УДК 624.131:551.3

Р.Э.Дашко, А.А.Еремеева

Санкт-Петербургский горный институт (технический университет)

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЗАХОРОНЕНИЯ НИЗКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В НИЖНЕКЕМБРИЙСКИХ СИНИХ ГЛИНАХ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Проведен анализ состава, строения, физических, физико-химических и механических свойств синих нижнекембрийских глин западной части Ленинградской области. Формация синих глин рассматривается как среда для захоронения радиоактивных отходов вблизи пос. Копорье. Комплексный анализ и оценка условий образования и преобразования синих глин под влиянием природных и техногенных факторов показал, что длительное радиоактивное облучение глинистых толщ приводит к росту дезинтегрированности глин, снижению сопротивления сдвигу и показателей деформационных свойств при активизации микробиологической деятельности, которые рассматриваются как негативный фактор. Изменение свойств глин способствует нарушению гидродинамических условий и повышает опасность загрязнения водоносного горизонта. Предложены девять критериев безопасности функционирования подземного хранилища на базе изучения инженерно-геологических и геоэкологических факторов. Длительная безопасность функционирования подземных хранилищ в глинистых толщах должна базироваться на мультибарьерной концепции защиты окружающей среды.

The analysis of composition, structure, physical and chemical, and mechanical properties of the Low Cambrian blue clays of the western part of the Leningrad region have been carried out. The above-mentioned blue clays are considered as a medium to bury radioactive wastes near the settlement of Koporye. The present report is aimed at presenting the comprehensive analysis and evaluation of the conditions of genesis and transformation of the clays when effected by natural or technogenic factors. The radioactive wastes storage in the clay strata followed by a long-term radiation exposure results in a noticeable increase in clays disintegration degree, a decrease of shear strength and deformation property, with the intensification

of the microbiota activity being a negative factor. A change in clay properties provokes the disturbance of hydrodynamic conditions and enhances a contamination hazard of the water-bearing horizon. Nine safety criteria for the underground storage exploitation based on engineering geological and geoenvironmental factors have been created. Long-term safety of underground repositories for low-active wastes in the clay strata must be based on a multi-barrier concept of the environmental protection.

С 1957 г. МАГАТЭ обращает особое внимание на проблему обращения с радиоактивными отходами (РАО). К концу 70-х гг. XX в. было выдвинуто предложение по подземному захоронению РАО, которое рассматривалось как один из наиболее безопасных способов длительного хранения большинства типов твердых РАО. В 1988 г. МАГАТЭ разработало нормы безопасности в области обращения с РАО, и в 1995 г. опубликовало «Принципы обращения с радиоактивными отходами» (серия изданий по безопасности № 111-F), где были определены базовые положения и концепции безопасного обращения с РАО [4].

В качестве сред, пригодных для сооружения подземных хранилищ РАО, могут быть использованы следующие геологические формации: каменная соль, плотные скальные породы, туфы, глинистые толщи, а также многолетнемерзлые породы. Возможности использования глинистых отложений как среды для подземного захоронения РАО рассматриваются в Бельгии, Франции, Италии, Швейцарии, России.

На территории Российской Федерации была создана и функционировала система 16 спецкомбинатов (СК) «Радон», занимающихся транспортировкой и захоронением РАО. В настоящее время два спецкомбината закрыты (Мурманский и Грозненский), а из 14 действующих СК «Радон» только шесть имеют разрешение Госатомнадзора России на заявленную деятельность: МосНПО «Радон», а также Ленинградский, Екатеринбургский, Иркутский, Новосибирский, Самарский СК «Радон».

Для Ленинградской области и Санкт-Петербурга весьма актуальной является проблема обращения с РАО, так как в настоящее время хранилища отходов заполнены более чем на 80 %. Следует отметить, что вышеупомянутый спецкомбинат принимает дополнительно отходы Кольского полуострова и Архангельской области.

Хранилище твердых РАО Ленинградского СК «Радон» состоит из 16 железобетонных зданий общей площадью около 10 тыс.м^2. Здания построены без заглубления на железобетонных плитах толщиной 65-80 см, уложенных прямо на поверхность насыпного грунта (песка). В семи зданиях оборудованы специальные камеры для хранения высокоактивных отходов (ВАО), в остальных размещены средне- и низкоактивные отходы (САО и НАО), часто просто упакованные в полиэтиленовые мешки. Суммарная активность отходов оценивается 9-12 ПБк. Вполне понятно, что при таком способе хранения гарантировать экологическую безопасность функционирования этого объекта не предоставляется возможным.

