

ПОТЕНЦИАЛ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ХРАНИЛИЩ РАО В ГЛУБОКИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ

Б. Т. Кочкин

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 3 апреля 2024 г.

Выполнена оценка территории России для размещения пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) по технологии глубокого скважинного захоронения. Геологические критерии выбора перспективных районов определены на основе анализа безопасности таких ПЗРО на больших глубинах. Составлена обзорная схема территории России, перспективной для применения данной технологии.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, концепция скважинного захоронения, выбор места, геологические критерии.

Введение

Технология захоронения радиоактивных отходов (РАО) в сверхглубоких вертикальных скважинах — глубокое скважинное захоронение (ГСЗ, Deep Borehole Disposal) — рассматривается в основном как технология утилизации особых типов РАО [1]–[3]. Например, согласно [4] в РФ такими могли бы стать отходы с йодом-129, а в перспективе — отходы реакторов на быстрых нейтронах и гибридных установок, не исключаются и другие типы.

Концепция захоронения РАО в сверхглубоких скважинах на глубине 3–5 км рассматривается в качестве достойной альтернативы утилизации в шахтных хранилищах на глубине порядка 0,5 км благодаря естественной безопасности, которую обеспечивают геологические условия, господствующие на глубинах в несколько километров, и поддерживается экономическими и социально-политическими аргументами [5].

Благоприятные геологические условия на многокилометровых глубинах выявлены по результатам бурения скважин [6]. К ним относятся:

- низкая скорость движения и, соответственно, длительное время пребывания подземных вод, встречающихся в кристаллических породах фундамента континентов;
- геохимические восстановительные показатели, обычные для рассолов на больших глубинах, ограничивают растворимость основных радионуклидов, что замедляет их перенос;
- высокая соленость подземных вод и, как следствие, ограниченный потенциал перемещения этих рассолов вверх из-за плотностной стратификации;
- повышенная соленость подземных вод также препятствует переносу радионуклидов в коллоидной форме.

Легко заметить, что аргументы в пользу естественной безопасности технологии ГСЗ относятся к подземным водам, которые являются основным транспортным агентом переноса радионуклидов из ПЗРО любого типа в биосферу и по этой причине — одним из главных показателей безопасности. Напротив, к фактору, который рассматривается как главная потенциальная угроза для общей безопасности системы ГСЗ, относится тектоническая активность в районе размещения хранилища. С учетом естественной безопасности технологии ГСЗ можно сделать более легкий выбор перспективного места для скважины.

Инженерные барьеры в этой мультибарьерной технологии играют вспомогательную роль, вплоть до того, что допускается отсутствие особых требований к матрице отходов. Контейнеры предназначены для поддержания ее целостности только до момента герметизации скважины, которая должна предотвращать восходящий перенос радионуклидов только в течение ограниченного периода их тепловыделения, пока существует термоконвективная ячейка [7].

Оптимистичные представления о простоте обеспечения безопасности по технологии ГСЗ, изложенные в ранних работах, например в [8], столкнулись с разного рода проблемами [5], [6]:

- технические ограничения по диаметру скважины. Это, наверное, главная сложность для размещения уже упакованных РАО. Возможности российской промышленности в бурении глубоких скважин приведены в статье [9]. Так, диаметр Кольской скважины на глубинах 2–5 км составлял 245 мм;
- технология и материалы для герметизации скважины от вмещающей породы;
- методы характеристики зоны захоронения в условиях отсутствия непосредственного доступа персонала к вмещающей породе.

Эти проблемы предопределили выбор РАО, потенциально пригодных для технологии ГСЗ. В эту категорию вошли лишь отходы немногих типов, которые накапливаются в незначительных объемах [10]. Тем не менее такие проекты разрабатываются в разных странах, в том числе под эгидой МАГАТЭ [11].

Целью исследований, положенных в основу этой статьи, являлась оценка геологического потенциала территории России для размещения хранилищ РАО по технологии ГСЗ. Для этого ставилась задача разработать методологию такого анализа с учетом действующих нормативных документов и обосновать критерии выбора перспективных районов.

Разработка методологии выбора места для ГСЗ Нормативные документы, регулирующие скважинное захоронение

Методологической основой процедур выбора места для могильника служит системный подход к выявлению факторов, которые могут повлиять на принятие решения. Их совокупность определяется целями, которые должны быть достигнуты, среди них обычно называются:

- обеспечение долговременной безопасности населения;
- защищенность операционной системы хранилища (кратковременная безопасность);
- техническая возможность размещения хранилища;
- сохранение окружающей среды;
- общественно-политическая приемлемость;
- разумная стоимость.

Принципы выбора места и геологических условий для ПЗРО в неглубоких скважинах [12], [13] повторяют в общих чертах российские и международные рекомендации по выбору площадок для хранилища шахтного типа [14], [15]. Специальных нормативов, регулирующих захоронение в сверхглубоких скважинах, не существует. Некоторые отличия используемых подходов к выбору места предполагают технические особенности захоронения РАО в скважинах на глубине 3–5 км, а также естественные условия геологической среды на уровне размещения (табл. 1).

