

УДК 621.039.75

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ГЛУБИННЫХ ХРАНИЛИЩ-МОГИЛЬНИКОВ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ И ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Миляненко А.А.¹, студент гр. 10608124, II курс
Научный руководитель: Герасимова А.Г.¹, к.т.н., доцент
¹Белорусский национальный технический университет
Республика Беларусь, г. Минск

В данный момент по всему миру продолжает развиваться атомная энергетика. В некоторых странах строятся новые атомные электростанции (АЭС), модернизируются старые. Во многих государствах рассматривается возможность начало использования АЭС, в части из них заключают соглашения на сооружение первых станций. А часть стран, которые ранее полностью отказывались от атомной энергетики и закрывали все существующие станции кардинально меняют позиции и начинают заново рассматривать постройку новых и запуск выведенных из эксплуатации станций.

Главным недостатком атомной энергетики является получение в результате эксплуатации отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО). Данные отходы при современных технологиях нельзя полностью утилизировать и остатки после переработки необходимо складировать в специализированных хранилищах, постройка которых является сложной технической задачей. Для различных отходов надо сооружать хранилища-могильники с определенными характеристиками. Из-за этого для их строительства необходим крупный штат различных специалистов, которые в течении определенного промежутка времени смогут проработать все аспекты хранилища для поставленных задач. Постройка хранилищ и могильников ОЯТ и РАО в Республике Беларусь является актуальной задачей, так как в 2020 году была введена в строй Белорусская атомная электростанция (БелАЭС), которая производит определенное количество отходов и отработанного топлива, которые необходимо удалять после утилизации.

Создание приповерхностных хранилищ могильников не может решить поставленную задачу в полной мере, так как близкое расположение к поверхности, области деятельности человека и грунтовыми водами не позволяет захоранивать в подобных сооружениях ОЯТ, высокоактивные отходы (ВАО) и отходы, содержащие трансурановые радионуклиды [1]. Они подходят для постоянного или временного хранения средне- и низкоактивных отходов. Еще одним недостатком подобных хранилищ является сложность анализа климатических, природных и других факторов, которые влияют на герметичность и срок службы объекта. Из-за этого очень сложно просчитать вероятность аварийных ситуаций, связанных с изменением климата, уровня воды, свойств грунта и других

природных факторов, на долгосрочный период, составляющий от нескольких сотен лет до нескольких тысяч, необходимый для достаточного уменьшения активности отходов.

Для решения данной проблемы в Республике Беларусь была создана государственная предприятие «БелРАО». Главными задачами является изучение мирового опыта постройки подобных сооружений и их эксплуатации; проектирование, сооружение, эксплуатация хранилищ и систем сбора и переработки РАО; обучение специалистов необходимых для работы в данной отрасли и расширение международного сотрудничества в данной сфере [2].

В данный момент «БелРАО» занимается выбором площадки и проектированием первого в Беларуси специализированного хранилища для РАО. Рассматривается 3 площадки для размещения: в г. Островец, возле эксплуатирующейся БелАЭС, в Могилевской области или на территории Полесского радиационно-экологического заповедника в Гомельской области, пострадавшей от аварии на Чернобыльской АЭС [3]. В марте 2026 года были представлены первые варианты дизайн-проектов первого белорусского хранилища низко- и среднеактивных РАО, изображенные на рисунке 1.



Рисунок 1. — Пример дизайн-проекта первого хранилища РАО в Республике Беларусь [3]

Но постройка подобных сооружений не закрывает проблему захоронения ВАО и ОЯТ, которая через определенное количество времени появится в Республике Беларусь, так как временные хранилища БелАЭС со временем полностью заполнятся и потребуют освобождения. Этого не избежать, потому что срок эксплуатации станции минимум 60 лет с возможностью продления еще на 20 лет. Еще одной причиной постройки является заключение договора на постройку 3-его энергоблока БелАЭС, а также рассмотрение варианта постройки второй станции в Могилевской области.

Для окончательного захоронения РАО и ОЯТ нынешней и будущей белорусских АЭС, а также отходов промышленности, медицины и научного сектора деятельности человека необходимо рассмотреть возможность постройки глубинного хранилища-могильника на территории Республики Беларусь. Для этого необходимо изучить структуру грунтов и пород на оптимальной глубине строительства в различных регионах государства. Необходимость этого заключается в том, что хранилище должно быть устойчиво и герметично весь необходимый срок эксплуатации, который может составлять тысячи, десятки тысяч лет и даже сотни тысяч лет, в зависимости от радиоактивного состава отходов, которые в нем будут храниться.

