



НАУКИ О ЗЕМЛЕ EARTH SCIENCE

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-36-47
УДК 69.051

Научная статья

Выбор площадок для строительства пунктов захоронения радиоактивных отходов

Н.С. Панкратов

Московская областная строительная центральная научно-исследовательская лаборатория,
Российская Федерация, 123592, Москва, ул. Кулакова, д. 20, стр. 1Л
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26

В.В. Белов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26

История статьи:

Поступила в редакцию: 7 мая 2020 г.
Доработана: 13 мая 2020 г.
Принята к публикации: 18 мая 2020 г.

Ключевые слова:

выбор площадки, радиоактивные отходы, РАО, приповерхностные пункты захоронения радиоактивных отходов, ПЗРО, геоинформационный анализ, ГИС-анализ, принципы ALARA, ранжирование площадок, обращение с отходами

В статье рассматриваются вопросы выбора площадок для строительства ядерных установок, пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) и других объектов использования атомной энергетики. Обзор современных подходов к выбору площадок для размещения приповерхностных ПЗРО показывает, что системные исследования в данной тематике представлены неполно и в основном направлены на решение задач инженерно-геологического характера для района размещения, а также выбора материалов барьеров инженерной защиты. В данной работе на примере ПЗРО выполнен обзор требований, содержащихся в нормативных документах РФ и Международного агентства по атомной энергетике в области выбора площадок. Предложены дополнения к методике по выбору площадок для строительства пунктов захоронения отходов низкой и средней активности, основанные на системном и геоинформационном (ГИС) анализе, принципах ALARA, методе взвешенных оценок критериев и их попарных сравнений. Многокритериальность задачи выбора площадок предложено описывать ГИС-анализом данных с нанесением соответствующих ограничивающих и предпочтительных условий непосредственно на карту местности, что продемонстрировано на примере выбора площадок для комплексов ПЗРО. Учет необходимых требований, предъявляемых на различных этапах жизненного цикла, и их значимость могут быть оценены методом взвешенных оценок и попарных сравнений с последующим их внесением в ГИС-анализ. Такой подход позволяет рациональным образом, с соблюдением всех необходимых нормативов проводить выбор подходящих вариантов размещения потенциальных площадок с учетом жизненного цикла объекта.

Введение

К настоящему времени в России накоплено свыше 500 млн м³ радиоактивных отходов (РАО),

более 90 % из них представлены короткоживущими отходами средней удельной активности (САО), а также коротко- и долгоживущими отходами с низкой удельной активностью (НАО) [1].

В структуре образования большую часть занимают отходы, связанные с обслуживанием, ремонтом, выводом из эксплуатации и ликвидацией АЭС, размещающиеся в пристанционных хранилищах, многие из которых на сегодняшний день уже заполнены [2].

Панкратов Николай Сергеевич, консультант испытательной лаборатории МособлстройЦНИЛ, магистр кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики НИУ МГСУ, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0075-6185>, pankratovnic@mail.ru

Белов Вячеслав Васильевич, доцент кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики НИУ МГСУ, кандидат технических наук, eLIBRARY SPIN-код: 6936-1160.

© Панкратов Н.С., Белов В.В., 2020

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Прогноз до 2025 года, выполненный ГК «Росатом», показывает существенное увеличение объема образования РАО в различных федеральных округах РФ, что обусловлено выводом из эксплуатации отработавших энергоблоков существующих АЭС. При этом захоронение планируется производить в приповерхностных пунктах захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) [1].

На данный момент в РФ функционирует только один такой пункт, расположенный в Свердловской области, и требуется строительство новых ПЗРО, поэтому выбор площадок для них является весьма актуальной задачей.

Анализ большинства существующих научных исследований, посвященных выбору площадок [3–6], показывает, что они преимущественно ориентированы на изучение инженерно-геологических условий, упуская часть важных критериев с учетом жизненного цикла объекта, таких как социальные, ресурсные, логистические, и ряд факторов безопасности.

В настоящий момент не существует единого общепринятого подхода. Зачастую решение о размещении ПЗРО принимается исходя из политических или чисто экономических соображений, без перспективного комплексного рассмотрения данного вопроса, что приводит к серьезным последствиям в будущем, наглядный тому пример – шахта АССЭ-II (Германия). Поэтому остро стоит необходимость в систематизации имеющихся

исследований с разработкой единой методики выбора площадок.

