УДК 624.131.1:551.252

Р.Э.ДАШКО, *д-р геол.-минерал. наук, профессор, regda2002@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*)

R.E.DASHKO, *Dr. g.-m. Sci., Professor, regda2002@mail.ru*
Saint-Petersburg State Mining Institute (*Technical University*)

ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ БЕЗОПАСНОСТИ ЗАХОРОНЕНИЯ НИЗКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В НИЖНЕКЕМБРИЙСКИХ СИНИХ ГЛИНАХ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Отмечается, что выбранная территория для захоронения радиоактивных отходов в нижнекембрийских глинах вблизи пос.Копорье Ленинградской области размещается в зоне тектонического узла наиболее активных разломов. Нижнекембрийские глины рассматриваются как трещиновато-блочная толща, имеющая зональное строение по глубине. Длительное радиоактивное облучение синих глин привело к преобразованию их состава, физико-химических и физико-механических свойств, а также активизации микробной деятельности. По инженерно-геологическим и геоэкологическим признакам предложены девять критериев, позволяющих на примере синих глин комплексно оценивать безопасность и надежность захоронения отходов в глинистых формациях.

***Ключевые слова*:** захоронение, радиоактивные отходы, нижнекембрийские глины, трещиноватость, воздействие радиации, микроорганизмы, трансформация глин, инженерно-геологические критерии.

PRINCIPLES OF DEVELOPMENT OF GEOLOGICAL ENGINEERING AND GEOLOGICAL CRITERIA FOR SAFE BURIAL OF LOW RADIOACTIVE WASTES IN LOWER CAMBRIAN BLUE CLAYS IN THE LENINGRAD REGION

It is noticed that the chosen territory for nuclear-waste disposal in Lower Cambrian clay massif nearby Koporje of Leningrad region takes place in a tectonic zone. Lower Cambrian clays are considered as the block-fractured rock mass having a depth zone structure. The long radioactive irradiation of dark blue clays has led to transformation of their structure, physical-chemical and physical-mechanical properties, and also to activization of microbial activity. Nine criteria to the geoenvironmental and engineering geological characteristics allowing in a complex to estimate safety and reliability of a nuclear-waste disposal in clay formations on an example of dark blue clays are suggested.

***Key words*:** burial, radioactive wastes, Lower Cambrian clays, jointing, impact of radiation, microorganisms, clay trasformation, engineering geological criteria.

Введение. Основная задача при захоронении радиоактивных отходов (РАО) – обеспечение защиты биосферы от излучения на весь период, в течение которого отходы считаются потенциально опасными. Решение такой задачи может быть реализовано путем создания определенных способов подготовки отходов и их складирования, а также применения специальных инженерных барьеров в зависимости от структурно-тектонических, геолого-литологических, инженерно-геологических, геоэкологических условий, степени радиоактивности отходов и их тепловыделяющей способности.

Согласно рекомендациям МАГАТЭ и требованиям безопасности «Захоронение твердых и отвержденных радиоактивных отходов в геологических формациях», долговременные хранилища должны быть расположены в однородной толще горных пород, имеющих низкую проницаемость и высокую теплопроводность. В районе захоронения должны отсутствовать крупные зоны нарушений, рассланцованности и дробления, определяющие повышенную проницаемость. Такие массивы пород не должны подвергаться климатическим изменениям, проявлениям неотектоники, сейсмическим воздействиям, вулканизму, диапиризму во избежание уменьшения изоляционной способности горных пород, которые рассматриваются как естественные барьеры.

Общие и индивидуальные критерии безопасности захоронения следует рассматривать в зависимости от типа геологической формации, в которой предполагается захоронение РАО: кристаллические, многолетнемерзлые либо осадочные породы. Среди последних наибольшее внимание при решении проблемы захоронения уделяется соляным толщам и глинистым породам при их значительной мощности и выдержанности залегания по площади.

Накопление значительного количества РАО в Ленинградской области, прежде всего за счет эксплуатации Ленинградской АЭС, а также отходов других видов производств, связанных с использованием радиоактивных веществ, создает большие трудности их складирования. В настоящее время из-за отсутствия могильников РАО не могут быть кардинально решены вопросы демонтажа ядерных установок, выработавших свой ресурс на ЛАЭС, удаления отработанного ядерного топлива и проблемы РАО замещаемых мощностей.

