

НАДЕЖНОСТЬ ПРИРОДНЫХ БАРЬЕРОВ: ПРОГНОЗ, РЕАЛЬНОСТЬ, КОРРЕКТИРУЮЩИЕ МЕРОПРИЯТИЯ

RELIABILITY OF NATURAL BARRIERS: FORECAST, REALITY, CORRECTIVE MEASURES

В.В. МАРТЬЯНОВ, к.т.н.
(ГУП МосНПО «Радон»)



V.V. MARTIANOV,
Candidate of Technical Science
(SUE Radon Moscow)

■ В течение 50 лет ГУП МосНПО «Радон» успешно выполняет задачи по безопасному долговременному хранению радиоактивных отходов на своей площадке. Специалисты предприятия самостоятельно анализируют возникающие проблемы и находят эффективные технические решения, направленные на улучшение экологической обстановки как на самой площадке, так и на прилегающих территориях.

Участки для размещения приповерхностных хранилищ радиоактивных отходов (в то время – могильников РАО) выбирались в начале 1960-х годов. Специальных нормативных документов, регламентирующих выбор площадок, в это время еще не существовало.

Для предотвращения выхода радионуклидов в окружающую среду при размещении РАО использовались защитные свойства инженерных и геологических барьеров.

Выбор геологических барьеров производили, в первую очередь, исходя из принципа предотвращения попадания радионуклидов через зону аэрации в первый от поверхности водоносный горизонт за счет вертикального инфильтрационного потока. Согласно такому подходу, приповерхностные хранилища должны располагаться во вмещающих породах, представленных глинистыми минералами, которые обладают низкой водопроницаемостью и большой сорбционной емкостью. Породам зоны аэрации отводилась роль главного природного защитного барьера.

Кроме того, при выборе площадок для строительства приповерхностных хранилищ изначально учитывали гидрогеологические условия: хранилища должны были располагаться на незатопляемых и незаболоченных участках с низким уровнем грунтовых вод, с толщиной водоупорных (глинистых) осадочных пород не менее 20 м и не ближе 500 м от открытых водоемов.

ПРОГНОЗНЫЕ РАСЧЕТЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Описанный выше подход использовали при выборе площадок для строительства на территории Российской Федерации спецкомбинатов системы «Радон».

В качестве примера в таблице 1 приведены основные гидрогеологические характеристики (на начало 1960-х годов) нескольких площадок спецкомбинатов в Центральном, Поволжском и Южном регионах. Все они размещены в

■ Over the past 50 years, SUE Radon Moscow has been successfully providing safe long-term storage of radioactive waste on its site. Specialists of the company can independently analyse any occurring problems and identify the most effective technical solutions to improve the environmental situation both on the site itself and in the surrounding territories.

Locations for near-surface storage facilities for radioactive waste were selected in the early 1960s. At the time, there were no special regulations to govern the site selection process.

For prevention of discharge of radionuclides into the environment during radwaste storage, the protective capabilities of engineered and geological barriers were relied upon.

The choice of geological barriers was made primarily following the principle of prevention of radionuclides migration through the aeration zone into the first aquifer from the surface as a result of vertical infiltration flows. According to this approach, near-surface storage facilities must be located in bearing rocks consisting of clayey minerals, which have low permeability by water and high sorption capacity. Aeration zone rock was expected to play the role of the main natural protective barrier.

Apart from that, the choice of sites for the construction of near-surface waste storage facilities had to factor in the hydro-