1. Цель статьи

На примере комплексов ПЗРО систематизировать подход к анализу данных при выборе площадок для размещения объектов с высоким уровнем радиоактивной опасности.

Разработать дополнение к существующим методикам выбора площадок для размещения комплексов приповерхностных пунктов захоронения радиоактивных отходов.

2. Результаты и обсуждение

Используя системный анализ, концептуальную схему реализации методики выбора площадки для размещения объектов с высоким уровнем опасности (на примере комплексов ПЗРО) можно представить в виде трех последовательных этапов (рис. 1).

Варианты площадок на первом этапе формируются путем учета всех необходимых нормативных требований, предъявляемых к площадкам размещения объектов с повышенным уровнем опасности, которые для комплексов ПЗРО делятся на две основные группы – ограничивающие и предпочтительные (табл. 1). Затем последовательным наложением данных групп требований на единую карту формируется выборка потенциально пригодных зон для размещения будущих площадок (геоинформационный анализ).

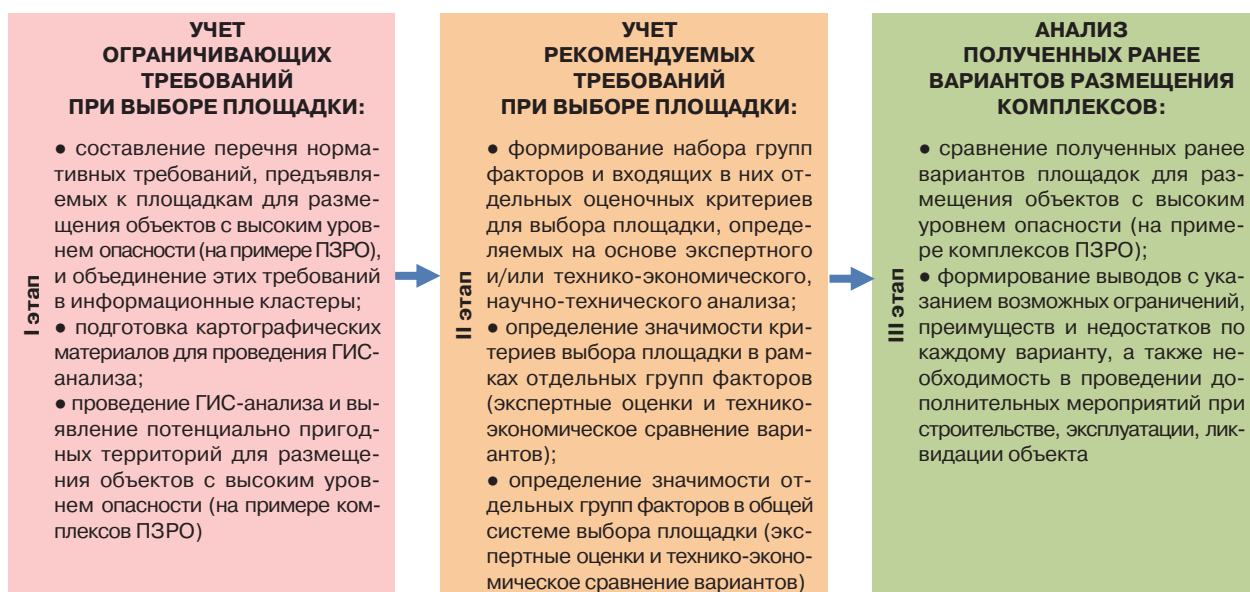


Рис. 1. Концептуальная схема реализации методики выбора площадки для размещения объектов с повышенным уровнем опасности (на примере комплексов ПЗРО)