Таблица 1. Геологические и технические условия захоронения РАО в сверхглубоких скважинах

Условия	Вертикальная конструкция хранилища
Глубина размещения РАО	3–5 км
Геологическая обстановка	Консолидированный фундамент, сложенный кристаллическими породами магматического или метаморфического происхождения
Давление, температура, напряжение в целом	Высокие
Параметры и свойства пород и подземных вод	Зависят от глубины
Технические требования размещения отходов	Сравнительно простые при наличии скважины приемлемого диаметра
Сбор необходимой информации о геологических характеристиках на уровне размещения РАО (3–5 км)	Затруднен

Анализ безопасности системы ГСЗ и критерии выбора места

Критерии выбора геологической среды для могильников любых конструкций следуют из анализа безопасности системы захоронения. Рекомендации по поиску необходимой площадки

достаточно подробно разработаны в мире и являются результатом изучения тех геологических, гидрогеологических и геофизических аспектов, которые потенциально могут оказать влияние на безопасность ПЗРО, в том числе сооружаемого в глубоких скважинах. Эти факторы в общем случае именуют «features, events, processes» (FEPs) или «особенности, события и процессы» (ОСП) [16]. Применительно к выбору места для глубокой вертикальной скважины общие рекомендации обоснованы теми же принципами, что и при подготовке проекта ГСЗ в США [17].

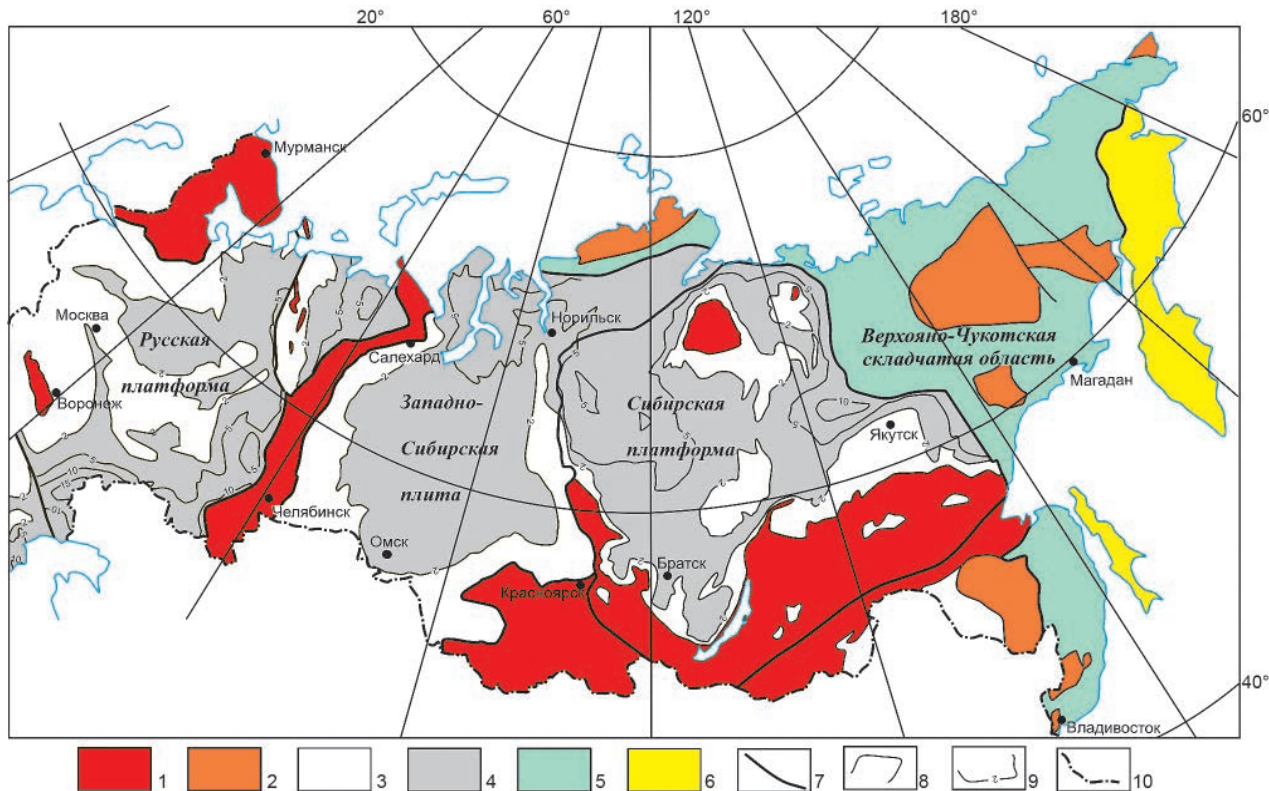
Доступность интервала размещения в кристаллическом фундаменте

Районы с обнажающимся кристаллическим фундаментом доступны для прямого детального геологического изучения пород и наблюдения структурных особенностей, таких как разломы, непосредственно на поверхности. Недостатком подобных участков с точки зрения безопасности является то, что крупные вертикальные трещины могут иметь сквозную связь глубинной зоны захоронения с поверхностью (биосферой), потенциально обеспечивая более легкие пути для миграции радионуклидов. Осадочный чехол может выполнять функцию

«экрана» над сквозными вертикальными разломами в кристаллическом фундаменте. Области его распространения с чередующимися слоями пород различного состава, особенно глин, которые перекрывают кристаллический фундамент, обеспечивают более высокую изоляцию глубинной зоны захоронения от поверхности. Недостатком таких районов является проблема картирования пород и структур фундамента.

В областях с осадочным чехлом мощностью более 2000 м интервал размещения окажется слишком глубоко, и придется строить более глубокие скважины. По этой причине перспективность таких районов снижается по технико-экономическим соображениям.