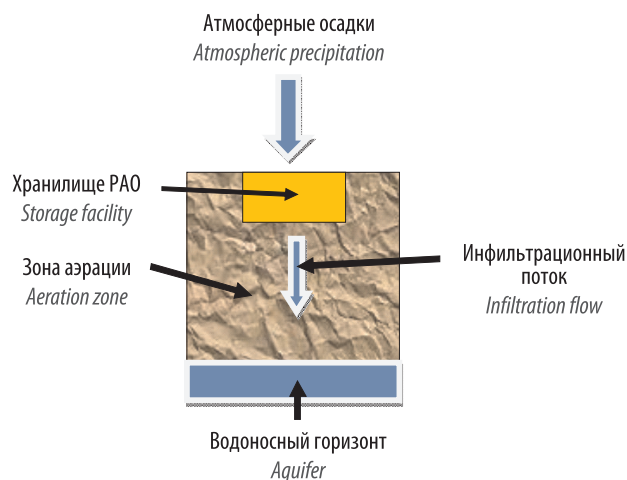


Рис. 1. Сценарий перемещения радионуклидов с инфильтрационным потоком
Fig. 1. Scenario of radionuclides transfer by infiltration flow

ТАБЛИЦА 1. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОД ЗОН АЭРАЦИИ ПЛОЩАДОК СК СИСТЕМЫ «РАДОН» (НЕНАРУШЕННЫЕ ПОРОДЫ)
TABLE 1. HYDROGEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF AERATION ZONE ROCKS ON THE FORMER RADON NETWORK SITES (UNDISTURBED ROCK)

	Московский <i>Moscow</i>	Самарский <i>Samara</i>	Саратовский <i>Saratov</i>	Волгоградский <i>Volgograd</i>	Ростовский <i>Rostov</i>
Гидрогеологические параметры <i>Hydrogeological parameters</i>					
Мощность пород зоны аэрации, м <i>Thickness of aeration zone rock, m</i>	46 (60)	9	18	30	10
Общая пористость пород зоны аэрации, n <i>Total porosity of aeration zone rock, n</i>	0,46	0,4	0,53	0,42	0,4
Средний уклон поверхности, l <i>Average surface slope, l</i>	0,02	0,04	0,07	0,06	0,08
Средний коэффициент:					
фильтрации, K_0 , м/сут <i>filtration, K_0, m/day</i>	0,012	0,001	0,69	0,00021	0,0084
вертикального влагопереноса, K , м/сут <i>vertical moisture transfer, K, m/day</i>	0,001	0,0006	0,044	0,00003	0,0002
водоотдачи, μ <i>water loss, μ</i>	0,05	0,02	0,15	0,004	0,01
распределения ^{137}Cs , K_d , мл/г <i>^{137}Cs distribution, K_d, ml/g</i>	340	3000	1100	1200	7650
замедления ^{137}Cs , R_t <i>^{137}Cs slowing-down, R_t</i>	1550	13200	3990	4490	35900
Объемная масса пород зоны аэрации, ρ , г/м ³ <i>Volume weight of aeration zone rock, ρ, kg/m³</i>	2100	1760	1920	1570	1880
Климатические параметры <i>Climatic parameters</i>					
Среднегодовое количество атмосферных осадков, мм/год <i>Average annual atmospheric precipitation, mm/year</i>	650	720	350	478	480
Среднегодовое испарение, мм/год <i>Average annual evaporation, mm/year</i>	500	700	800	900	900
Глубина промерзания, м <i>Depth of freezing, m</i>	1,2 – 1,6	0,9	0,4 – 0,6	1,1	0,39 – 0,65

глинистых отложениях (тяжелые супеси и суглинки четвертичного возраста), хотя находятся в разных природно-климатических условиях. На участке в Московском регионе ближайший водоносный горизонт находился на глубине 40-60 м от основания приповерхностных хранилищ радиоактивных отходов.

Из таблицы следует, что ненарушенные породы на выбранных площадках обладали, в основном, низкой водопроницаемостью (0,00021-0,69 м/сут) и высокими сорбционными характеристиками по отношению к основному дозообразующему радионуклиду ^{137}Cs ($K_d=340-7650$ мл/г). Значит, при прогнозе и моделировании «аварийного» сценария распространения радионуклидов (рис. 1), расстояние возможного перемещения нуклидов с инфильтрационным потоком будет в тысячи раз меньше ($R_t=1550-35900$) по сравнению с перемещением фронта жидкой фазы без сорбции.