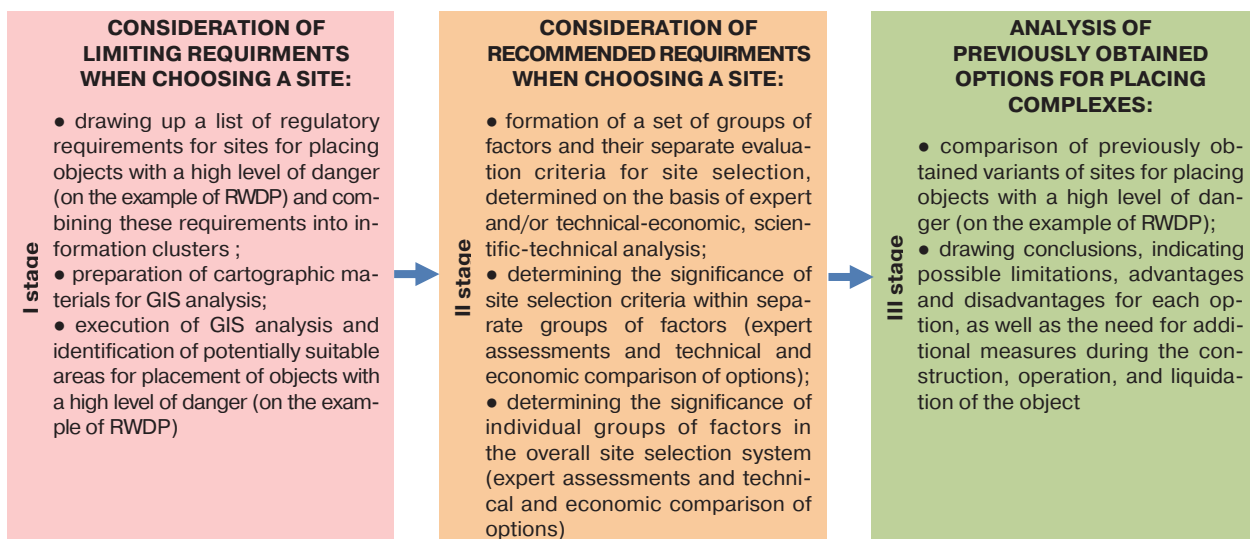


Figure 1. Conceptual scheme of implementation of the methodology for selecting a site for placing objects with a high level of danger (on the example of RWDP)

Таблица 1

Требования, предъявляемые к площадкам для размещения комплексов ПЗРО, составленные с учетом существующей нормативной базы [7–12]

[Table 1. Requirements for sites for the placement of RWPDP, based on the existing regulatory framework [7–12]]

№ [No.]	Требования к площадке [8] [Requirements for the site [8]]	Тип [Type]	Регламентирующий нормативный документ [Regulatory document]
1	«Не допускается размещать ПЗРО на территориях, в пределах которых размещение запрещено законодательством, в том числе природоохранным» [“It is not allowed to place RWDP in territories within which placement is prohibited by the legislation, including environmental protection”]	ограничивающий [limiting]	НП-055-14, п. 48; НП-060-05, п. 3.1,*1 [NP-055-14, p. 48; NP-060-05, p. 3.1,*1]
2	«Не допускается размещать ПЗРО на площадках, расположенных непосредственно на активных разломах или в активных геодинамических зонах» [“It is not allowed to place RWDP on sites located directly on active faults or in active geodynamic zones”]	ограничивающий [limiting]	НП-055-14, п. 48; НП-060-05, п. 3.1,*2; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.7 [NP-055-14, p. 48; NP-060-05, p. 3.1,*2; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.7]
3	«Не допускается размещать ПЗРО на площадках, сейсмичность которых характеризуется интенсивностью максимального расчетного землетрясения, превышающей 8 баллов по шкале MSK-64» [“It is not allowed to place RWDP on sites whose seismicity is characterized by the intensity of the maximum calculated earthquake exceeding 8 points on the MSK-64 scale”]	ограничивающий [limiting]	НП-055-14, п. 48; НП-060-05, п. 3.1,*3; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.7 [NP-055-14, p. 48; NP-060-05, p. 3.1,*3; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.7]
4	«Не допускается размещать ПЗРО на территории, подверженной воздействию действующих вулканов, и на территории проявления активного грязевого вулканизма» [“It is not allowed to place RWDP on the territory exposed to active volcanoes, and on the territory of active mud volcanism”]	ограничивающий [limiting]	НП-055-14, п. 48; НП-060-05, п. 3.1,*6; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.7 [NP-055-14, p. 48; NP-060-05, p. 3.1,*6; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.7]

Продолжение табл. 1
[Table 1, continuation]