Для подземного захоронения РАО в пределах Ленинградской области, по мнению ряда специалистов, могут быть использованы верхнекотлинские глины венда и нижнекембрийские синие глины. При этом предпочтение отдается более молодым отложениям – синим глинам – в силу их большей пластичности и высокого содержания глинистой фракции.

Обычно захоронение РАО в глинах рекомендуется проводить в глубоких буровых скважинах при мощности глинистой толщи более 400 м либо в специальных подземных сооружениях при ограниченной мощности глин (не менее 80 м).

В настоящее время основное внимание исследователей, связанных с проектированием хранилищ РАО в синих глинах, сосредоточено на районе Копорья, расположенном в 17 км от г.Сосновый Бор. Выбор этого участка диктуется близостью к Ленинградской АЭС и наличием железнодорожной ветки и автодорог, что снижает затраты на транспортировку радиоактивных отходов до места захоронения. Залегание синих глин вблизи дневной поверхности предполагает также значительную экономию за счет строительства относительно неглубоких шахтных стволов. Мощность синих глин в районе Копорья составляет 116 м.

Инженерно-геологические особенности нижнекембрийских глин. Согласно исследованиям ГГП «Севзапгеология», в рассматриваемом регионе прослеживается полоса разломов востоко-северо-восточного направления, имеющая наибольшую современную активность. Такая полоса протягивается от Нарвы вдоль побережья Финского залива, захватывая Копорье, в южное Приладожье и далее на территорию Архангельской области («Карта новейшей тектоники Ленинградской области масштаба 1:500000»; авторы: Б.Г.Дверницкий, В.А.Ядута, 1999). Процессы современной активизации четко

фиксируются аномальным содержанием радона в почвенном воздухе. Тектоническая активность полосы разломов проявляется фрагментарно. Среднее значение объемной активности радона на участке протяженностью 500 м может меняться от 13 до 27 Бк/дм^3 при фоновых значениях вне зон современной активизации 1-6 Бк/дм^3.

Район Копорья попадает в зону наложения двух линеаментов: имеющего меридиональное направление Лапландско-Нильского с кинематикой сжатия и сдвига и протягивающегося на северо-запад Нарвско-Аму-Дарьинского с деформациями раздвига.

Разработка проектов захоронения РАО в глинистых отложениях, в том числе и в нижнекембрийских образованиях Ленинградской области, базируется на предположении, что глинистая порода является нетрещиноватой, имеет низкую фильтрационную способность, малую диффузионную проницаемость и высокую сорбционную способность. Кроме того, в проектах декларируется, что глинистые породы устойчивы при воздействии радиационного облучения и высокой температуры в процессе радиоактивного распада элементов, а также инертны по отношению к агрессивным средам.

Выполненные нами исследования нижнекембрийских синих глин в предглинтовой зоне Санкт-Петербургского региона и Ленинградской области показали, что эти отложения имеют зональное строение по глубине. При этом каждая зона характеризуется интенсивностью трещиноватости различного генезиса: тектонической, гляциотектонической, литогенетической, выветривания, разуплотнения и др.

По результатам проведенных исследований, тектонические трещины образуют в синих глинах две системы – северо-западного и северо-восточного простирания, угол между которыми составляет практически 90°. Кроме того, отмечаются тектонические трещины субширотного и субмеридионального направления. Падение трещин – вертикальное либо крутопадающее под углом 70-80°.

Тектонические трещины в толще синих глин иногда выполнены порошкообразным пиритом. По волосяным трещинам встречаются пленки и щетки агрегатного и мелкокристаллического гипса, образование которых, по-видимому, связано со стадиями регрессивного литогенеза, когда эти глины выводились на поверхность, испытывали разгрузку и выветривание. В этом случае поверхностные растворы проникали вглубь толщи по уже существующим и вновь образующимся трещинам и давали начало новым соединениям.