Прогнозные расчеты показали, что за период 300 лет возможное вертикальное перемещение радионуклидов при заданных сорбционных параметрах не превысит нескольких метров. Причем остаточная величина удельной активности жидкой фазы будет меньше величины уровня вмешательства УВ, которая для ^{137}Cs составляет 11 Бк/л (таблица 2).

Следовательно, защита первого от поверхности водоносного горизонта – вполне выполнимая задача.

geological conditions from the very start: the storage facilities had to be located in flood-free and marsh-free areas with a low level of ground water, with the thickness of water-proof (clayey) sedimentation rock layers at least 20 m and not closer than 500 m to open pools of water.

PREDICTION CALCULATIONS OF ENVIRONMENTAL SAFETY

The approach described above was used during the selection of sites for the construction of facilities of the former Radon network in the Russian Federation.

As an example, Table 1 provides the main hydrogeological characteristics (as of the early 1960s) of several sites of the radon network in the Central European, Volga and Southern regions of Russia. All these sites are located within zones of clayey sedimentations (heavy Quaternary sandy clay and clay loams), although belonging to different climatic regions. On the site located in Moscow region, the nearest aquifer was 40-60 m deep from the foundations of the near-surface storage facilities for radioactive waste.

As evident from the table, undisturbed rock at the selected sites chiefly possessed low water permeability (0.00021-0.69 m/day) and high sorption capacities with respect to the key dose-contributing radionuclide ^{137}Cs ($K_d=340-7650$ ml/g). This means that for the purposes of forecasting and modelling of an 'accidental' scenario of radionuclides dissemination (fig. 1), the distance of potential nuclides transfer by infiltration

ТАБЛИЦА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗНЫХ РАСЧЕТОВ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА НА ПЛОЩАДКАХ СК СИСТЕМЫ «РАДОН»
TABLE 2. RESULTS OF PREDICTION CALCULATIONS OF THE FILTRATION FLOW CHARACTERISTICS ON THE RADON NETWORK SITES

	Московский <i>Moscow</i>	Самарский <i>Samara</i>	Саратовский <i>Saratov</i>	Волгоградский <i>Volgograd</i>	Ростовский <i>Rostov</i>
Начальная удельная активность жидкой фазы, Бк/л <i>Initial specific activity of liquid phase, Bq/l</i>	10000	10000	10000	10000	10000
Максимальная удельная активность жидкой фазы через 300 лет, Бк/л <i>Maximum specific activity of liquid phase after 300 years, Bq/l</i>	<1	<0,4	<0,1	10	<0,1
Время достижения уровня вмешательства для ^{137}Cs (УВ=11 Бк/л), лет <i>Time required for interference level to be reached for ^{137}Cs (interference level=11 Bq/l), years</i>	180	110	65	270	250

ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ ПЛОЩАДКИ ГУП МОСНПО «РАДОН»

По мере сооружения и эксплуатации хранилищ РАО антропогенное воздействие изменило свойства верхней части геологического барьера.

При строительстве и вводе в эксплуатацию хранилищ облик верхней части пород зоны аэрации начал интенсивно меняться. Так, морфология площадки МосНПО «Радон» претерпела существенные изменения, что было связано с прокладкой подъездных путей и коммуникаций, выемкой грунтов из котлованов с образованием насыпей и понижений, асфальтированием и бетонированием, сооружением дренажных канав и прудов-отстойников для отвода поверхностных вод, бурением опорных инженерно-геологических скважин под хранилища и другими техногенными воздействиями. При этом, разумеется, изменились и свойства пород верхней части зоны аэрации. В частности, сформированные насыпные разуплотненные грунты стали обладать меньшей объемной массой (на 5-20%) и повышенной водопроницаемостью – коэффициент фильтрации в приконтурной зоне некоторых хранилищ увеличился до нескольких метров в сутки.