№ [No.]	Требования к площадке [8] [Requirements for the site [8]]	Тип [Type]	Регламентирующий нормативный документ [Regulatory document]
5	«Размеры площадки ПЗРО должны обеспечить размещение всех необходимых сооружений, предназначенных для обращения с РАО» [“The size of the RWDP site should ensure the placement of all necessary facilities intended for the management of RW”]	ограничивающий [limiting]	НП-055-14, п. 51; [NP-055-14, p. 51]
6	«Площадка для размещения приповерхностного ПЗРО должна располагаться предпочтительно в пределах положительных элементов рельефа, характеризоваться низким уровнем грунтовых вод, не подвергаться затоплению, не находиться в прибрежной зоне, в поймах рек и в болотистой местности» [“The site for the placement of near-surface RWDP should preferably be located within the positive elements of the terrain, characterized by a low level of ground water, not subject to flooding, not located in the coastal zone, in floodplains of rivers and in swampy areas”]	предпочтительный [preferred]	НП-055-14, п. 52; ГОСТ Р 52037-2003; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.4–6.5, 6.9 [NP-055-14, p. 52; GOST R 52037-2003; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.4–6.5, 6.9]
7	«Не допускается размещение приповерхностных ПЗРО на площадке с выраженными признаками протекания поверхностных геологических процессов (например, эрозия, оседание, оползни, карст)» [“It is not allowed to place near-surface RWDP on a site with pronounced signs of surface geological processes (for example, erosion, subsidence, landslides, karst)”]	ограничивающий [limiting]	НП-055-14, п. 52; НП-060-05, п. 3.1,*4; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.8 [NP-055-14, p. 52; NP-060-05, p. 3.1,*4; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.8]
8	«Вмещающие породы должны быть представлены одним из потенциально пригодных типов (кристаллические магматические или метаморфические породы, в том числе граниты, гнейсы, туфы, предпочтительно основного или ультраосновного состава; каменная соль или ангидрит; глины), должны иметь достаточный объем, залегать на приемлемой глубине и обладать благоприятными физико-механическими свойствами, однородной структурой и низкой трещиноватостью» [“The host rocks must be of one of the potentially suitable types (crystalline igneous or metamorphic rocks, including granites, gneisses, tufts, preferably of basic or ultra-basic composition; rock salt or anhydrite; clays), must have sufficient volume, lie at an acceptable depth and have favorable physical and mechanical properties, uniform structure and low fracturing”]	предпочтительный [preferred]	НП-055-14, п. 53; Нормы МАГАТЭ по безопасности, № SSR-5 2007, п. 5.9.; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.3–6.6 [NP-055-14, p. 53; IAEA Safety Standards No. SSR-5 2007, p. 5.9; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.8]
9	«Целесообразно размещение площадки в районах, не испытывающих интенсивные тектонические движения» [“It is advisable to place the site in areas that do not experience intense tectonic movements”]	предпочтительный [preferred]	НП-055-14, п. 53; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.7 [NP-055-14, p. 53; IAEA Safety Standards No. SSR-5 2007, p. 5.9]
10	«Массив горных пород не должен содержать водоносных горизонтов, линз подземных вод или трещиноватых зон, по которым возможны водоприток в горные выработки и их затопление» [“The rock mass must not contain aquifers, underground water lenses, or fractured zones that may lead to water flows into the mine workings and their flooding”]	ограничивающий [limiting]	НП-055-14, п. 53; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.4–6.5, 6.9 [NP-055-14, p. 53; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.4–6.5, 6.9]

