

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ОБОСНОВАНИИ БЕЗОПАСНОСТИ

CALCULATIONAL MODELLING FOR SAFETY ANALYSIS

Н.А. АНИСИМОВ,
М.И. РЫЛОВ
(РЭСцентр, Санкт-Петербург)
А.С. БАРИНОВ, к.т.н.
(ГУП МосНПО «Радон»)

N.A. ANISIMOV,
M.I. RYLOV
(RESCentre, Saint Petersburg)
A.S. BARINOV, Candidate of Technical Science
(SUE SIA Radon)

■ Одномерные модели переноса загрязнения в грунте не всегда адекватно отражают реально происходящие процессы. Переход к двухмерной или трехмерной моделям позволяет многократно повысить точность расчетов. Детальное представление о путях и особенностях переноса радионуклидов, полученное при многомерном моделировании, создает основу для применения нормативов при обосновании в конкретных условиях решений о продлении сроков эксплуатации хранилищ, придании им статуса могильника, необходимости перегрузки РАО и реабилитации территории.

■ Single-dimensional models of contaminants' migration in soil do not always adequately reflect the processes that occur in real life. Transition to two- or three-dimensional modelling would help enormously improve accuracy of calculations. Detailed representation of radionuclide migration pathways and mechanisms obtained through multi-dimensional modelling can provide the basis for justification and regulatory acceptance of decisions to extend the operating lives of storage facilities, grant them the permanent repository status, remove radioactive waste in storage and rehabilitate lands.

В настоящее время значительная доля радиоактивных отходов передается на хранение на спецпредприятия системы «Радон», где в основном используются приповерхностные хранилища (их количество уже превысило 100).

Приповерхностные хранилища различаются по конструкции, составу содержащихся радиоактивных отходов, срокам эксплуатации; кроме того, их особенности определяет совокупность климатических и гидрогеологических факторов. Однако большинство таких хранилищ объединяет неопределенность их дальнейшего использования, поскольку в хранилищах находится большое количество долгоживущих радионуклидов, а их конструкция не может неограниченное время служить барьером, препятствующим распространению радиоактивных веществ в окружающую среду. Поэтому хранение РАО в приповерхностных сооружениях считается временным, при котором в качестве одного из этапов эксплуатации хранилища рассматривается его перегрузка. Критерии же, определяющие длительность возможного хранения РАО до перегрузки, с учетом последующих мероприятий по утилизации конструкций хранилищ и реабилитации территории, на которой они расположены, в настоящее время не разработаны.

В последние годы вышел ряд нормативных документов, конкретизирующих принципы, критерии и требования безопасности приповерхностных хранилищ РАО. Согласно документу НП-069-06 («Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности»), возможно придание хранилищу статуса могильника. В качестве основы для оценки безопасности и принятия тех или иных решений служит прогнозный расчет загрязнения

Currently, a large share of the Russian radioactive waste is transported for storage to Radon sites, which primarily employ near-surface storage technologies (such surface storage facilities now number over 100).

Near-surface storage facilities may differ in design, composition of the waste they contain, operation of storage lives. In addition, climatic and hydrogeologic factors also influence their design features. However, most such sites also share an uncertain future status, as they accommodate large amounts of long-lived radionuclides and their designs do not provide for them to act indefinitely as containment barriers against the release of radioactivity into the environment. Thus, storage of radwaste in near-surface storage facilities is regarded to be temporary, and the need for eventual removal of radwaste is considered to be an intrinsic feature of such sites. At present, however, there are no criteria to determine for how long can the waste be stored further before removal, taking into account the future dismantling of such structures and rehabilitation of lands that they stand on.

Recently, a number of regulations were introduced that spell out in better detail the safety principles, criteria and requirements for near-surface radwaste storage facilities. According to the document NP-069-06 ("Near-surface Repositories of Radioactive Waste. Safety Requirements"), such storage sites may be given the status of permanent burial grounds. The core of safety evaluation and basis for decision-making is to be provided by calculational predictions of environmental pollution as a result of potential release of radioactivity to outside the storage facilities' containment boundaries. Accuracy and reliability of calculation results thus come to play a very important role.