Из-за отсутствия хранилищ РАО не могут кардинально решаться вопросы демонтажа ядерных установок, выработавших свой ресурс на ЛАЭС, и удаления отработанного ядерного топлива.

За последние годы на территории России были проведены исследования по обоснованию перспективных площадей для планируемой долговременной изоляции РАО на территории Севера и Северо-Запада [3]. Одним из районов, выбранных специалистами Минатома РФ, Правительства Ленинградской области, Радиевого института, института ВНИПИЭТ для захоронения радиоактивных отходов, является пос. Копорье в Ленинградской области, который расположен в северной оконечности Ижорского плато на абсолютных отметках около 126 м. Подземное захоронение РАО должно производится в толще нижнекембрийских синих глин, мощность которых в районе Копорья около 116 м. Эти глины служат верхним водоупором для водоносного горизонта, приуроченного к нижнекембрийским песчаникам ломоносовской свиты.

Концепция создания хранилища в глинах обычно базируется на нескольких постулатах, которые выдвигаются рядом специалистов,

работающих в области проектирования и научного обоснования возможности захоронения РАО в геологических формациях [2, 5]:

• Глинистые отложения in situ представляют собой тонкопористую нетрещиноватую среду с низкой фильтрационной и диффузионной проницаемостью (коэффициент фильтрации $k = 10^{-5}$ м/сут, коэффициент молекулярной диффузии $D_м < 10^{-7}$ м^2/сут).

• Глины имеют высокую сорбционную способность по отношению к радионуклидам.

• Глинистые породы устойчивы при радиационном и температурном воздействиях.

Однако комплексные исследования нижнекембрийских синих глин, которые проводятся на кафедре гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского горного института в течение многих лет, показали, что эти породы имеют ряд специфических особенностей, которые необходимо учитывать при проектировании подземных хранилищ.

Нижнекембрийские глины следует рассматривать как зонально построенную по глубине трещиновато-блочную среду, интенсивность дезинтегрированности которой зависит от структурно-тектонических условий рассматриваемого региона, так как в узлах тектонических разломов резко возрастает степень трещиноватости толщи. Нетектоническая трещиноватость накладывается на тектоническую, создавая сложное мелко- и крупноблочное строение толщи глин с различной степенью раскрытия трещин. Размеры блоков с ростом глубины увеличиваются. На стенках блоков часто присутствуют соединения гидроксидов железа либо гипса, что свидетельствует о проницаемости толщи синих глин по трещинам.

По гранулометрическому составу эти глины классифицируются как глины алевритовые, реже тяжелые алевритовые. Тонкодисперсная часть нижнекембрийских синих глин обычно содержит высокощелочные гидрослюды, глауконит, хлорит, монтмориллонит. В ряде случаев встречен мельниковит (тонкодисперсный пирит осадочного происхождения), а также пирит в виде отдельных кристаллов, стяжений и др.

Как показали проведенные исследования, обменная способность синих глин не соответствует их гранулометрическому и минеральному составу. Эти отложения относятся к группе пород с малой емкостью обмена, несмотря на то, что они являются высокодисперсными породами.

В общем случае величина емкости поглощения синих глин по разрезу варьирует в пределах 10,3-12,5 мг-экв/100 г и весьма редко достигает 14 мг-экв/100 г. Подобный факт объясняется наличием в синих глинах органических соединений, которые образуют экранирующие пленки на тонкодисперсных зернах породы, снижающие ее сорбционную и обменную способность.

Воздействие ионизирующего излучения на свойства конструкционных материалов изучено довольно хорошо, в то время как данные о воздействии радиации на горные породы, в том числе глинистые, весьма отрывочны и малоинформативны.

В настоящее время объем исследований по влиянию излучения на породообразующие минералы невелик. Радиационная устойчивость основных минералов определяется совершенством их структуры и снижается по мере перехода от кварца к глинистым минералам в ряду кварц → микроклин → каолинит → гидрослюда → монтмориллонит [1]. При радиационном и тепловом воздействии наблюдаются изменение в валентных колебаниях связей Si – O и Al – O и дегидратация глинистых минералов с выделением конституционной и кристаллизационной воды из решетки минерала. В глинистых минералах синих глин содержание конституционной и кристаллизационной воды значительно, обезвоживание должно привести к разрушению кристаллической решетки.