№ [No.]	Требования к площадке [8] [Requirements for the site [8]]	Тип [Type]	Регламентирующий нормативный документ [Regulatory document]
11	«Не допускается размещать ПЗРО на территории, подверженной воздействию цунами, катастрофических паводков или наводнений» [“It is not allowed to place RWDP on the territory affected by tsunamis, catastrophic high waters or floods”]	ограничивающий [limiting]	НП-060-05, п. 3.1,*5; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.9–6.10 [NP-060-05, p. 3.1,*5; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.9–6.10]
12	«Не допускается размещать ПЗРО на территории, которая может быть затоплена волной прорыва напорного фронта водохранилищ при разрушении плотин, расположенных вверх по течению реки от ПЗРО» [“It is not allowed to place RWDP on the territory that may be flooded by the wave of breaking the pressure front of reservoirs when the dams located upstream from the RWDP are destroyed”]	ограничивающий [limiting]	НП-060-05, п. 3.1,*7; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.11 [NP-060-05, p. 3.1,*7; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.11]
13	«Не допускается размещать ПЗРО в зонах схода селевых потоков и снежных лавин и в районах развития активных оползневых и других опасных склоновых процессов» [“It is not allowed to place RWDP in areas of mudslides and snow avalanches and in areas of active landslide and other dangerous slope processes”]	ограничивающий [limiting]	НП-060-05, п. 3.1,*8; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.10 [NP-060-05, p. 3.1,*8; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.11]
14	«Не допускается размещать ПЗРО на склонах с уклоном 15° и более» [“It is not allowed to place RWDP on slopes with an incline of 15° or more”]	ограничивающий [limiting]	НП-060-05, п. 3.1,*9 [NP-060-05, p. 3.1,*9]
15	«Не допускается использование мест, в которых ведут или будут вести добычу полезных ископаемых» [“It is not allowed to use places where mining is or will be conducted”]	ограничивающий [limiting]	ГОСТ Р 52037-2003; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.3 [GOST R 52037-2003; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.3]
16	«Места размещения могильников должны быть удалены от населенных районов, мест отдыха населения, открытых водоемов и водопроводных магистралей» [“Burial sites should be located away from populated areas, public recreation areas, open reservoirs, and water mains”]	предпочтительный [preferred]	ГОСТ Р 52037-2003 [GOST R 52037-2003]
17	«Не рекомендуется использовать места, где возможны демографические изменения, связанные с увеличением численности населения, или есть перспектива использования данной территории» [“It is not recommended to use places where there may be demographic changes associated with an increase in the population, or there is a prospect of using this territory”]	ограничивающий [limiting]	ГОСТ Р 52037-2003 [GOST R 52037-2003]
18	«Следует отдавать предпочтение площадкам, расположенным на малонаселенных территориях и имеющим устойчивый ветровой режим» [“Preference should be given to sites located in sparsely populated areas and have a stable wind regime”]	предпочтительный [preferred]	СП 2.6.1.2612-10 [SP 2.6.1.2612-10]

Структура ГИС-слоев для пространственного анализа
 [Table 2. Structure of GIS layers for spatial analysis]

№ [No.]	Карта [Map]	Возможный источник данных [Possible data source]	Цель анализа [Purpose of analysis]
1	Карта инфраструктуры минерально-сырьевого комплекса [Map of the infrastructure of the mineral resource complex]	ГИС-Атлас «Недра России» The GIS Atlas "Depths of Russia"	Формирование пула территорий, потенциально пригодных (с точки зрения нормативной базы) для размещения объектов повышенного уровня опасности [Creating a pool of territories that are potentially suitable (from the point of view of the regulatory framework) for the placement of high-risk objects]
2	Географическая карта [Geographical map]		
3	Карта особо охраняемых территорий [Map of specially protected territories]		
4	Инженерно-экологическая карта [Engineering and environmental map]		
5	Карта месторождений полезных ископаемых [Map of mineral deposits]		
6	Геологическая карта дочетвертичных отложений [Geological map of pre-Quaternary deposits]		
7	Тектоническая карта [Tectonic map]		
8	Карта сейсмического районирования [The map of seismic zoning]		
9	Карта экзогенных геологических процессов [Map of exogenous geological processes]		
10	Карты административно-территориального деления субъектов ЦФО [Maps of administrative divisions of subjects of the Central Federal district]		
11	Публичная кадастровая карта [Public cadastral map]		

Таким образом, на I этапе анализ и выявление потенциально пригодных площадок осуществляется по 18 основным критериям оценки. Пространственный анализ проводится на основе карт, формирующих ГИС-слои (табл. 2).