окружающей среды вследствие возможного выноса радиоактивных веществ за пределы конструктивных границ хранилищ. При этом существенным моментом становится точность и достоверность результатов, полученных с помощью расчетных моделей.

МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОСЛЕДСТВИЙ ДОЛГОВРЕМЕННОГО ХРАНЕНИЯ ТРО

При проведении расчетных оценок безопасности хранения РАО в приповерхностных хранилищах обычно используются модели, упрощенные за счет уменьшения размерности задачи определения распространения радиоактивных веществ в геологических породах. Уменьшение размерности задачи, с одной стороны, позволяет привлечь достаточно удобные в применении специализированные расчетные пакеты, основанные на методологии камерного моделирования (например, Ecolego, Amber), или – в ряде случаев, при построении одномерных моделей – воспользоваться аналитическими решениями. С другой стороны, такое упрощение является вынужденным из-за невозможности применения сложных трехмерных моделей при недостатке подробных сведений о гидрогеологическом строении исследуемой территории.

На рисунке 1 представлена модель гидрогеологического строения площадки Научно-производственного комплекса ГУП МосНПО «Радон», в которой выделено шесть водоносных горизонтов, разделенных слабопроницаемыми породами (для них значения коэффициента фильтрации заданы в диапазоне 0,0001-0,001 м/сутки.) На основе данной модели был произведен анализ последствий долговременного хранения твердых радиоактивных отходов (ТРО) в приповерхностных хранилищах РАО (ПХРО) и хранилищах скважинного типа (скважинах большого диаметра – СБД).

Формирование первого варианта расчетной модели было основано на предположении, что горизонтальный перенос радионуклидов происходит в третьем водоносном горизонте, поскольку два верхних горизонта имеют недостаточную водообильность. Во втором варианте учитывалась возможность распространения радионуклидов в глубину по всей толще пород, исходя из значений их коэффициентов фильтрации и гидравлических градиентов. Эти сценарии соответствуют одномерной и двухмерной моделям расчета конвективно-диффузионного переноса загрязнения с учетом радиоактивного распада и процессов адсорбции радионуклидов в породах.

Двухмерная модель задана следующим уравнением:

$$\frac{D_x}{\theta_e} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{D_z}{\theta_e} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{v_x}{\theta_e} \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{v_z}{\theta_e} \frac{\partial C}{\partial z} = R \frac{\partial C}{\partial t} + R\lambda C,$$

где:

x, y – оси координат;

C – концентрация загрязнителя в грунтовых водах, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

θ_e – эффективная пористость;

v_x, v_z – скорость фильтрации, м/год;

R – коэффициент запаздывания в геосфере;

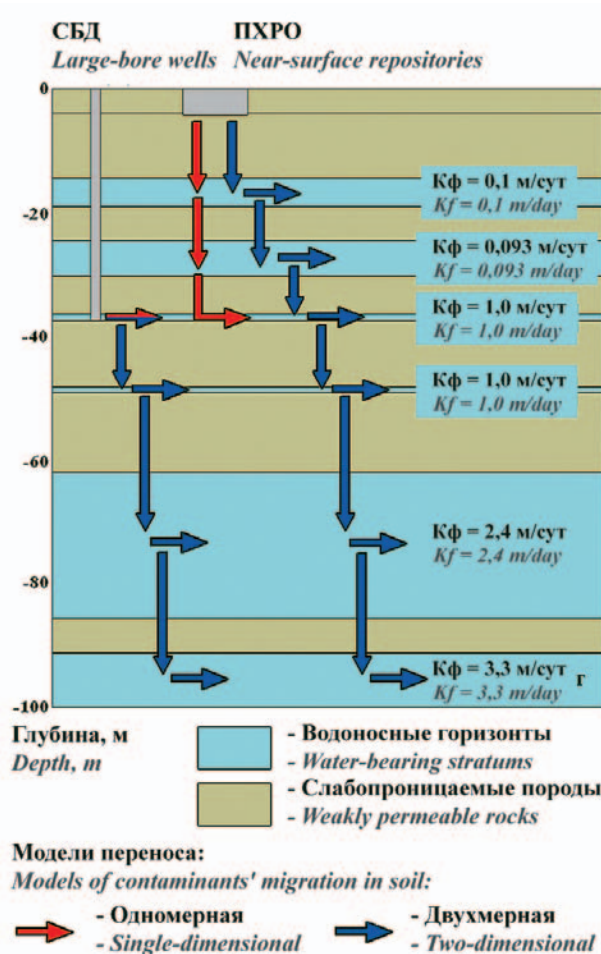


Рис. 1. Модель гидрогеологического строения площадки Научно-производственного комплекса ГУП МосНПО «Радон»