В процедуре выбора потенциально перспективных мест для ГСЗ глубина кристаллического фундамента до 2000 метров может служить критерием «доступности интервала размещения», верхняя граница которого должна быть ниже поверхности кристаллических пород по крайней мере на один километр. Прежде всего это районы выходов фундамента на поверхность древних платформ и в их обрамлении. На рис. 1 представлена мелкомасштабная карта глубин кристаллического фундамента для территории РФ.



1 – выходы фундамента на поверхности древних платформ; 2 – срединные массивы в мезозойских складчатых областях; 3 – области залегания фундамента древних платформ глубиной менее 2 км; 4 – области залегания фундамента древних платформ глубиной более 2 км; 5 – мезозойские складчатые области; 6 – кайнозойские складчатые области; 7 – границы основных тектонических структур; 8 – прочие геологические границы; 9 – изолинии глубины залегания фундамента, в тыс. м; 10 – государственная граница

Рис. 1. Глубина залегания кристаллического фундамента и основные тектонические структуры континентальной части РФ. Схема составлена по данным [18]–[22]

Состав пород фундамента и его структура

Согласно действующим нормативам [12], [14], [15] площадка для размещения глубинного ПЗРО должна выбираться среди пород, представляющих один из потенциально пригодных типов, иметь достаточный объем, залегать на приемлемой глубине, обладать благоприятными физико-механическими свойствами, однородной структурой и низкой трещиноватостью. Кристаллические породы магматического или метаморфического происхождения обладают необходимыми свойствами, способны обеспечить безопасность системы ГСЗ и разнообразны, но в целом их наличие может служить критерием потенциальной пригодности районов на древних щитах и в их обрамлении. Соответствие требованиям конкретной кристаллической породы зависит от состава и структуры. Например, гранитные батолиты обладают благоприятными и однородными механическими свойствами. В них тектонические напряжения распределены более равномерно, чем в слоистых метаморфических породах, на большой глубине которых может происходить отклонение бурового снаряда. Чрезмерная кривизна стенок скважины влияет на безопасность через правильность установки контейнеров, надежность герметизации скважины, затирки швов на стыке уплотнений и ее стенок. Неподходящий состав пород фундамента, например известняки, сланцы и т. п., — основа для дисквалификации таких районов.

Тектонические нарушения кристаллического фундамента в виде крупных древних (не активных ныне) разломов могут повлиять на технический ход буровых работ и безопасность системы. Эти особенности, как правило, плохо изучены в перекрытом кристаллическом фундаменте, но не являются дисквалифицирующей характеристикой потенциального региона или района, хотя увеличивают трудности с бурением и неопределенности с гидрогеологическими характеристиками.

Оценку территорий по критериям пригодности для технологии ГСЗ в отношении состава пород и сложности строения фундамента целесообразно выполнять начиная с районного уровня.

Тектоническая активность

Согласно российским нормативным документам [14] не допускается размещение глубоких геологических хранилищ в районах с активными движениями земной коры, высокой сейсмической и вулканической активностью, проявлением активных разломов. В таких местах существует повышенный риск разрушения инженерных барьеров ПЗРО. Перечисленные

выше процессы могут повлиять на надежность изоляции РАО в глубоких скважинах. По таким критериям, как высокая сейсмичность, наличие активных вулканов, повышенный тепловой поток, возможна дисквалификация определенных подземных структур, например зон контактов тектонических плит, вдоль которых развит одновременный вулканизм, и участков с повышенной сейсмичностью. Наиболее безопасны в этом отношении районы консолидированного фундамента древних платформ и щитов. Они же отличаются наименьшей современной сейсмичностью. Менее пригодны молодые платформы мезозойского и кайнозойского возраста с относительно нестабильным фундаментом и повышенными показателями сейсмической опасности [23].

Введение критерия отсутствия или ограниченного распространения активных разломов и вулканов для оценки районов подразумевает необходимость снижения вероятности разрушения конструкций ПЗРО в более отдаленном будущем.

Геотермальные тепловой поток и градиент являются релевантными руководящими принципами для выбора места, поскольку отражают:

- 1) температурные условия на глубине, которые влияют на условия бурения, операции по размещению, материалы инженерных барьеров и матрицу отходов;
- 2) возможность будущего вмешательства человека при бурении в поисках геотермальных ресурсов;
- 3) вертикальную составляющую в системе регионального потока подземных вод.

Выбор участков с учетом критерия «геотермальный тепловой поток» понизит вероятность вторжения человека, связанную с бурением в поисках геотермальной энергии в районах со значительным тепловым потоком. Более низкие вертикальные градиенты температуры могут помочь повысить изолирующую способность, уменьшить вертикальный поток и перенос. Наконец, температура на глубине может повлиять на надежность скважинного оборудования и контейнеров для отходов, поэтому районы пониженных температурных условий предпочтительнее. Наименьшим тепловым потоком характеризуются области Восточно-Европейской и Сибирской древних платформ, наибольшим — районы альпийской тектонической активности [24].

Тектоническая активность может выражаться в интенсивности горизонтальных напряжений, большой перепад которых плох из-за потенциальных трудностей при бурении, в процессе

установки обсадной колонны и неплотной герметизации скважины. Последнее способно обеспечить путь выхода радионуклидов, размещенных на глубине, через ненадежную систему уплотнения на контакте с окружающей породой. Меньший перепад горизонтальных напряжений лучше обеспечит изоляционную способность герметизации и более безопасные операционные условия. Его показатель на глубине размещения отходов может быть введен в число критериев выбора площадки. Данные о распределении горизонтального градиента напряжений могут быть доступны начиная с районного масштаба оценки.