Интенсивность тектонической трещиноватости в толще синих глин неодинакова. Наиболее сильно она проявляется в так называемых тектонических узлах.

В толще синих глин отчетливо прослеживается литогенетическая трещиноватость, причем мощность слоев между отдельными горизонтальными трещинами уменьшается от подошвы к кровле этих отложений. Соответственно тектоническая и литогенетическая трещиноватость формирует блочное строение толщи синих глин с закономерным увеличением размера блоков сверху вниз.

Нетектоническая трещиноватость в основном характерна для верхней зоны разреза синих глин, и ее формирование происходило на стадиях как прогрессивного, так и регрессивного литогенеза.

На стадиях регрессивного литогенеза в верхней зоне синих глин шло образование трещин упругого отпора и выветривания при знакопеременном воздействии температуры, кристаллизации новообразований и льда.

В ледниковый период образование трещин происходило за счет морозобойного растрескивания, морозного выветривания, а также гляциотектоники. Гляциотектонические трещины образуют три системы, одна из которых имеет простирание по направлению движения ледника, а две другие – перпендикулярно ей. Под действием веса ледника происходило формирование клиновидных трещин.

Гляциотектоническая трещиноватость в этих отложениях прослеживается до глубины 25-30 м, а трещины выветривания – 10-15 м. Глубина зоны разуплотнения синих глин с повышенными значениями естественной влажности и более низкими значениями

Таблица 1

Изменение блочности и показателей физических свойств синих глин по глубине (вне зон тектонических разломов)

Глубина от кровли синих глин, м	Размер блоков, м	Влажность, %	Плотность, г/см^3	Примечание
0,0-3,0	0,10-0,25	21,4-24	1,96-2,05	Число определений по каждому интервалу более 50
3,0-8,0	0,25-0,45	20,0-23,0	2,08-2,19	
8,0-15,0	0,40-0,60	16,0-21,0	2,10-2,2	
15,0-20,0	0,50-0,85	15,0-19,5	2,10-2,25	
20,0-40,0	0,60-1,20	12,0-15,0	2,12-2,25	
> 40	0,90-1,30			

плотности обычно не превышает 20-25 м (табл.1). В зонах тектонических разломов резко возрастает дезинтегрированность глин, уменьшается размер блоков, существенно увеличивается степень раскрытия трещин, наблюдается негативное изменение показателей физико-механических свойств.

Следовательно, толщу нижнекембрийских синих глин необходимо рассматривать как трещиновато-блочную среду, интенсивность трещиноватости которой зависит от геолого-структурных особенностей района, действия тектонических и нетектонических факторов. Соответственно, фильтрационная способность рассматриваемой толщи будет определяться степенью трещиноватости, раскрытием трещин и размерами блоков. По результатам полевых исследований, а также теоретических расчетов коэффициент фильтрации этих глин *in situ* превышает 10^{-3} м/сут. Кроме того, о высокой проницаемости глин в зонах тектонических разломов свидетельствуют данные о концентрации радона в подпочвенном горизонте синих глин, наличие которого связано с процессами на контакте осадочной толщи и кристаллического фундамента. Опыты по диффузионной проницаемости трещиноватых блоков дают возможность убедиться в том, что коэффициент молекулярной диффузии глин повышается до 10^{-4} м^2/сут. Кроме того, необходимо учитывать, что эффективная пористость нижнекембрийских синих глин составляет менее трети от их общей пористости, что предопределяет низкую емкость пород по отношению к радионуклидам. Несмотря на значительное содержание глинистой фракции, которое варьирует от 35 до более чем 60 %, для нижнекембрийских синих глин характерна невысокая сорбционная способность. Емкость поглощения лишь в отдельных точках возрастает до 14 мг-экв/100 г и обычно не превышает 12 мг-экв/100 г, что связано с экранированием тонкодисперсных частиц пленками органического вещества. Следует подчеркнуть, что потери при прокаливании образцов нижнекембрийских глин достигают 4 %, при этом содержание битумных соединений 1-1,5 %.