Fig. 1. Model of hydrogeological build-up of the site of the Radon Moscow Science and Production Centre

MODEL FOR ANALYSIS OF CONSEQUENCES OF LONG-TERM STORAGE OF SOLID RADWASTE

Calculation-based safety assessments of radwaste storage in near-surface repositories normally use models that are simplified with respect to the magnitude of the task of radioactivity spreading in rocks. Such simplification of magnitude, on one hand, enables utilisation of convenient specialised calculation packages based on compartment modelling methodology (such as Ecolego, Amber), or alternatively – in certain cases, when single-dimensional models are built – use analytical solutions. On the other hand, such simplification is a forced measure caused by our inability to apply complex three-dimensional models when detailed information regarding the hydrogeological conditions of the area is lacking.

Figure 1 represents a model of hydrogeological build-up of the site of the Radon Moscow Science and Production Centre, showing six water-bearing strata separated with weakly permeable rocks (filtration coefficients of these range within 0.0001-0.001 m/day.) This model was used to analyse the consequences of long-term storage of solid radwaste in near-surface repositories and well-type repositories (large-bore wells).

The first version of the model was built on the premise that horizontal migration of radionuclides oc-

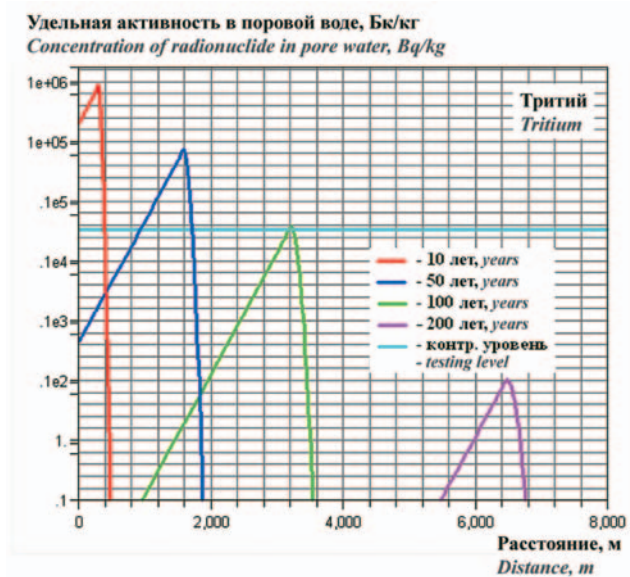


Рис. 2. Концентрация трития в поровой воде третьего водоносного горизонта
Fig. 2. Concentration of tritium in pore water of the third water-bearing stratum

λ – константа радиоактивного распада, год⁻¹;
 D_x и D_y – коэффициенты дисперсии, м²/год.

Для расчетов по одномерной модели использовалось аналитическое решение редуцированного (одномерного) варианта этого уравнения.

По консервативному сценарию выхода радионуклидов из хранилищ предполагалось, что через 50 лет происходит полная потеря изолирующих свойств конструкций хранилищ и находящихся в них упаковок ТРО, а скорость поступления радионуклидов

occurs in the third water-bearing stratum, as the first two top strata were water-depleted. The second version assumed that it was possible for radionuclides to penetrate downward through the full depth of the rocks, taking into account their filtration coefficients and hydraulic gradients. These two scenarios correspond to the single-dimensional and two-dimensional models for calculation of convection-diffusion migration of contamination, taking into account natural decay and radionuclide adsorption by rocks.

The two-dimensional model can be expressed in the form of the following equation:

$$\frac{D_x}{\theta_e} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{D_z}{\theta_e} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{v_x}{\theta_e} \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{v_z}{\theta_e} \frac{\partial C}{\partial z} = R \frac{\partial C}{\partial t} + R\lambda C,$$

where:

x, y are the axes of reference;

C is the concentration of contaminant in ground water, $kg \cdot m^{-3}$;

θ_e is effective porosity;

v_x, v_z is the rate of filtration, m/year;

R is the lag coefficient for geosphere;

λ is the radioactive decay constant, year⁻¹;

D_x and D_y are dispersion coefficients, m²/year.