Тектоническая активность, как правило, выражается в интенсивном воздымании территории (орогенез), а также в активном погружении (рифтогенез). Топографическая дифференциация территории, возникающая в результате геологических процессов, может быть использована в качестве критерия оценки. Эта характеристика важна потому, что поток подземных вод в большинстве гидродинамических систем в значительной степени определяется гипсометрической расчлененностью рельефа. Скорости потока, как правило, уменьшаются с увеличением глубины, так что безопасность захоронения в глубоких скважинах будет менее чувствительна к топографии. Тем не менее области платформ, характеризующиеся пологим рельефом, предпочтительнее горных стран и складчатых областей. Последние характеризуются большими перепадами высотных отметок рельефа и техническими трудностями осуществления проекта ГСЗ. Дисквалификация по этому критерию целесообразна для горных стран Крыма, Кавказа, юга Сибири, Колымы и Дальнего Востока [24].

Гидрогеологические условия

Гидрогеология является важным фактором безопасности ПЗРО. В состав ее критериев, согласно действующим документам [14], входят динамика потока, общая минерализация, температура и $Eh - pH$ показатели. В стабильных континентальных блоках земной коры типа древних платформ осадочные породы на глубинах более нескольких сотен метров обычно содержат высокоминерализованные рассолы, которые препятствуют восходящему вертикальному потоку из-за стратификации плотности. Они же обеспечивают восстановительные условия, благоприятные для иммобилизации большинства радионуклидов.

Как сказано выше об этих характеристиках, установленных для больших глубин, они являются одними из главных критериев выбора среды, которая обладает *естественной безопасностью*.

Существенное отклонение этих параметров от обычных для данных глубин значений в сторону тех, которые присущи приповерхностным условиям, послужит основой для негативной оценки пригодности или даже дисквалификации уже выбранного места после испытаний в готовой скважине.

Минерально-сырьевой потенциал

Согласно действующим документам не допускается размещение глубоких геологических хранилищ в районах интенсивной разработки полезных ископаемых. Угроза непреднамеренного вмешательства человека, связанная с бурением в зоне захоронения отходов, является составляющей общего риска. Ожидается, что, хотя она будет ниже для сверхглубоких скважин, чем для неглубоких ПЗРО, все же разумно избегать территорий с известным потенциалом природных ресурсов. Допустима их дисквалификация по соответствующему критерию при оценке в масштабе района.

Территории РФ, перспективные для захоронения РАО в глубоких вертикальных скважинах

Общий подход к выбору места

Наиболее распространенный и общий подход к выбору перспективных площадок для захоронения РАО, пригодный, в частности, для технологии ГСЗ, заключается в последовательном сокращении исходной территории от региона к району вплоть до локальной площадки (места). В процессе рассмотрения используются критерии потенциальной пригодности различных геологических условий, среди которых касаются геологии, гидрогеологии, сейсмической и магматической активности, геомеханические, геохимические и термодинамические свойства вмещающих пород. Они выводятся из результатов анализа безопасности. Хотя геологическая среда играет ведущую роль в обеспечении надежности могильников РАО, выбор площадки включает также оценку экологии, социально-экономических и политических факторов [25]–[27].

Оценка территории РФ

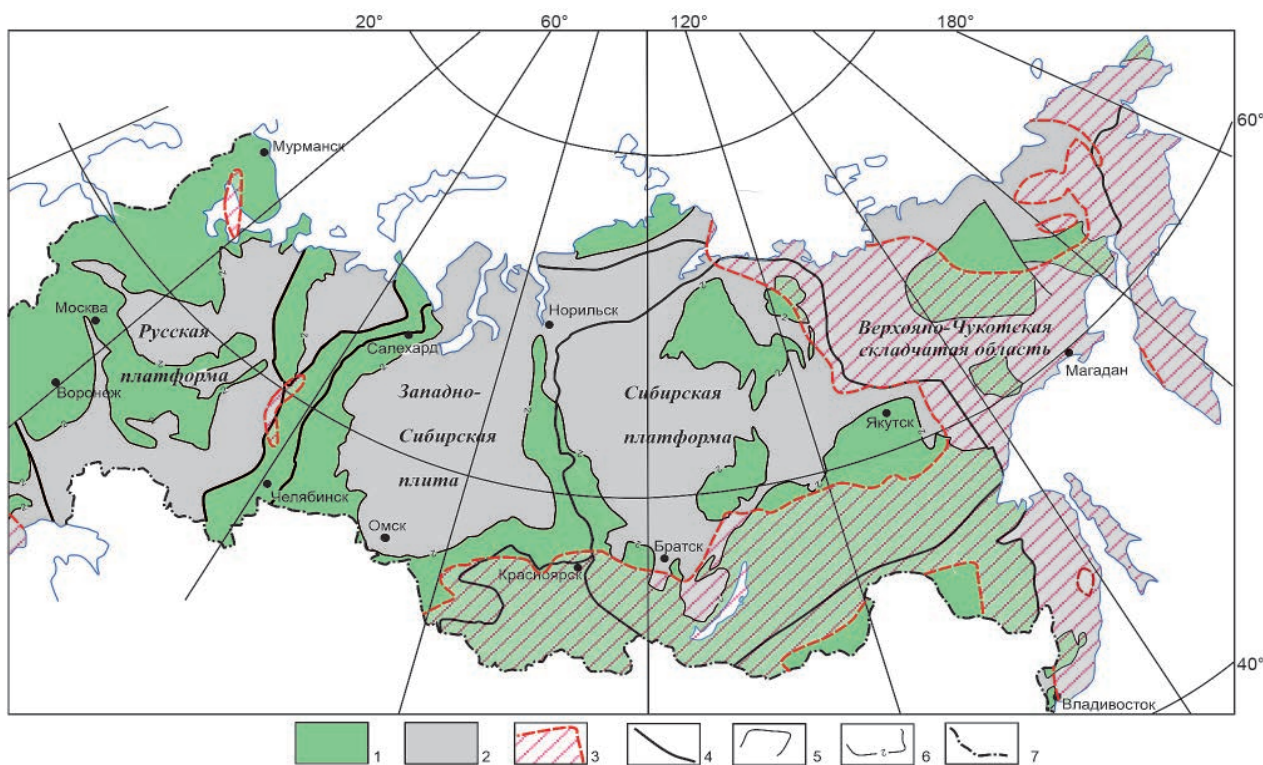
Обзор критериев пригодности геологической среды для ГСЗ показывает, что их следует использовать в разных масштабах для анализа заданного участка. Для самой общей оценки территории всей России подходят показатели доступности среды размещения (глубина кристаллического фундамента) и потенциальной

