev, *On the methods for determining of mass-transport parameters in aquifers. Review of Bul.Geol.Soc., n° 3, 1984.*
- Mironenko V.M., E.V.Molskii, V.G.Ruminin, *Studies of groundwater contamination*. Ed.”Nedra”, 1988.
- Penchev P., B.Velikov, *Particularities of laboratory test for determining of some physico-chemical and hydrodynamic parameters of pollutants migration in groundwater. “Hydrotech. and Melior.”, n° 10, 1979.*
- Shestakov V.M., *Groundwater dynamics*. Ed. MGU, 1979.
- Fried J., *Groundwater pollution*. Elsevier sci.publ. co, 1975.