В изучении площадок для постройки глубинных могильников заключается первый и один из важнейших этапов проектирования. В зависимости от состава, структуры, качества и других характеристик пород зависит глубина, на которой будет располагаться хранилище, возможная высота слоя и объем хранилища, пригодного для размещения РАО и ОЯТ.

Несмотря на относительно небольшую площадь Республики Беларусь, на ее территории располагается большое разнообразие пород, сформированных в разных периоды истории нашей планеты и при различных условиях. Формирование кристаллического фундамента, на котором располагается Республика Беларусь началось более 3,6 миллиардов лет назад [4]. Территория Республики Беларусь территориально делится на несколько основных зон, различающихся по структуре кристаллического фундамента и периода его формирования.

К ним относятся Белорусско-Прибалтийский гранулитовый пояс, Центрально-Белорусская зона, Витебский гранулитовый массив, Осницко-Микашевичский вулканоплутонический пояс, Брагинский гранулитовый массив, Центральноприпятский блок и Инчукалнская зона. Они различаются структурой и глубиной залегания различных пластов, представленных на рисунке 3.

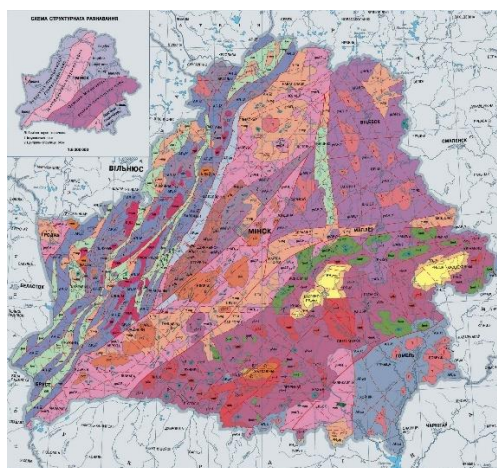


Рисунок 3. — Схема кристаллического фундамента Республики Беларусь [5]

На данный момент во всем мире признано, что наиболее безопасным и надежным способом захоронения РАО и ОЯТ является их глубинное захоронение в слабопроницаемых и стабильных геологических формациях. После проведения большого числа различных исследований, расчетов, создания специальных подземных лабораторий ученые всего мира пришли к выводу, что наиболее подходящими для постройки подобных могильников являются пласты гранитов, туфов, базальтов, осадочных и глинистых образований, а также купола из каменной соли. Для строительства необходимы прочные ($\sigma_{св} \geq 80$ МПа), слабодислоцированные, инертные и невосприимчивые к воздействию РАО и ОЯТ породы. Породы должны обладать геохимическими и механическими свойствами барьеров распространения радионуклидов [1]. В зависимости от материала, окружающего хранилище, будет выбираться оптимальная глубины и размеры самого хранилища.

Существует еще ряд важных факторов, которые необходимо учитывать при поиске площадки для постройки хранилища-могильника и его проектирования. Одним из них является гидрогеологические условия в районе предполагаемого размещения хранилища. Слои над и под хранилищем должны быть максимально водонепроницаемы, чтобы со временем вода не подошла вплотную к стенкам могильника и не начала разрушать искусственные защитные барьеры, что может привести к вымыванию радионуклидов из РАО и ОЯТ [1, 6]. Это приведет к заражению подземных вод, которое будет распространяться далеко за пределы области хранилища, что сделает невозможным использование ее в деятельности человека. По этой причине в документах, регламентирующих размещение и проекты глубинных хранилищ прописаны требования к гидрогеологическим условиям. Примером является пункт 53 документа НП-055-14 в котором говорится: «массив пород не должен содержать водоносных горизонтов, линз подземных вод или трещиноватых зон, по которым возможен водоприток в горные выработки и их затопление». Еще одно важный аспект, относящийся к гидрогеологическим свойствам уровня размещения могильника указан в пункте 54 НП-055-14: «отсутствуют обнаруженные и (или) вероятные каналы гидравлической связи предполагаемого уровня размещения ПЗРО с дневной поверхностью, выше- и нижележащими водоносными горизонтами, включая непригодные для водоснабжения» [7]. Строгость требований обусловлена опасностью отходов, которые могут серьезно загрязнить подземные воды, что может привести к загрязнению грунтовых вод и рек, из-за чего может пострадать население и окружающая среда. Но полностью непроницаемых формаций не существует (необходимый для строительства значение водообмена $K_v \leq 10^{-2} \div 10^{-6}$), поэтому надо брать рассчитываемую площадь объекта в несколько раз больше, чем площадь самого хранилища, а также предусматривать дренажные системы для отвода проникнувшей воды.