сейсмической опасности. Оба параметра допускают дисквалификацию районов, не подходящих с технической стороны или по соображениям безопасности. Другие критерии подходят для оценки в более крупных масштабах, когда появляется возможность получить необходимую информацию.

На рис. 1 районы, потенциально пригодные по доступности интервала размещения, показаны красным, белым и оранжевым цветами — это преимущественно щиты и окраинные области древних стабильных платформ. Напротив, их центральные области (серый цвет) перекрыты излишне мощным осадочным чехлом, исключающим на участках самого глубокого положения фундамента техническую доступность кристаллических пород на приемлемой для захоронения глубине. Территории, окрашенные в зеленый и желтый цвета, — молодые складчатые области. Их потенциальная пригодность, независимо от мощности осадочного чехла, резко понижена из-за слабой консолидации фундамента. По этой причине в их пределах повышена тектоническая активность земной коры с такими сопутствующими факторами, как высокий тепловой поток, активный орогенез, выраженный горными

территориями, и значительные градиенты горизонтальных напряжений. Достаточной консолидацией отличаются только реликты древних платформ (оранжевые области на рис. 1), т. н. срединные массивы (по старой тектонической терминологии) или микроконтиненты (по современной) коллизии модели тектоники плит.

Как было отмечено выше, сейсмическая опасность — основной показатель наличия угрозы для общей безопасности системы в перспективе десятков тысяч лет. Сейсмическое районирование территории России дано на соответствующих картах [23]. Так, ОСП-2016-D представляет собой наиболее консервативный вариант оценки потенциальной сейсмической опасности и рекомендована для размещения ядерно и радиационно опасных объектов (ЯРО), к которым следует отнести и ПЗРО по технологии ГСЗ. Эти районы охватывают молодые складчатые области в Крыму, на Кавказе, юге Сибири и территории Колымы и Дальнего Востока. Высокая сейсмичность сопряжена с активным орогенезом, современным вулканизмом и наличием активных разломов, то есть другими важными критериями оценки, по сумме которых область потенциально пригодных территорий еще более сужается (рис. 2).



1 — потенциально пригодные территории: щиты и плиты с мощностью осадков до 2 км в пределах древних платформ и срединные массивы в молодых складчатых областях; 2 — мало пригодные территории: плиты с осадочным чехлом более 2 км и молодые складчатые области; 3 — территории, пригодность которых дополнительно ограничена сейсмической опасностью более 8 баллов и горным рельефом; 4 — границы основных тектонических структур; 5 — прочие геологические границы; 6 — изопакиты 2 км осадочного чехла; 7 — государственная граница

Рис. 2. Районирование перспективности территории РФ для захоронения РАО по технологии ГСЗ

Действующим нормативным документом РФ [14] запрещено захоронение РАО в районах с мощностью сейсмических сотрясений на поверхности более 8 баллов. Известно, что с глубиной наблюдается ослабление их интенсивности относительно движения грунта на поверхности. Теоретическое объяснение феномена ослабления толчков (снижения ускорения) с глубиной связано с отличиями в движении сейсмических волн в плотных породах на глубине и в низкоскоростных слоях трещиноватых пород или неуплотненных отложений вблизи поверхности [28]. Уже на глубинах более 400 м разница составляет 2–3 балла от сотрясений на поверхности [29]. На глубинах 3–5 км следует ожидать еще более значительного эффекта. По этой причине на итоговой карте (рис. 2) области высокой сейсмичности (≥ 8 баллов) рассматриваются как территории ограниченной пригодности, но не исключаются полностью.

Заключение

Предлагаемая методология оценки территории России для поиска потенциальных районов утилизации особых типов РАО по технологии ГСЗ в основном повторяет способ выбора мест захоронения по шахтной технологии. Ее особенность заключается главным образом во введении технического критерия (мощность осадочного чехла не более 2 км) и в повышенном внимании к гидрогеологическим условиям на глубине потенциального размещения.