For single-dimension calculations, analytical solution of a reduced (single-dimension) version of the equation above was used.

It was conservatively assumed that after 50 years, all containment properties of the storage site's structures and packages will be completely lost, and the rate of radionuclides intake into the soil will be determined by

ТАБЛИЦА 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОНУКЛИДОВ, ЗАДАННЫЕ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАСЧЕТОВ
TABLE 1. PHYSICAL CHARACTERISTICS OF RADIONUCLIDES USED FOR CALCULATIONS

Нуклид Radionuclide	Период полураспада, годы Half-life, years	$Kd_{песок} (m^3/kg)$ $Kd_{sand} (m^3/kg)$		$Kd_{сугн} (m^3/kg)$ $Kd_{loam} (m^3/kg)$		Удельная активность в составе ТРО (Бк/кг) Specific activity in solid radwaste (Bq/kg)		Доля в ТРО Share in solid RW	УВ _{вода} (Бк/кг) IL_{water} (Bq/kg)
		мин. min.	макс. max.	мин. min.	макс. max.	мин. min.	макс. max.		
Тритий Tritium	12,3	-	-	-	-	1,85×10 ⁹	1,0×10 ¹⁰	0,1	3,3×10 ³
⁹⁰ Sr	29,1	0,004	0,027	0,008	0,02			0,2	5,0
¹³⁷ Cs	30,0	0,27	3,9	0,22	4,5			0,37	11
²²⁶ Ra	1,6×10 ³	0,49	0,5	0,9	9,0	3,7×10 ⁵	3,7×10 ⁷	0,37	0,5
²³² Th	1,4×10 ¹⁰	0,32	3,2	0,6	6,0			0,04	0,6
²³⁸ U	4,47×10 ⁹	0,0025	0,035	0,0014	0,01			0,57	3,1
²³⁸ Pu	87,7	0,055	0,55	0,7	7,6			0,71	0,6
²³⁹ Pu	2,41×10 ⁴	0,055	0,55	0,7	7,6	3,7×10 ⁴	3,7×10 ⁵	0,23	0,56
²⁴¹ Am	432	0,2	2,0	0,9	9,9			0,06	0,69

в грунт определяется интенсивностью атмосферных осадков для приповерхностного сооружения и потоком грунтовых вод третьего водоносного горизонта для хранилища скважинного типа. Для пород водоносных горизонтов и слабопроницаемых пород коэффициенты распределения соответственно были заданы осредненными значениями $Kd_{\text{песок}}$ и $Kd_{\text{сугл.}}$ из интервалов, приведенных в таблице 1.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАЗНЫХ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Согласно результатам, полученным с использованием одномерной модели, расстояние от хранилищ, на котором концентрация радионуклидов в поровой воде достигает значения уровня вмешательства УВ^{вода} (НРБ-99), для большинства радионуклидов составляет 1-8 м, за исключением слабосорбируемых трития и ^{238}U . Графики изменения концентрации этих радионуклидов в поровой воде третьего водоносного горизонта для хранилища скважинного типа, полученные по одномерной модели, приведены на рисунках 2 и 3.

Продвижение загрязнения, в котором содержание радиоизотопов превышает УВ^{вода}, за разумный период времени составляет несколько километров. Данный результат можно трактовать так: площадка хранилищ РАО создает опасность радиоактивного загрязнения систем водоснабжения ближайших населенных пунктов, и в связи с этим необходимо снизить допустимую удельную активность размещаемых здесь РАО или провести ряд дополнительных защитных мероприятий, гарантирующих в течение необходимого времени стабилизацию радионуклидов в пределах конструктивных границ хранилища.