Специфика радиационного воздействия на глинистые породы. В настоящее время имеется небольшой объем исследований по влиянию излучения на породообразующие минералы. Обычно радиационная устойчивость основных минералов определяется совершенством их структуры и снижается по мере перехода от кварца к глинистым минералам: кварц → микроклин → → каолинит → гидрослюда → монтмориллонит. При радиационном, а также тепловом воздействии наблюдается изменение в валентных колебаниях связей Si – O и Al – O и дегидратация глинистых минералов с выделением конституционной и кристаллизационной воды из решетки минерала.

Основными глинистыми минералами нижнекембрийских отложений являются хлорит, гидромусковит, гидробиотит, глауконит, реже монтмориллонит, причем последний из названных минералов встречается в средней и нижней частях рассматриваемой толщи.

Содержание конституционной и кристаллизационной воды в этих минералах значительно, и, соответственно, обезвоживание приводит к полному разрушению кристалли-

ческой решетки. Развитие дефектов в структуре минералов под воздействием радиационного излучения начинает проявляться только после некоторого порогового значения облучения, составляющего, например, для алюмосиликатных минералов 10^6 Гр. По мере возрастания поглощенной дозы в интервале 10^6-10^8 Гр происходит аморфизация минералов, которая может привести к повышению сорбционной способности глин.

При облучении глинистых пород важное значение имеет радиолиз поровой воды. По современным представлениям, в данном процессе возникает большое количество составляющих, каждое из которых играет определенную роль при взаимодействии с глинистыми минералами. Суть процесса радиолиза порового раствора состоит в образовании свободных радикалов и молекулярных компонентов, которые вызывают изменение кислотно-щелочных условий и окислительно-восстановительной обстановки в глинистой толще.

При прохождении через воду радиоактивных излучений на их пути происходит ионизация молекул*:

$$\alpha, \beta, \gamma \rightarrow H_2O \rightarrow H_2O + e^-.$$

Вторичные электроны дополнительно ионизируют несколько молекул воды.

Процесс разложения воды под действием радиоактивных излучений можно записать в виде следующих восьми составляющих**

$$G(-H_2O) \rightarrow G_{\bar{e}_{aq}}\bar{e}_{aq} + G_H H + G_{OH}OH +$$

$$+ G_{HO_2}HO_2 + G_{H_2}H_2 + G_{H_2O_2}H_2O_2 +$$

$$+ G_{H^+}H^+ + G_{OH^-}OH^-,$$

где $G_{\bar{e}_{aq}}\bar{e}_{aq}$ – гидратированный электрон (полярон); $G_H H$ – атомарный водород; $G_{OH}OH$ и $G_{HO_2}HO_2$ – радикалы и т.д.

Обычно полярон образуется в результате первичной реакции

$$H_2O \rightarrow H_2O^+ + e^-.$$

Образование радикалов и других соединений (H_2, H_2O_2, H^+ и OH^-) происходит как результат вторичных реакций типа

$$\bar{e} + nH_2O \nearrow H_2O^-;$$
$$\searrow e^- \text{ (ïîëÿðîí);}$$

$$H_2O^- + H_2O \rightarrow \hat{I}\acute{I}\ \bar{}_{\tilde{a}\grave{e}\ddot{a}\eth} + H.$$

По химическим свойствам радикал OH является окислителем, а атом H – восстановителем. Атомарный водород хорошо известен как сильный восстановитель, причем его восстановительные свойства более резко проявляются с возрастанием pH среды.

Гидратированный электрон – самый сильный восстановитель из известных в природе. Он эффективно реагирует с другими продуктами радиолиза воды, восстанавливая в нейтральных и щелочных растворах металлы по реакции

$$\bar{e}_{aq} + Me^{n+} \rightarrow Me^{(n-1)+}.$$

При этом гидрокарбонаты переходят в карбонаты по реакции

$$\bar{e}_{aq} + \acute{I}\tilde{N}\hat{I}\ \bar{}_3 \rightarrow H + \tilde{N}\hat{I}\ ^{2-}_3.$$

Соответственно, компоненты глинистой породы, способные к окислению, вступают в реакцию с OH, а вещества, способные восстанавливаться, реагируют с атомами водорода.