Учитывая ведущую роль геологической среды в обеспечении безопасности, критической оценке подлежат следующие геологические условия: глубина до кристаллического фундамента, состав его пород и сложность структуры, горизонтальное напряжение, тектоническое поднятие, рельеф и гидравлический градиент, геотермальный тепловой поток, четвертичные разломы и вулканизм, минерально-сырьевой потенциал. Пригодность гидрогеологических условий на глубине возможного размещения оценивается непосредственно в скважине на выбранной площадке. Процедура поиска места включает оценку экологии, социально-экономических и политических факторов.

На территории России перспективными районами в отношении технологии ГСЗ остаются главным образом окраинные территории древних платформ (зеленый цвет на рис. 2). Следует отметить, что они в значительной мере охватывают места размещения большинства объектов ядерного топливного цикла (ОЯТЦ).

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

Литература

1. Krall L., McCartin T., Macfarlane A. Siting Deep Boreholes for Disposal of Radioactive Waste: Consequences for Tight Coupling between Natural and Engineered Systems // *Environ. Sci. Technol.* 2020. Vol. 54. No. 2. Pp. 629–646. DOI: 10.1021/acs.est.9b03440.
2. Kochkin B., Malkovsky V., Yudinsev S., Petrov V., Ojovan M. Problems and perspectives of borehole disposal of radioactive waste // *Prog. Nucl. Energy.* 2021. Vol. 139. Pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103867.
3. Finsterle S., Muller R. A., Grimsich J., Bates E. A., Midgley J. Post-Closure Safety Analysis of Nuclear Waste Disposal in Deep Vertical Boreholes // *Energies.* 2021. Vol. 14. P. 6356. DOI: 10.3390/en14196356.
4. Кочкин Б. Т., Богатов С. А. Перспективы использования скважинной концепции для удаления РАО в России // *Радиоактивные отходы.* 2022. № 2 (19). С. 85–99. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-85-99.
5. Gibb F. G. F. An international perspective on deep borehole disposal. Presentation at the NWTRB Workshop. Washington DC, October, 2015.
6. Chur C. Experience in Deep Drilling in Crystalline Rocks. Presentation at the NWTRB Workshop. Washington DC, October, 2015.
7. Arnold B. W., Brady P. V., Bauer S. J., Pye S., Herrick C., Finger J. Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. SAND2011-6749 Unlimited Release. Printed October 2011. DOI: 10.2172/1029790.
8. Chapman N., Gibb F. G. F. A truly final waste management solution – Is very deep borehole disposal a realistic option for HLW or fissile material? // *Radwaste Solutions.* 2003. No. 10. Pp. 26–37.
9. Двойников М. В., Сидоркин Д. И., Юртаев С. Л., Грохотов Е. И., Ульянов Д. С. Бурение глубоких и сверхглубоких скважин с целью поиска и разведки новых месторождений полезных ископаемых // *Записки Горного института.* 2022. Т. 258. С. 945–955. DOI: 10.31897/PMI.2022.55.
10. Technical Evaluation of the U.S. Department of Energy Deep Borehole Disposal Research and Development Program. A Report to the U.S. Congress and the Secretary of Energy. January 2016. 72 p.
11. Deep Borehole Disposal Options. Programme of Coordinated Research Activities. CRP ID T22003. — URL: <https://www.iaea.org/services/coordinated-research-activities> (дата обращения: 11.03.2024).

12. Сквaziнные объекты захоронения радиоактивных отходов. Серия норм МАГАТЭ по безопасности № SSG-1. — Вена, МАГАТЭ, 2009.
13. Model Regulations for Borehole Disposal Facilities for Radioactive Waste. IAEA-TECDOC-1827. Vienna, IAEA, 2017. 51 p.
14. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности. НП-055-14 // Ядерная и радиационная безопасность. 2015. № 4 (78). С. 59—86.
15. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности. № SSR-5. — Вена, МАГАТЭ, 2011. 104 с.
16. NEA «International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: Version 3.0» // Radioactive Waste Management. NEA/RWM/R(2019) 1 July 2019. — URL: <http://www.oecd-nea.org/> (дата обращения: 11.03.2024).
17. Arnold B. W., Brady P., Altman S., Vaughn P., Nielson D., Lee J., Gibb F., Mariner P., Travis K., Halsey W., Beswick J., Tillman J. Deep Borehole Disposal Research: Demonstration Site Selection Guidelines, Borehole Seals Design, and RD&D Needs. Technical Review. Sandia National Laboratories, 2013. 221 p.
18. Геология и полезные ископаемые России. В шести томах. Т. 1. Запад России и Урал. — Санкт-Петербург, Изд-во ВСЕГЕИ, 2011. 584 с. — URL: <https://www.geokniga.org/books/6673> (дата обращения: 11.03.2024).
19. Геология и полезные ископаемые России. В шести томах. Т. 2. Западная Сибирь. — Санкт-Петербург, Изд-во ВСЕГЕИ, 2000. 477 с.
20. Геология и полезные ископаемые России. В шести томах. Т. 3. Восточная Сибирь — Санкт-Петербург, Изд-во ВСЕГЕИ, 2002. 396 с. — URL: <https://www.geokniga.org/books/6675> (дата обращения: 11.03.2024).
21. Геология и полезные ископаемые России. В шести томах. Т. 4. Восток России. — Санкт-Петербург, Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. 376 с.
22. Соколов С. Д. Очерк тектоники Северо-Востока Азии // Геотектоника. 2010. № 6. С. 60—78.
23. Карта сейсмического районирования территории Российской Федерации, ОСР-2016-Д. Масштаб 1:8000000 / Глав. ред.: В. И. Уломов, М. И. Богданов. — М. : ОИФЗ, 2016.
24. Национальный атлас России. Т. 2. Карта теплового потока. Масштаб 1:30000000. — URL: <https://xn--80aaaa1bhnlcc1c15c4ep.xn--p1ai/cd2/index.html> (дата обращения: 11.03.2024).
25. Siting of Geological Disposal Facilities. A Safety Guide. Safety series. No 111-G-4.1. Vienna, IAEA, 1994. 24 p.
26. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО / Под ред. И. И. Линге, Ю. Д. Полякова — М. : Комтехпринт, 2015. 208 с.
27. Кочкин Б. Т., Мальковский В. И., Юдинцев С. В. Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект). — М. : ИГЕМ РАН, 2017. 384 с.
28. Bäckblom G., Munier R. Effects of earthquakes on the deep repository for spent fuel in Sweden based on case studies and preliminary model results. SKB Technical Report TR-02-24. Stockholm, 2002. 115 p. — URL: skb.se/upload/publications/pdf/TR-02-24.pdf (дата обращения: 11.03.2024).
29. Кишкина С. Б., Татаринов В. Н., Бугаев Е. Г., Гупало В. С., Забродин С. М. Подземная исследовательская лаборатория: преодоление неопределенностей в оценке сейсмических условий участка «Енисейский» // Радиоактивные отходы. 2021. № 3 (16). С. 80—93. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-80-93.