Двухмерное моделирование было выполнено с помощью метода конечных элементов. Для иллюстрации результатов расчетов на рисунке 4 приведено распределение трития в грунте спустя 50 лет с начала его поступления из хранилища. Оказалось, что картина радиоактивного загрязнения грунта и горизонтального перемещения радионуклидов существенно отличается от результатов, полученных с использованием одномерной модели. После перво-

ТАБЛИЦА 2. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГРАНИЦЫ ДОСТИЖЕНИЯ УВВОДА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОДНО- И ДВУХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

TABLE 2. COMPARISON BETWEEN THE RESULTS OF CALCULATIONS TO DETERMINE THE ILWATER ZONE BOUNDARY USING SINGLE-DIMENSIONAL AND TWO-DIMENSIONAL MODELLING

Тритий Tritium				^{238}U			
Время, лет Time, years	Расстояние, м Distance, m		Одномерная 1-D	Время, лет Time, years	Расстояние, м Distance, m		Одномерная 1-D
	Одномерная модель 1-D model	Двухмерная модель 2-D model	Двухмерная 2-D		Одномерная модель 1-D model	Двухмерная модель 2-D model	Двухмерная 2-D
10	350	130	2,7	100	150	35	4,3
50	1600	190	8,4	500	420	90	4,7
100	3200	(75)	(42)	1000	820	150	5,5
				2000	1600	210	7,6
				4000	3100	330	9,4
				6000	4600	450	10,2

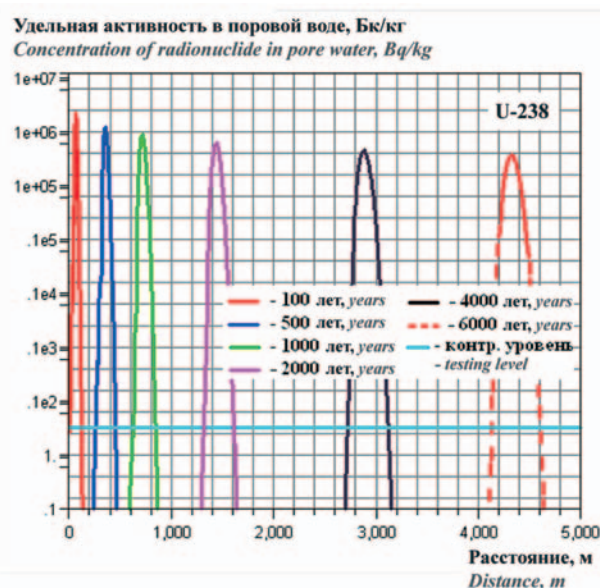


Рис. 3. Концентрация ^{238}U в поровой воде третьего водоносного горизонта

Fig. 3. Concentration of ^{238}U in pore water of the third water-bearing stratum

the intensity of atmospheric precipitation for near-surface repositories and by groundwater flow in the third water-bearing stratum for well-type repositories. For water-bearing strata and weakly permeable rocks, the distribution factors were determined by the averaged values of Kd_{sand} and Kd_{loam} , respectively, from the intervals taken from Table 1.

COMPARISON OF RESULTS OBTAINED FROM DIFFERENT MODELS

According to the single-dimension model calculation results, the distance from the repository at which the concentration of radionuclides in pore water reaches the interference level IL^{water} (NRB-99) for the majority of radionuclides is 1-8 m, with the exception of poorly adsorbed tritium and ^{238}U . Figures 2 and 3 demonstrate diagrams that show variation in the concentrations of these radionuclides in pore water of the third water-bearing stratum for well-type repositories, obtained using a single-dimensional model.

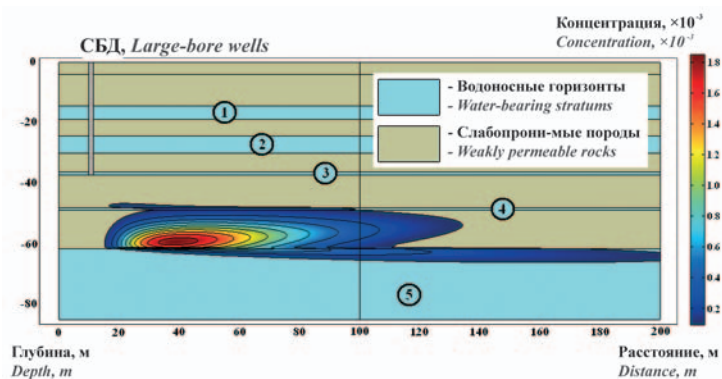


Рис. 4. Изолинии относительной концентрации трития, выходящего из хранилища скважинного типа, при распространении в грунте в течение 50 лет (приведена нумерация водоносных горизонтов)