Экспериментально установлено, что при поглощении водной средой 100 эВ энергии возникает следующее количество окисленных эквивалентов: по радикалу OH – 2,8, по атому H – 0,6, по $\bar{e}_{aq}$ – 2,3, по H_2O_2 – 0,8, что в сумме составляет 6,5 экв. При учете окислительного эквивалента гидроперекисного радикала HO_2, который равен 3, общий выход окислительных эквивалентов составит 9,5 экв.

Перекись водорода вследствие окисляющего действия легко растворяет металлы.

Как показали ранее проведенные исследования, наиболее активно физико-химические и химические превращения при радио-

---

* *Вовк И.Ф.* Радиолиз подземных вод и его геохимическая роль. М.: Недра, 1978. 98 с.

Vovk I.F. Radiolysis of groundwater and its geochemical role. M.: Nedra, 1978. 98 p.

** *Гуцало Л.К.* Радиолиз воды как источник свободного кислорода в подземной гидросфере // Геохимия. 1971. № 12. С.1475-1484.

Gutsalo L.K. Radiolysis of water as a source of free oxygen in the underground hydrosphere // Geochemistry. 1971. № 12, pp.1475-1484.

лизе поровой воды протекают в глинистой породе, содержащей органику и сульфиды. Нижнекембрийские синие глины в полной мере соответствуют этим условиям, поскольку содержат до 4 % органических веществ, а также пирит и мельниковит. Причем мельниковит в силу своей тонкодисперсности играет бо́льшую роль в химических преобразованиях синих глин, чем пирит. В синих глинах при поглощенных дозах до 10^3 Гр в процессе радиолиза поровых вод органика и сульфиды активно окисляются с образованием сульфатов, гидрокарбонатов и карбонатов с последующим снижением pH до 5 и ниже. При этом происходит разрушение алюмосиликатного ядра глинистых минералов с выходом из кристаллической решетки Al^{3+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Fe^{2+}, Fe^{3+} и последующим связыванием этих катионов анионом кислоты, образованием новых минералов, например гипса. Необходимо отметить, что увеличение дозы облучения до 10^6 Гр активизирует процесс разрушения алюмосиликатного ядра глинистых минералов, причем последовательность выхода ионов из кристаллической решетки следующая: Fe > Ca > Mg > Na > K > Si.

Действие кислот на глинистые породы проявляется в изменении их гранулометрического состава (уменьшение содержания глинистой фракции), снижении влажности, пластичности, плотности породы и возрастании микротрещиноватости блоков. Так, при образовании гипса возникает кристаллизационное давление до 4 МПа, что приводит к дополнительному трещинообразованию в глинах, а следовательно, к увеличению их проницаемости.

Кроме того, присутствие органики и сульфидов в синих глинах предопределяет интенсивное радиолитическое газообразование с выделением свободного кислорода и азота согласно следующим реакциям:

$$\alpha, \beta, \gamma \rightarrow 6H_2O \rightarrow 6OH^- + 6H^+;$$

$$C_6H_{12}O_6 + 6OH^- + 6H^+ \rightarrow$$

$$\rightarrow 3CO_2 + 3CH_4 + 6H_2O;$$

в присутствии кислорода

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O.$$

Радикалы H^+ могут рекомбинировать в H_2, а радикалы OH^- (или H_2O_2) расходоваться на окисление различных составляющих твердой фазы синих глин, например пирита и мельниковита:

$$S^{2-} + 4OH^- \rightarrow SO_4^{2-} + 2H_2.$$

Образование углекислого газа и водорода в присутствии органики возможно по следующей схеме:

$$C_6H_{12}O_6 + 2OH \rightarrow 2CO_2 + 2CO + 2CH_4 +$$

$$+ 2H_2O + H_2.$$

Одновременно наблюдается радиационно-химическое связывание газообразного азота согласно реакциям

$$N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3;$$

$$3N_2 + 7OH^- + 7H^- \rightarrow 2NO_2^- + 3NH_4^+ + H_2.$$

Таким образом, приведенные выше реакции показывают, что продукты радиолитического газообразования вносят свой вклад в снижение pH поровых растворов синих глин, а следовательно, в их химическое преобразование.