Еще одним фактором, который необходимо рассматривать при выборе площадке и проектировании хранилища-могильника является тепловыделение РАО и ОЯТ, которое может привести к разогреву окружающих пород и ухудшению их свойств. Высокоактивные отходы отличаются сильным тепловыделением, которое может продолжаться сотни лет, а также, с течением времени, усиливаться и потом спадать. Повышение температуры защитных барьеров сверх нормы может привести к их выходу из строя. Из-за повышения температуры в окружающих породах могут образовываться трещины и другие нарушения, которые будут еще сильнее ухудшать теплопроводность, из-за появления скоплений воды и воздуха, коэффициент теплопроводности которых низкий. Пример опасности роста температуры окружающих пород и структур является возможность взрывных разрушений газовой-жидкостных включений пород при температуре выше 200°C в соляных системах [1]. Из-за этого необходимо заранее, на этапе проектирования, определять тип и свойства отходов, которые будут захораниваться в хранилище-могильнике. В таблице 1 представлены коэффициенты теплопроводности основных пород, выбранных для постройки хранилищ.

Таблица 1. Теплопроводность пород, рекомендуемых для захоронения
 РАО [8]

Первичный осадок или порода	Коэффициент теплопроводности λ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$	Удельная теплоемкость c_p , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$
Гранит	1,1 – 3,9	0,2 – 1,5
Гнейс	0,94 – 4,9	0,8 – 1,2
Глина (сухая)	0,1 – 0,2	–
Глина (влажная)	0,4 – 3,0	0,8 – 3,6
Ангидрит	2,5 – 5,8	0,5 – 0,6
Базальт	0,4 – 3,5	0,5 – 2,1
Туф	1,3 – 4,0	0,8 – 1,4
Известняк (сухая)	0,7 – 2,5	–
Известняк (влажная)	0,9 – 4,4	0,4 – 1,7
Сланец	0,7 – 4,8	0,7 -1,6
Каменная соль	1,7 – 5,5	1,4 – 4,7

Из данной таблицы можно сделать вывод, что наиболее подходящими породами для организации глубинного хранилища-могильника являются ангидрит, каменная соль и гнейс, так как они лучше всего проводят тепло и смогут эффективнее охлаждать РАО и ОЯТ. В зависимости от типа пород необходимо рассчитывать расстояние между шахтами с РАО и ОЯТ и наполнение между ними, для стабильного и безопасного распределения теплоты. Таким образом необходимо при выборе площадки проводить различные геологические исследования для обнаружения возможных каверн, трещин, а также заранее определять теплопроводность пород, в которых запланирован постройка хранилища-могильника.

Последним важным фактором, который необходимо прорабатывать в первую очередь является сейсмическая и тектоническая активность в регионе постройки на продолжительный промежуток времени. Данный фактор является основополагающим, так как глубинные хранилища-могильники рассчитываются на безопасную эксплуатацию в течении от сотен лет до 1 миллиона лет, для чего необходима стабильность пород на протяжении этого времени, чтобы естественные и искусственные барьеры безопасности не были нарушены. Из-за этого перед утверждением площадки на площади 100 км² проводятся различные исследования тектонической структуры и активности, прорабатываются движения земной коры и изменения ее структуры в исследуемой местности на тысячи лет вперед. На данный момент в правилах проектирования подземных хранилищ-могильников уже прописан ряд случаев, в которых запрещается их строительство: в активных разломах, активных геодинамических зонах, в сейсмически активных зонах, где интенсивность максимально возможного землетрясения превышает 8 баллов по шкале МСК-64, а также на территории, подверженной воздействию действующих вулканов или проявления активного грязевого вулканизма [7].