Информация об авторе

Кочкин Борис Тимофеевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: btk@igem.ru.

Библиографическое описание статьи

Кочкин Б. Т. Потенциал территории России для размещения хранилищ РАО в глубоких вертикальных скважинах // Радиоактивные отходы. 2024. № 2 (27). С. 59—68. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-2-59-68.

SITING POTENTIAL OF THE RUSSIAN TERRITORY FOR RW STORAGE FACILITIES IN DEEP VERTICAL BOREHOLES

Kochkin B. T.

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

Article received on April 3, 2024

The paper evaluates the territory of Russia in terms of its siting potential for RW storage facilities designed based on the deep borehole disposal method. It proposes the geological criteria that can be used to select potential areas specified based on the safety assessment of borehole storage facilities constructed at great depths and presents a general layout of candidate territories in Russia.

Keywords: radioactive waste, borehole disposal concept, site selection, geological criteria.

Sponsorship

The work was carried out under a state assignment with IGEM RAS.

References

1. Krall L., McCartin T., Macfarlane A. Siting Deep Boreholes for Disposal of Radioactive Waste: Consequences for Tight Coupling between Natural and Engineered Systems. *Environ. Sci. Technol.*, 2020, vol. 54, no. 2, pp. 629–646. DOI: 10.1021/acs.est.9b03440.
2. Kochkin B., Malkovsky V., Yudinsev S., Petrov V., Ojovan M. Problems and perspectives of borehole disposal of radioactive waste. *Prog. Nucl. Energy*, 2021, vol. 139, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103867.
3. Finsterle S., Muller R. A., Grimsich J., Bates E. A., Midgley J. Post-Closure Safety Analysis of Nuclear Waste Disposal in Deep Vertical Boreholes. *Energies*, 2021, vol. 14, p. 6356. DOI: 10.3390/en14196356.
4. Kochkin B. T., Bogatov S. A. Perspektivy ispol'zovaniya skvazhinnoi kontseptsii dlya udaleniya RAO v Rossii [Borehole RW Disposal Concept and Prospects of its Implementation in Russia]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2022, no. 2 (19), pp. 85–99. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-85-99.
5. Gibb F. G. F. An international perspective on deep borehole disposal. Presentation at the NWTRB Workshop. Washington DC, October, 2015.
6. Chur C. Experience in Deep Drilling in Crystalline Rocks. Presentation at the NWTRB Workshop. Washington DC, October, 2015.
7. Arnold B. W., Brady P. V., Bauer S. J., Pye S., Herrick C., Finger J. Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. SAND2011-6749 Unlimited Release. Printed October 2011. DOI: 10.2172/1029790.
8. Chapman N., Gibb F. G. F. A truly final waste management solution – Is very deep borehole disposal a realistic option for HLW or fissile material? *Radwaste Solutions*, 2003, no. 10, pp. 26–37.
9. Dvoynikov M. V., Sidorkin D. I., Yurtaev S. L., Grokhotov E. I., Ulyanov D. S. Bureniye glubokikh i sverkhglubokikh skvazhin s tsel'yu poiska i razvedki novykh mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh [Drilling deep and ultra-deep wells for Prospecting and Exploration of New Raw Mineral Fields]. *Zapiski Gornogo instituta — Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 258, pp. 945–955. DOI: 10.31897/PMI.2022.55.
10. *Technical Evaluation of the U.S. Department of Energy Deep Borehole Disposal Research and Development Program*. A Report to the U.S. Congress and the Secretary of Energy. January 2016. 72 p.
11. Deep Borehole Disposal Options. Programme of Coordinated Research Activities. CRP ID T22003. — URL: <https://www.iaea.org/services/coordinated-research-activities> (accessed on: 11.03.2024).
12. *Borehole Disposal Facilities for Radioactive Waste*, IAEA Safety Standards Series No. SSG-1. Vienna, IAEA, 2009.
13. *Model Regulations for Borehole Disposal Facilities for Radioactive Waste*. IAEA-TECDOC-1827. Vienna, IAEA, 2017. 51 p.
14. Zakhroneniye radioaktivnykh otkhodov. Printsipy, kriterii i osnovnyye trebovaniya bezopasnosti. NP-055-14 [Radioactive waste disposal. Principles, criteria and basic safety requirements. NP-055-14]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and Radiation Safety*, 2015, no. 4 (78), pp. 59–86.
15. *Disposal of Radioactive Waste*, IAEA Safety Standards Series No. SSR-5. Vienna, IAEA, 2011. 104 p.
16. NEA “International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: Version 3.0”. *Radioactive Waste Management, NEA/RWM/R(2019) 1 July*