Результаты экспериментальных исследований облученных синих глин. Исследования изменения пород под воздействием радиационного облучения, отвечающего уровню влияния низкоактивных отходов, были выполнены в СПГГИ(ТУ) на синих глинах, которые служили основанием накопителям радиоактивных отходов более 50 лет. В процессе выполнения экспериментальных работ проводилось изучение: 1) активизации микробиологической деятельности в толще глин; 2) изменения состава и физико-механических свойств; 3) преобразования физико-химических особенностей пород.

Исследования микробиологической активности велись с использованием биохимического метода Бредфорда, позволяющего получить содержание суммарного микробного белка (МБ) и сравнить его со значениями того же показателя в необлученных породах.

Как следует из анализа табл.2, по мере удаления от источника облучения (низкоак-

тивные отходы – НАО) величина МБ снижается, в зоне повышенной радиоактивности (прудковая зона) наблюдается существенной увеличение МБ. Активность микробиоты была проверена на кафедре биофизики СПГТУ. Исследования показали, что концентрация микроорганизмов в 1 г породы варьирует от 10^4 до 10^6 клеток. Обнаруженные микроорганизмы в основном относятся к факультативным анаэробам, наблюдаются количественные и качественные отличия микрофлоры в зависимости от исследуемого образца, их высокая жизнеспособность отмечается во всех пробах. Определение микробного белка по методу Лоури – Хартри показало значительное превышение этого параметра (8064-16640 мкг/г), по сравнению с величиной МБ по Бредфорду (табл.2). Наиболее высокие содержания МБ, превышающие 16640 мкг/г, отмечались в образцах синих глин с самыми низкими показателями прочности (C = 0,019 МПа, $\varphi = 0°$). Такой рост микробиоты наблюдался при излучении с уровнем активности по α-излучению, не превышающим 10^5 Бк/кг, и β-излучению – менее 10^6 Бк/кг. В необлученных синих глинах (вне зон загрязнения) значение МБ достигало 35 мкг/г, а при их загрязнении в пределах разреза городских территорий изменялось от 73,3 до 123,7 мкг/г (по Бредфорду).

Минеральный состав глинистой составляющей в процессе облучения претерпел существенные изменения. В облученных глинах по результатам рентгеноструктурного анализа было зафиксировано присутствие иллита и мусковита, в то время как необлученные породы, как уже отмечалось выше, содержали пять глинистых минералов. Бльшая часть глинистых минералов синих глин претерпела аморфизацию, что подтверждается не только специально выполненными анализами, но и результатами изучения емкости поглощения (E) этих глин. Если в необлученных породах, как уже указывалось ранее, E составляет 12 мг-экв/100 г породы, то в облученных образцах значение этого показателя возросло почти в 2 раза и было равно 20-22 мг-экв/100 г породы. Специальные исследования установили, что сорбция радионуклидов синими глинами в основании накопителя отходов протекает неактивно.

Таблица 2

Бактериальная масса (суммарный микробный белок) по Бредфорду в синих глинах основания накопителя отходов

Номер скважины	Глубина, м	МБ, мкг/г	Примечание
7/1	2,8-3,0	289,0	Внешний контур дамбы накопителя под твердыми отходами
	3,2-3,4	246,1	
	9,6-9,8	175,0	
7/2	3,1-3,3	204,0	
	10,6-10,8	15,0	
13/1	3,2-3,4	217,0	
	10,9-11,1	188,8	
	14,4-14,6	104,1	
	18,8-19,0	105,0	
13/2	1,8-2,0	465,0	Вблизи прудковой зоны
	8,8-9,0	365,0	
	11,8-12,0	275,0	
47	5,3	270,8	
	7,2	251,4	
25	12,9	205,4	

В облученных глинах отмечается рост числа пластичности за счет повышения влажности на пределе текучести в 1,8 раза по сравнению с фоновыми значениями, снижение плотности глин в процессе их дезинтеграции составляет 25-30 %.