Fig. 4. Isolines of relative concentration of tritium escaping from a well-type storage facility over 50 years in soil (numeration of the water-bearing strata is shown)

начального загрязнения третьего водоносного горизонта он довольно быстро очищается за счет вертикального переноса в нижележащие геологические слои. Из-за этого также происходит значительное замедление переноса радионуклидов в горизонтальном направлении. Так, максимальное удаление, на котором возможно превышение $УВ^{вода}$ для трития составляет около 200 м, а скорость перемещения ^{238}U снижается примерно в 5-10 раз по сравнению с результатами одномерной модели.

Результаты, полученные при двухмерном моделировании, являются более «щадящими» для условий хранения РАО (см. таблицу 2). Из них следует, что для обеспечения условий безопасности хранения РАО не требуется снижения содержания трития, а ограничения, накладываемые на содержание ^{238}U , могут быть ослаблены.

Анализ параметров расчетных моделей позволяет сделать вывод, что перенос радионуклидов из третьего водоносного горизонта вглубь вызван тем, что этот горизонт не обеспечивает отвода всех проникающих атмосферных осадков, и в такой ситуации одномерная модель не отражает реально происходящие процессы распространения радионуклидов в грунте.

Таким образом, повышение размерности расчетной модели позволяет существенно повысить точность обоснования безопасности хранилищ, подтвердить возможность увеличения допустимого количества размещаемых в них радиоактивных отходов, изучить влияние на общий показатель безопасности хранилища содержания в РАО отдельных радионуклидов, представляющих наибольшую угрозу для окружающей среды, и установить предельные значения их концентрации.

В связи с этим можно считать оправданными затраты на более тщательную подготовку исходных данных, основанную на изучении геолого-гидрогеологического строения площадки хранилища, физико-химических процессов внутри и на границах хранилища, состояния его конструкций и ряда дополнительных факторов, обусловленных особенностями конкретного сооружения.

Over a reasonable period of time, contamination in which the radioisotopic content is above IL^{water} will spread a few kilometres. This result may be interpreted as follows: the radwaste storage site may pose a danger of contamination to the water supply systems of the nearest human settlements; therefore, it would be advisable to lower the permissible specific activity level of radwaste placed in storage at the site, or implement additional protection measures to ensure that the radionuclides will remain stable inside the containment of the storage site during the prescribed time.

Two-dimensional modelling was performed using the finite elements analysis method. To illustrate the results that were obtained, figure 4 shows tritium distribution in the ground 50 years after the start of its intake from the repository. As it turned out, the pattern of radioactive contamination of soils and horizontal migration of radionuclides is quite different from that predicted by the single-dimensional model. After initial contamination of the third water-bearing stratum, that stratum is fairly quickly cleaned due to vertical migration into the underlying strata. The same phenomenon is also responsible for much slower horizontal migration of radioactivity. For instance, the maximum distance at which the IL^{water} might be exceeded for tritium was about 200 m, whereas the rate of travel of ^{238}U would be reduced by a factor of 5-10 versus the single-dimensional modelling results.

The results of two-dimensional modelling are far more favourable for radwaste storage (see Table 2). It follows from the results that safety assurance during radwaste storage does not demand for the tritium content to be reduced, whereas restriction on the ^{238}U content may be relaxed.

Analysis of model parameters leads to the conclusion that migration of radionuclides from the third water-bearing stratum into deeper geological formations is caused by the fact that this horizon does not assure export of all penetrating atmospheric precipitation, and in such circumstances a single-dimensional model would not accurately reflect the actual patterns of radionuclides migration in the soil.

Therefore, extending the models to more dimensions than one helps greatly improve the accuracy of safety justifications for storage sites, confirm possibility of expanding their design intake capacity, research the contributions that individual radionuclides (especially the ones that pose the biggest danger to the environment) make toward the overall safety factor of storage facilities, and set their limiting concentrations.

In this connection it would seem expedient to spend more on more careful definition of input data based on studies of geological and hydrogeological make-up of the storage site, physical and chemical processes inside the site and in its vicinity, status of structures and a number of other factors determined by the specific features of the specific site.