Таким образом строительство глубинного хранилища-могильника является сложнейшей задачей, перед которой надо провести массу исследований, экспериментов и расчетов. Без всех предварительных этапов невозможно будет гарантировать необходимый срок службы могильника после консервации. Срок службы составляющий до 1 миллиона лет необходим для полного снижения активности РАО и ОЯТ либо до появления технологий полной переработки радиоактивных отходов, что позволит полностью замкнуть цикл атомной энергетики.

Структура кристаллического фундамента Республики Беларусь позволяет рассматривать различные варианты размещения глубинных хранилищ могильников. Преимуществом является оптимальная глубина залегания фундамента, составляющая 500-1500 метров, которой достаточно для сооружения объекта. Преимуществом территорий Республики Беларусь является очень низкая тектоническая и сейсмическая активность региона. Максимальная возможная интенсивность землетрясения на территории страны 7 баллов по шкале МСК-64. При этом реальные землетрясения на территории имели интенсивность до 4 баллов, что позволяет строить хранилища-могильники на многих площадках. При подборе площадок необходимо исследовать все разломы, которые находятся на территории Республики Беларусь, основных разломов 14 штук, к ним относятся Белостокский, Скидельский, Шучинский и т.д. Для максимальной безопасности требуется, чтобы предполагаемые площадки находились на достаточном расстоянии от разломов. Это необходимо для уменьшения вероятностей выхода радиоактивных веществ через длительные промежутки времени.

Белорусский кристаллический фундамент разнообразен на типы пород, из которых он состоит. На территории государства присутствуют как пласты каменных солей, гранита, гнейсов, так и глин, что позволяет рассматривать различные проекты хранилищ-могильников по количеству захораниваемых РАО и ОЯТ, а также по их общей и удельной активностям, так как разные породы имеют разную теплопроводность. Но по территории Республики Беларусь распределено большое количество подземных вод. Глубина залегания на большей части территории составляет до 400 метров, однако в некоторых структурах существуют глубинные водоносные слои, наполненные водой или рассолами. Например, к ним относятся Припятский и Оршанский гидрогеологические бассейны, в структуре которых располагаются водо- и рассолоносный комплекс витебских, пярнусских и наровских отложений эйфельского яруса (глубина до 3500 метров в Припятском бассейне), а также большое количество других водо- и рассолоносных отложений других периодов, максимальная глубина залегания которых 6200 метров в Припятском бассейне. На других территориях Республики Беларусь также располагается большое количество подобных отложений на глубинах от 500 до 1000 метров [9]. На рисунке 4 представлена карта основных водоносных горизонтов и комплексов Республики Беларусь.

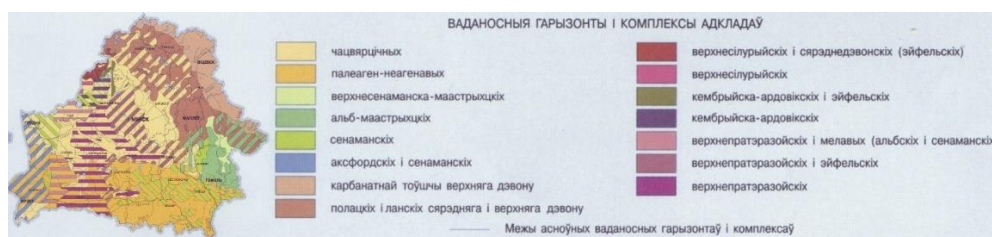


Рисунок 4 — Карта основных водоносных горизонтов и комплексов Республики Беларусь [9]

Таким образом при поиске площадке в Республике Беларусь необходимо тщательно изучать породы и грунты, чтобы находить водоносные слои и комплексы, наличие которых недопустимо. Это дополнительно усложняет задачу и уменьшает площади, подходящие для подобных проектов.

Рассмотрено несколько перспективных площадок для постройки хранилищ-могильников на территории Республики Беларусь. Одной из них является Оршанский прогиб, на территории которого средняя глубина залегания гранитного фундамента 1000-1750 метров с мощностью около 500 метров, что является оптимальным вариантом для размещения могильника РАО и ОЯТ со средним тепловыделением, так как коэффициент теплопроводности гранита средний для подходящих пород. Из-за расположения на территории Оршанского бассейна необходимо дополнительно проверить породы на водоносные слои и трещины. Тектоническая стабильность данного региона позволит гарантировать работу хранилища в течении долгого периода времени [10].