2019. — URL: <http://www.oecd-nea.org/> (accessed on: 11.03.2024).
17. Arnold B. W., Brady P., Altman S., Vaughn P., Nielson D., Lee J., Gibb F., Mariner P., Travis K., Halsey W., Beswick J., Tillman J. *Deep Borehole Disposal Research: Demonstration Site Selection Guidelines, Borehole Seals Design, and RD&D Needs*. Technical Review. Sandia National Laboratories, 2013. 221 p.
18. *Geologiya i poleznye iskopayemye Rossii. V 6 tomakh. T. 1. Zapad Rossii i Ural* [Geology and mineral resources of Russia. In 6 volumes. Vol. 1. West of Russia and the Urals]. Saint-Petersburg, VSEGEI Publishing House Publ., 2011. 584 p. — URL: <https://www.geokniga.org/books/6673> (accessed on: 11.03.2024).
19. *Geologiya i poleznye iskopayemye Rossii. V 6 tomakh. T. 2 Zapadnaya Sibir'* [Geology and mineral resources of Russia. In 6 volumes. Vol. 2 Western Siberia]. Saint-Petersburg, VSEGEI Publishing House Publ., 2000. 477 p.
20. *Geologiya i poleznye iskopayemye Rossii. V 6 tomakh. T. 3. Vostochnaya Sibir'* [Geology and mineral resources of Russia. In 6 volumes. Vol. 3. Eastern Siberia]. Saint-Petersburg, VSEGEI Publishing House Publ., 2002. 396 p. — URL: <https://www.geokniga.org/books/6675> (accessed on: 11.03.2024).
21. *Geologiya i poleznye iskopayemye Rossii. V 6 tomakh. T. 4. Vostok Rossii* [Geology and mineral resources of Russia. In 6 volumes. Vol. 4. East of Russia]. Saint-Petersburg, VSEGEI Publishing House Publ., 2008. 376 p.
22. Sokolov S. D. Oчерк тектоники Северо-востока Азии [Tectonics of Northeast Asia: An overview]. *Geotektonika — Geotectonics*, 2010, vol. 44, no. 6, pp. 493—509. DOI: 10.1134/S001685211006004X.
23. *Karta seysmicheskogo rayonirovaniya territorii Rossiyskoy Federatsii* [Seismic zoning map of the territory of the Russian Federation], OSR-2016-D. Scale: 1:8 000 000. Under gen. editorship of V. I. Ulov, M. I. Bogdanov. Moscow, OIFZ Publ., 2016.
24. *Natsional'nyy atlas Rossii. T. 2. Karta teplovogo potoka* [National Atlas of Russia. Vol. 2. Heat flow map]. Scale: 1:30 000 000. — URL: <https://xn--80aaaa1b-hnclcci1cl5c4ep.xn--p1ai/cd2/index.html> (accessed on: 11.03.2024).
25. Siting of Geological Disposal Facilities. A Safety Guide. Safety series. No 111-G-4.1. Vienna, IAEA, 1994. 24 p.
26. *Obzor zarubezhnykh praktik zakhoroneniya OYAT i RAO* [Overview of international spent nuclear fuel and radioactive waste disposal practices]. Edt. by I. I. Linge, Yu. D. Polyakov. Moscow, Komtekhpriint Publ., 2015. 208 p.
27. Kochkin B. T., Malkovskiy V. I., Yudinsev S. V. *Nauchnyye osnovy otsenki bezopasnosti geologicheskoy izolyatsii dolgozhivushchikh radioaktivnykh otkhodov (Yeniseyskiy proyekt)* [Scientific basis for the safety assessment of long-lived radioactive waste geological disposal (Yeniseiskiy project)]. Moscow, IREM RAN Publ., 2017. 384 p.
28. Bäckblom G., Munier R. Effects of earthquakes on the deep repository for spent fuel in Sweden based on case studies and preliminary model results. SKB Technical Report TR-02-24. Stockholm, 2002. 115 p. — URL: skb.se/upload/publications/pdf/TR-02-24.pdf (accessed on: 11.03.2024).
29. Kishkina S. B., Tatarinov V. N., Bugaev E. G., Gupalo V. S., Zabrodin S. M. Podzemnaya issledovatel'skaya laboratoriya: preodolenie neopredelennosti v otsenke seismicheskikh uslovii uchastka "Yeniseiskiy" [Underground Research Laboratory: Overcoming Uncertainties in the Assessment of Seismic Conditions for the Yeniseiskiy Site]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2021, no. 3 (16), pp. 80—93. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-80-93.

Information about the author

Kochkin Boris Timofeevich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Principal scientist, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetnyi lane, Moscow, 119017, Russia), e-mail: btk@igem.ru.

Bibliographic description

Kochkin B. T. Siting Potential of the Russian Territory for RW Storage Facilities in Deep Vertical Boreholes. *Radioactive Waste*, 2024, no. 2 (27), pp. 59—68. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-2-59-68. (In Russian).