В конечном итоге, техногенное воздействие на верхнюю часть пород зоны аэрации создало условия для формирования техногенного водоносного горизонта. При этом приконтурные зоны хранилищ начали выполнять функцию ловушек для поступающих в них поверхностных вод, а ненарушенные породы зоны аэрации – роль нижнего водоупора.

Формирование вод техногенного происхождения в значительной степени обусловлено природно-климатическими факторами, в частности, интенсивностью выпадения и испарения атмосферных осадков. Для площадки МосНПО «Радон» характерно доминирование выпадения атмосферных осадков над испарением. На рисунке 2 показано изменение морфологии площадки к 2000 году в результате воздействия указанных выше факторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ

Практически сразу же после размещения первой партии РАО в 1961 году на площадке МосНПО «Радон» была организована система контроля состояния окружающей среды и пути возможной миграции радионуклидов при хранении РАО. Результаты контроля показали, что в 1960-1980 годы некоторые хранилища практически полностью заполнялись водой, уровень которой менялся в зависимости от интенсивности выпадения атмосферных осадков в разные времена года, что свидетельствовало о нарушении целостности хранилищ. Отмечалось, что объемная актив-

flows would be thousands of times less ($R_t=1550-35900$) as compared to movement of the liquid phase front without any sorption.

Prediction calculations have shown that over a period of 300 years, potential vertical transfer of radionuclides with given sorption parameters will not exceed a few metres. The residual level of specific activity of the liquid phase will be below interference level, which for ^{137}Cs is 11 Bq/l (table 2).

Accordingly, it is quite feasible to ensure protection of the first aquifer from the surface.

CHANGES IN MORPHOLOGY OF THE RADON MOSCOW SITE

As the radwaste storage facilities were built and put into operation, man-caused impacts were causing the properties of the top level of the geological barrier to change.

As the storage facilities were constructed and commissioned, the upper part of the aeration zone rock experienced rapid changes. For example, the morphology of the Radon Moscow site underwent significant changes associated with the construction of access roads and supply pipelines, excavation of soil from pits and arrangement of depressions and embankments, asphalt paving and concreting, construction of drainage trenches and settling ponds for removal of surface water, drilling of engineering-geological key holes for the storage facilities, and a range of other human-caused impacts. That, of course, caused the properties of the upper aeration zone rock to change, too. In particular, the bulk decompacted soils came to have a lower volumetric weight (losing some 5-20%) and increased water permeability – the filtration coefficient in the border zone of some storage facilities increased to several metres a day.

Ultimately, man-caused impacts upon the upper layer of aeration zone rock created the conditions for the formation of a man-made aquifer. The border zones of some storage facilities started acting as traps for incoming surface waters, with the undisturbed aeration zone rock acting as the underlying waterproof layer.

Formation of man-originated waters was to a great extent attributable to the natural climatic factors, in particular, the intensity of rainfall and evaporation. The site of Radon Moscow is characterised by a situation whereby precipitation dominates over evaporation. Figure 2 illustrates the changes in site morphology by 2000 as a result of impacts of the factors described above.

RESULTS OF RADIONUCLIDES MIGRATION MONITORING

Practically immediately after the placement of the first batch of radwaste into storage in 1961, a monitoring sys-

ность воды в результате контакта с твердыми радиоактивными отходами достигала 100 кБк/л. Эффективный объем для хранения РАО в хранилищах не превышал 38-53% из-за наличия негабаритных форм отходов.¹

При изучении поведения радионуклидов во вмещающих породах было также установлено, что из-за наличия гидравлической связи между хранилищами и породами приконтурной зоны их удельная активность резко возрастает, достигая 2 МБк/кг на глубине 3-4,5 м. Однако низкие фильтрационные и высокие сорбционные характеристики вмещающих пород ограничивают выход радионуклидов за пределы участков размещения приповерхностных хранилищ РАО. Наличие таких природных барьеров позволило практически полностью задержать распространение радионуклидов.

На участках размещения приповерхностных хранилищ РАО возможны разные сценарии миграции радионуклидов.