Если сравнить параметры сопротивления сдвигу (С и φ) и модуль общей деформации ε_0 облученных синих глин из основания хранилища отходов с их фоновыми значениями (в знаменателе), то можно наблюдать отчетливое ухудшение основных характеристик механических свойств:

ε_0, МПа	С, МПа	φ, град
2,5-13,7	0,019-0,075	0
10,0-28,0	0,075-0,14	0-4

Примечания: 1. Число определений превышает 30 при оценке показателей механических свойств в условиях трехосного сжатия. 2. Глубина от кровли синих глин составляет 5-10 м.

Вполне понятно, что все эти изменения, в том числе особенности строения глинистой толщи и изменение состава и свойств глин при радиационном воздействии, необ-

Таблица 3

Сравнительная оценка и характеристика инженерно-геологических и геоэкологических критериев захоронения РАО в нижнекембрийских глинах.

Критерий	Позитивные положения, выдвигаемые авторами проектов захоронения РАО	Характеристики особенностей строения, состава и свойств синих глин, а также возможности их преобразования по результатам исследований в СПГГИ(ТУ)
1. Степень дискретности глинистой толщи *in situ*	Отсутствие трещин. Основная модель – тонкопористая среда	Трещиновато-блочная среда, интенсивность трещиноватости зависит от геолого-структурного положения региона и современных тектонических движений, а также нетектонических факторов
2. Фильтрационная проницаемость толщи	Низкая $K_ф < (10^{-4}\text{-}10^{-8})$ м/сут	Определяется интенсивностью трещиноватости, раскрытием трещин и гидродинамическими условиями, $K_ф > 10^{-3}$ м/сут
3. Диффузионная проницаемость	Низкая, $D_м < 10^{-7}$ м^2/сут	Оценивается с учетом микро – и макротрещиноватости и составляет более 10^{-5} м^2/сут
4. Сорбционная способность блоков	Высокая	Низкая за счет экранирования частиц органическими пленками (емкость поглощения составляет менее 12 мг-экв/100 г, редко достигает 14 мг-экв/100 г)
5. Устойчивость пород при радиационном воздействии	Устойчивы	Происходит расшатывание кристаллической решетки, дегидратация глинистых минералов с выделением конституционной и кристаллизационной воды в свободной форме, а также снижение параметров механических свойств
6. Устойчивость в агрессивных средах	Устойчивы	Трансформация пород в агрессивных средах, в том числе кислых, образующихся в процессе радиолиза поровых вод
7. Устойчивость при температурном воздействии	Устойчивы	Высокие значения температуры приводят к дополнительной деградации глин с последующим изменением их минерального состава и развитием трещин усыхания и усадки
8. Устойчивость горных пород и защитных конструкций при активизации микробиологической деятельности	В российских проектах 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 разложению (деградации) отходов и провоцирует биохимическое газообразование
9. 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 водоупора

Примечание. $K_ф$ и $D_м$ – коэффициенты соответственно фильтрации и молекулярной диффузии глинистых пород.

ходимо учитывать при проектировании хранилищ радиоактивных отходов.

Заключение. При разработке проектов создания хранилищ РАО в нижнекембрийских синих глинах, которые выполнялись специалистами Радиевого института им. В.Г.Хлопина, а также ВНИПИЭТ, глинистые толщи рассматривались как квазиоднородные нетрещиноватые массивы, обладающие устойчивостью к техногенным воздействиям и высокой сорбционной способностью. Наши исследования дали возможность убедиться в том, что синие глины имеют специфические особенности, учет которых при проектировании будет способствовать повышению безопасности эксплуатации подземных хранилищ РАО в нижнекембрийских синих глинах (табл.3).

Как показывает сравнительный анализ критериев, приведенных в табл.3 и разра-

ботанных на базе теоретических, научных и экспериментальных исследований, а также опыта эксплуатации хранилищ НАО в зарубежных странах, создание хранилищ РАО в нижнекембрийских синих глинах должно производиться с обязательном устройством многослойных инженерных барьеров.

Кроме того, необходима организация комплексного мониторинга на региональном и локальном уровнях, позволяющего следить за процессами в толще синих глин и нижележащем водоносном горизонте во время строительства и длительной эксплуатации подземного хранилища РАО в районе Копорья.