При облучении глин важное значение имеет радиолиз поровой воды, в процессе которого происходит образование свободных радикалов и молекулярных компонентов, которые вызывают изменение кислотно-щелочных условий и окислительно-восстановительной обстановки в глинистой толще.

В синих глинах при поглощенных дозах до 10^2 -10^3 Гр в процессе радиолиза поровых вод органика и сульфиды активно окисляются с образованием сульфатов, гидрокарбонатов и карбонатов с постепенным изме-

нением pH до 5 и ниже. При этом происходит разрушение алюмосиликатного ядра глинистых минералов, выход из кристаллической решетки Al^{3+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Fe^{2+}, Fe^{3+} с последующим связыванием этих катионов анионами кислоты, и образование новых минералов, например гипса.

Эти выводы подтверждены данными изучения синих глин, которые претерпели длительное воздействие облучения в основании одного из шламохранилищ низкоактивных отходов (Эстония, г.Силламяэ). Нижнекембрийские глины подвергались непосредственному излучающему воздействию твердых и жидких отходов; фильтрация последних происходила по гравийному слою в нижней части оградительной дамбы. При визуальной оценке образцов синих глин, отобранных в основании дамбы хранилища в г.Силламяэ, отмечается интенсивная степень их дезинтегрированности.

Исследования облученных глин с помощью рентгено-структурного анализа показали уменьшение содержания глинистых минералов: фиксировалось присутствие лишь иллита и мусковита. Отмечался рост емкости поглощения в 2 раза за счет аморфизации глинистой составляющей. Кроме того, физические и водные свойства синих глин в основании шламохранилища радиоактивных отходов существенно изменились по сравнению с теми же характеристиками пород вне зон воздействия РАО: возросла плотность минеральной части, повысились значения числа пластичности и величины свободного набухания (табл.1). Длительное воздействие радиации отразилось и на параметрах прочности и деформационной способности глин. По сравнению с синими глинами из района Нарвской ГЭС сцепление снизилось в 2-7 раз, а модуль общей деформации более чем в 3 раза.

Таблица 1

Сравнительная оценка параметров физических и водных свойств синих глин в зоне хранилища НАО и вне зоны его влияния

Район исследования	Глубина от кровли синих глин, м	Физические и водные свойства							Величина свободного набухания, %
		Естественная влажность, %	Плотность, г/см^3	Плотность скелета, г/см^3	Плотность минеральной части, г/см^3	Пределы пластичности, %		Число пластичности	
						$W_т$	$W_р$		
Шламохранилище г.Силламяэ	5,0-10,0	19,1-23,4	2,04-2,09	1,56-1,76	2,76-2,88	59,2-69,4	26,2-32,3	31,5-40,7	14,0
Район р.Наровы	5,0-10,0	16,0-28,0	2,10-2,19	1,58-2,08	2,70-2,86	33,0-49,0	19,0-27,0	14,0-22,0	4,5
г.Никольское Ленинградской области	3,0-8,0	20,0-23,0	2,08-2,22	1,69-1,83	2,75-2,81	48,5-49,0	20,7-21,3	27,7-27,8	5,0

Особое внимание при создании и эксплуатации хранилищ НАО необходимо уделять интенсификации микробиологической деятельности во вмещающей толще пород.

Результаты исследований величины бактериальной массы с использованием биохимического метода Бредфорда, позволяющего получить содержание суммарного микробного белка (БМ) в синих глинах, что в глинах основания хвостохранилища НАО и вне его средние значения БМ по глубине меняются в 2,0-2,7 раза. Если сравнивать величину БМ синих глин в экологически чистых районах с данными исследований облученных глин, то такая разница оказывается более существенной и составляет порядок и более.

На основе проведенных исследований для повышения безопасности подземного захоронения РАО в глинистых формациях был разработан комплекс инженерно-геологических и геоэкологических критериев, учитывающий особенности строения толщи глин и их изменчивость под воздействием радиации и температурных эффектов (табл.2).