На площадке ГУП МосНПО «Радон», помимо распространения радионуклидов в массиве пород, наблюдался также прямой выход жидкой фазы на поверхность (сценарий перелива или «Bath flooding» (рис. 3)).

Суть данного процесса заключается в том, что породы с нарушенной и неизменной структурой при избытке атмосферных осадков не могут принять весь объем влаги, и часть ее изливается на поверхность, формируя временный поверхностный сток. Такой сценарий наиболее вероятен в весенний период, когда осадки в виде снега, скапливающегося в течение трех-четырех зимних месяцев, за пять-десять дней переходят в жидкую фазу.

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ХРАНИЛИЩ

Таким образом, при нарушении целостности хранилищ РАО велика вероятность выхода радионуклидов на поверхность с жидкой фазой. Исходя из изначально поставленной задачи (защиты нижележащих водоносных горизонтов), вначале при эксплуатации площадки этому сценарию не уделялось особого внимания. Однако при проведении исследований 1960-1980 годов был выявлен прямой выход жидкой фазы на поверхность, и, начиная с 1990-х годов, были проведены различные технические мероприятия, позволившие предотвратить такой сценарий выхода радионуклидов в окружающую среду.

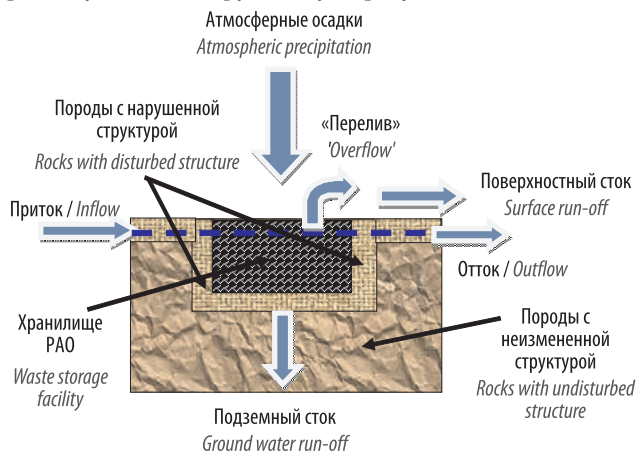


Рис. 3. Сценарий «Bath flooding»
Fig. 3. The 'Bath flooding' scenario

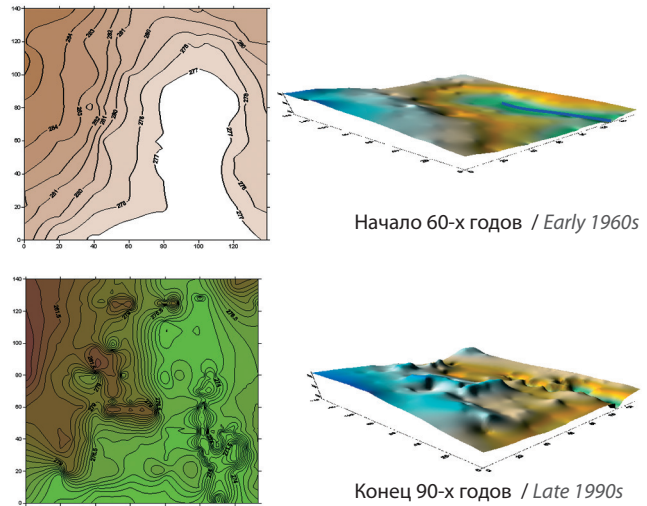


Рис. 2. Изменение морфологии площадки размещения РАО за 40 лет
Fig. 2. Changes in the morphology of radwaste storage site over 40 years

tem was set up on the Radon Moscow site to observe the environmental conditions and potential pathways of radionuclides migration during radwaste storage. Monitoring results have demonstrated that during the 1960s-1980s some of the storage facilities had been virtually completely flooded with water, the level of which fluctuated depending on the intensity of atmospheric precipitation in various seasons, providing evidence of the presence of leakages in the storage facilities. It was also noted that volumetric activity of water as a result of contact with solid radioactive waste was reaching 100 kBq/l. The effective radwaste accommodation capacity in the storage facilities did not exceed 38-53% of the nominal due to the presence of over-sized waste forms.¹