Еще одним перспективным вариантом размещения является Припятский прогиб. Глубина залегание его фундамента доходит до 6000 метров, но в отличие от Оршанского прогиба, здесь фундамент не гранитный, а состоит из каменных, калийных солей, сланцев, глин и других видов пород. Наличие куполов каменной соли, а также слоев из глин и сланцев позволяет рассмотреть различные варианты проекты хранилищ-могильников. Благодаря разнообразию пород возможно рассматривать различную глубину постройки, активность РАО и ОЯТ, вместимость хранилища и т.д. Но, как и для Оршанского прогиба, существует важный недостаток, который заключается в том, что Припятский прогиб на всей своей территории имеет большое количество водных и рассольных горизонтов, которые требуется отслеживать при выборе площадки, так как их наличие недопустимо [10]. Также необходимо включать во внимание при поиске площадки, что Припятский прогиб имеет большое количество разломов, геологических ступеней и других подземных формирований, которые могут не позволить сооружение глубинных хранилищ-могильников. В данной работе приведены только некоторые варианты размещения глубинных хранилищ-могильников на территории Республики Беларусь, но разнообразие структуры кристаллического фундамента позволяет изучать возможность постройки подобных объектов во многих частях государства.

Постройка глубинных хранилищ-могильников является важной задачей, которую необходимо решить в ближайшие десятилетия, так как БелАЭС и другие сектора деятельности человека будут продолжать производить РАО и ОЯТ,

которые после переработки надо захоранивать. Существует большой ряд требований, выполнение которых необходимо для долгой безопасной эксплуатации объектов. В Республике Беларусь большое количество мест, которые подходят для строительства глубинных хранилищ-могильников, после проведения тщательного анализа пород на необходимой глубине и наличие воды.

Список литературы:

1. Скачек М. А. Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС : учеб. пособие для вузов / М. А. Скачек. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2007. – 448 с. – ISBN 978-5-383-00057-1.
2. Направления деятельности. // БелРАО [Электронный ресурс]. – 2023-2026. – Режим доступа: <https://belrao.by/napravleniya-deyatelnosti/>. – Дата доступа: 23.03.2026.
3. В Беларуси показали, как будет выглядеть пункт захоронения радиоактивных отходов. // Newgrodnо.by [Электронный ресурс]. – 2017-2026. – Режим доступа <https://newgrodnо.by/novosti-belarusi/v-belarusi-pokazali-hranilishche-radioaktivnyh-othodov/>. – Дата доступа: 23.03.2026.
4. Кристаллический фундамент территории Беларуси. // Факультет географии и геоинформатики [Электронный ресурс]. – 2022-2026. – Режим доступа https://geo.bsu.by/images/pres/ingeol/geol/geol_fund.pdf. – Дата доступа: 23.03.2026.
5. Карта кристаллического фундамента Республики Беларусь. // Геологический институт Российской академии наук [Электронный ресурс]. – 2015-2026. – Режим доступа http://neotec.ginras.ru/neomaps/M020_Belarus_2002_Basement_Karta-kristallicheskogo-fundamenta-respubliki-belarus.html. – Дата доступа: 23.03.2026.
6. Озерский А. Ю. Оценка требований к геологической среде при выборе участка недр для захоронения радиоактивных отходов в глубокие геологические формации // Радиоактивные отходы. 2021. №2 (15). С. 90—98. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-90-98.
7. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности : утв. федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 22.08.14. – Минск : ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2014. – 42 с.
8. Добрынин В. М. Петрофизика (Физика горных пород) : учеб. для вузов / В. М. Добрынин, Б. Ю. Вендельштейн, Д. А. Кожевникова. — изд. 2-е. — Москва : ФГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. — 368 с. — ISBN 5-7246-0295-4.
9. Основные водоносные горизонты и комплексы в пределах территории Беларуси. // Helpiks [Электронный ресурс]. – 2014-2026. – Режим доступа <https://helpiks.org/5-104205.html>. – Дата доступа: 23.03.2026.
10. Махнач. А. А. Краткий очерк геологии Беларуси и смежных территорий / А. А. Махнач. – Минск : Беларуская навука, 2014. – 190 с. – ISBN 978-985-08-1711-2.