Таблица 2

Инженерно-геологические и геоэкологические критерии для повышения безопасности захоронения РАО в нижнекембрийских синих глинах

Критерии	Традиционная оценка, учитываемая авторами проектов захоронения	Реальные характеристики особенностей строения, состава и свойств глинистых пород (по результатам исследований Санкт-Петербургского горного института)
Степень дискретности глинистой толщи	Тонкопористая среда, отсутствие трещин	Трещиновато-блочная среда, интенсивность трещиноватости которой зависит от тектонического и нетектонического факторов
Фильтрационная проницаемость толщи	$K_ф < 10^{-4} \div 10^{-8}$ м/сут	Определяется интенсивностью трещиноватости, раскрытием трещин и гидродинамическими условиями, $K_ф > 10^{-3}$ м/сут
Диффузионная проницаемость	$D_м < 10^{-7}$ м^2/сут	С учетом микро- и макротрещиноватости $D_м > 10^{-5}$ м^2/сут
Сорбционная способность блоков	Высокая	Низкая за счет экранирования частиц органическими пленками (емкость поглощения не более 12 мг-экв/100 г)
Устойчивость пород при радиационном воздействии	Устойчивы	Наблюдается расшатывание кристаллической решетки, дегидратация глинистых минералов, радиолиз поровой воды
Устойчивость в агрессивных средах	Устойчивы	В агрессивных средах, в том числе кислых, образующихся в процессе радиолиза поровых вод, отмечается полное преобразование пород
Устойчивость при температурном воздействии	Устойчивы	Высокие температуры приводят к дополнительной деградации глин с последующим изменением их минерального состава и дополнительной трещиноватости
Устойчивость горных пород и защитных конструкций при активизации микробиологической деятельности	Не рассматривается	Активизация микробиологической деятельности при низкоактивном облучении приводит к накоплению бактериальной массы, снижению длительной прочности и деформационной способности, а также формирует агрессивность среды по отношению к использованным материалам; способствует деградации отходов и провоцирует биохимическое газообразование
Сохранение водоупорных свойств (защита подземных вод от загрязнения)	Комплекс техногенных воздействий не снижает водоупорных свойств глин	Повышение трещиноватости и деградация глинистых минералов под воздействием техногенных факторов приводят к снижению защитных свойств глин как водоупорной толщи

Данные табл.2 свидетельствуют, что при захоронении НАО в толще нижнекембрийских синих глин в районе пос.Копорье необходимо устройство защитных инженерных барьеров в подземных выработках с целью снижения воздействия радиации и температурных эффектов на глинистые породы и максимального сохранения водоупорных свойств глин во избежание миграции радионуклидов в нижележащий ломоносовский водоносный горизонт, который используется для водоснабжения. Необходимо также предусмотреть в процессе длительной эксплуатации хранилища создание систем локального и регионального комплексного мониторинга за возможным загрязнением подземных и поверхностных вод радионуклидами, изменением пород под воздействием радиации и температуры, эксхаляцией радионуклидов в подпочвенные слои, почву и атмосферу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обоснование условий локализации высокоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива в геологических формациях / О.А.Кедровский, И.Ю.Шищиц, Т.А.Гупало, Е.А.Леонов, М.К.Савушкина, И.М.Косарев // Атомная энергия. 1991. Т.70. Вып.5. С.294-298.

2. О возможности создания хранилища радиоактивных отходов в залежах глин в Ленинградской области / А.С.Кривохатский, В.С.Дубровин, Ю.М.Рогозин и др. // Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики / КНЦ РАН. Апатиты, 1995. С.78-86.

3. О перспективности площадок северо-западной части Мурманской области для размещения радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива / В.Н.Комлев, Н.И.Бичук, В.Г.Зайцев и др. // Геологические исследования и охрана недр: Тез. докл. конф. / ЗАО «Геоинформмарк». М., 2000.Вып.2.С.29-33.

4. Принципы обращения с радиоактивными отходами // Серия изданий по безопасности / Международное агентство по атомной энергетике. Вена, 1995. № 111. 47 с.

5. Технические предложения по созданию в Северо-Западном регионе хранилища радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива / Н.И.Кулагин, С.П.Щукин, В.Т.Сорокин и др. // Подземное пространство. 1998. № 4. С.43-45.