Studies of radionuclides behaviour in bearing rocks also revealed that due to the presence of a hydraulic link between the storage facilities and border zone rocks, their specific activity levels tend to rise sharply, reaching 2 MBq/kg at 3-4.5 m deep. However, the low filtration and high sorption characteristics of the bearing rocks limit the discharge of radionuclides to outside of the sites that include the near-surface radwaste storage facilities. The presence of these natural barriers has helped practically completely stop the dissemination of radionuclides.

In areas where near-surface radwaste storage facilities are located, several different scenarios of radionuclide migration are possible.

On the site of SUE Radon Moscow, in addition to the dissemination of radionuclides in the rock mass, instances have been recorded of direct surfacing of the liquid phase (the 'overflow' scenario or 'Bath flooding' (fig. 3)).

The essence of the process is that under excessive atmospheric precipitation, rocks with disturbed and undisturbed structures cannot absorb the entire volume of moisture, and some of that volume would be ejected to the surface, forming a temporary surface run-off stream. This scenario is particularly likely to materialise in spring, when precipitation in the form of snow that had accumulated over three to four winter months

¹ Соболев И.А. Охрана окружающей среды при обезвреживании радиоактивных отходов / И.А. Соболев, И.П. Коренков, Л.М. Хомчик, Л.М. Проказова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 168 с.

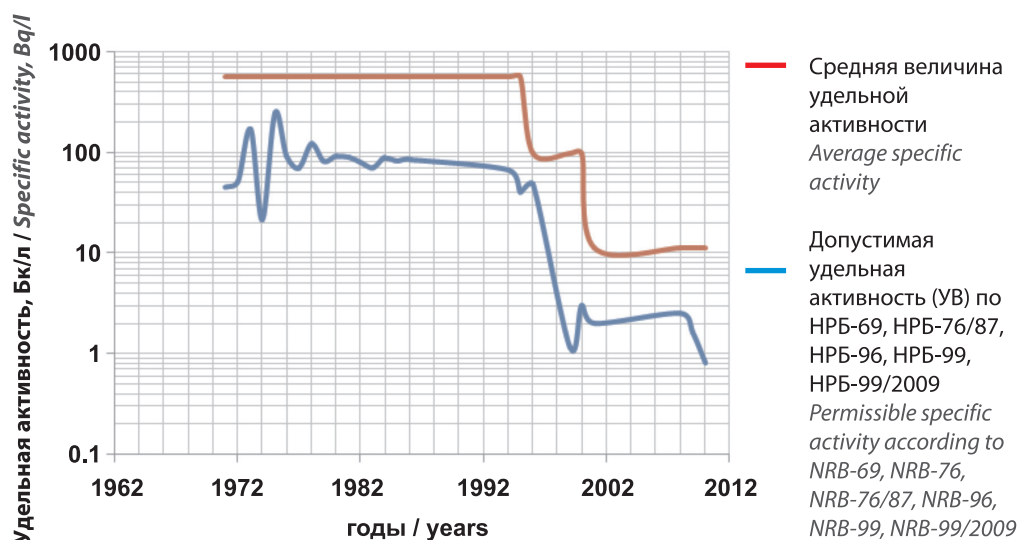


Рис. 4. Изменение удельной активности ^{137}Cs в поверхностном стоке в 1970-2010 годах
Fig. 4. Variation in specific ^{137}Cs activity in surface run-off during the 1970s to 2010s

Для этого, в частности, была создана технология повторного омоноличивания, позволившая восстановить начальные свойства инженерных барьеров хранилищ. Над хранилищами начали сооружать многофункциональные покрытия, снизившие негативное температурное воздействие, а также интенсивность проникновения атмосферных осадков внутрь сооружений. Была оптимизирована система дренажа, созданы пруды-отстойники и перехватывающие колодцы. Часть приконтурной зоны хранилищ оборудовали скважинами геомониторинга. Для контроля сброса поверхностных вод созданы гидрологические посты со створами наблюдательных скважин, позволяющие контролировать также и подземный сток. В результате проведения перечисленных и других технических мероприятий экологическая обстановка на площадке существенно изменилась к лучшему (рис. 4).

Из графика изменения величины удельной активности ^{137}Cs в поверхностных водах (синяя линия) следует, что проведенные исследования и последующие технические решения позволили снизить сброс активности из хранилищ РАО более, чем на два-три порядка. На красной линии показан график изменения величины уровней вмешательства для ^{137}Cs в соответствии с нормами радиационной безопасности, которые менялись за период 1969-2009 годов – НРБ-69, НРБ-76, НРБ-76/82, НРБ-96, НРБ-99, НРБ-99/2009. За 40 лет величина уровня вмешательства для ^{137}Cs изменилась с 555 Бк/кг до 11 Бк/кг, то есть почти в 50 раз.

Поскольку природные барьеры играют важнейшую роль при защите окружающей среды, при проектировании будущих площадок необходимо, основываясь на полученном научном и производственном опыте, учитывать возможное техногенное изменение верхней части пород зоны аэрации. Это поможет выбрать оптимальные технологии строительства хранилищ и определить реальный сценарий возможного выхода радионуклидов в окружающую среду, что позволит в дальнейшем сэкономить значительные финансовые средства: их не придется тратить на решение постоянно возникающих проблем, связанных с техногенным воздействием на природу.

would melt and convert into the liquid phase within a space of five to ten days.

IMPROVING THE SAFETY OF STORAGE FACILITIES

Therefore, whenever the integrity of radwaste storage facilities is breached, there is a high probability of radionuclides escaping to the surface carried by the liquid phase. On the basis of the initial objective (protection of the underlying aquifers), this scenario did not receive the attention it deserved during the early stages of operation. However, the surveys of the 1960s-1980s detected direct

instances of the liquid phase surfacing. Subsequently, starting from the 1990s, a number of technical measures were implemented, which helped preclude this scenario of radionuclides discharge into the environment.

In particular, that was achieved through the application of the newly-developed re-concreting technology, which helped restore the original properties of the engineered barriers in the storage facilities. Multi-functional covers over the storage facilities were built to reduce the negative effects of ambient temperature, as well as the intensity of atmospheric precipitation ingress inside the structures. The drainage system was optimised, settlement ponds and trap wells arranged. Some border zones of the storage facilities were fitted with geomonitoring wells. In order to monitor the discharges of surface waters, hydrological observation stations were built fitted with ground wells, which can also monitor the sub-surface flows. As a result of implementation of these and other technical measures, the environmental situation on the site has improved considerably (fig. 4).

As evidenced by the above chart of specific ^{137}Cs activity level in surface waters (blue line), the research and subsequent technical measures have helped reduce the discharges of radioactivity from the waste storage facility by more than two or three orders of magnitude. The red line illustrates the variation in interference level for ^{137}Cs in accordance with the radiation safety norms, which underwent a number of changes during the 1969-2009 period: NRB-69, NRB-76, NRB-76/82, NRB-96, NRB-99, NRB-99/2009. Over a 40-year period, the interference level for ^{137}Cs went down from 555 Bq/kg to 11 Bq/kg, that is, almost 50-fold.

As natural barriers play the vital role in protection of the environment, the designs of future storage sites should rely on scientific and production experience to take into account the potential man-induced changes in the upper layer of aeration zone rock. This will help make the best choices regarding the storage facilities construction technologies and model a realistic scenario for the potential discharge of radionuclides into the environment, helping eventually save significant financial resources, as they would not have to be spent on resolution of problems that would continually occur in connection with man-caused impacts upon nature.