Учет обязательных требований на I этапе позволяет сформировать набор потенциально пригодных территорий для размещения объектов с повышенным уровнем опасности, а также обеспечить необходимыми исходными данными последующую технико-экономическую и экспертную оценки, которые, очевидно, следует производить с учетом всего жизненного цикла объекта и особенностей самого проектного решения. Так, при реализации проектов с большими объемами работ в условиях экологических ограничений (например, площадки Челябинской области [13]) требуется наличие трудового ресурса, к которому предъявляются требования (помимо квалификации) к общему состоянию здоровья, сле-

довательно, пул людей, занятых в строительстве вблизи предполагаемой площадки, следует подвергнуть критическому анализу на предмет их общего состояния здоровья, поэтому в данном случае критерий «наличие трудовых ресурсов в регионе» [14] не может стать определяющим при выборе площадки. Аналогичным образом дело обстоит и с планируемой перспективой переработки радиоактивных отходов. Предполагая, что в будущем будут доступны технологии полной переработки радиоактивных отходов, площадки следует выбирать, по возможности, ближе к уже расположенным объектам схожей группы (образующих в результате производства или хранящих данный тип отходов), учитывая при этом возможное размещение на сопоставимом расстоянии от них комплекса по переработке.

II этап реализации методики выбора площадок в первом приближении можно представить как последовательный технико-экономический и/или

экспертный анализ циклического типа с формированием пула критериев, объединенных в соответствующие группы (глобального и локального характера), для последующего сравнения вариантов с учетом особенностей проекта и жизненного цикла объекта преимущественно с использованием ГИС-анализа.

Формирование критериев оценки производится путем критического анализа ресурсной составляющей проекта на этапах жизненного цикла объекта, а также косвенных требований безопасности, включая экологические. Применительно к комплексам ПЗРО, набор критериев экспертной оценки предлагается основывать на принципе ALARA (As Low As Reasonably Achievable) и данных о мировом опыте выбора площадок для строительства ПЗРО, а именно:

- *критерий 1* – расстояние от площадки до ближайших населенных пунктов, м;
- *критерий 2* – численность населения в радиусе 3 км;
- *критерий 3* – расстояние до объектов гидрографической сети, м;
- *критерий 4* – отсутствие особо охраняемых природных территории, зон охраны объектов культурного наследия в радиусе 5 км;
- *критерий 5* – количество опасных объектов в радиусе 5 км;
- *критерий 6* – наличие транспортной инфраструктуры и расстояние до нее в км, а также ее пропускная способность (количество полос для движения в одну сторону);
- *критерий 7* – среднее расстояние до источников образования (накопления) РАО, км;
- *критерий 8* – площадь землеотвода, км.

Выбор критериев основан на ресурсно-логистических принципах с учетом всего жизненного цикла объекта, учитывающих в том числе возможную переработку отходов и последующую ликвидацию объекта хранения, и принципах экологической безопасности и влияния соседних объектов (предприятий) на комплекс ПЗРО, учитывающих наличие высоких требований, предъявляемых к качеству выполняемых работ (операций) на всех этапах жизненного цикла объекта, которые закреплены путем соответствующих профессиональных стандартов, что выносит требования безопасности на первый план, превалируя над социально-экономическими критериями выбора и запуская в полной мере механизм HR-менеджмента [15].

Выбор площадки – многокритериальная задача, и предпочтительность того или иного варианта не может быть охарактеризована каким-либо одним фактором. Самым распространенным методом решения подобных задач является взвешенная сумма критериев (метод анализа иерархий) [16], когда варианты сравниваются по предпочтительности на основе сопоставления взвешенной суммы критериев, которые при необходимости нормализуются (1).

$$F(f|w) = w_1 f_1 + w_2 f_2 + \dots + w_n f_n, \quad (1)$$

где w_i – весовые коэффициенты, предназначенные для учета разной относительной важности критериев (в сумме равные 1, показывают долю вклада того или иного критерия в общую систему оценки); f_i – критерий оценки в количественном выражении в единых единицах измерения, то есть с приведением их к сопоставимому виду (нормализацией); n – критерий, учитываемый в оценке (1, 2, ..., n).

Вариант считается наиболее предпочтительным при больших значениях весового индекса (суммы с учетом веса критерия в общей оценке).

Оценка согласованности выбранных критериев с учетом назначенного им веса, выполняется попарным взвешиванием всех критериев между собой, после чего данные заносятся в матричную форму (табл. 3).

Сравнение по табл. 3, как правило, осуществляется на основании экспертных оценок. Проводится расчет среднего арифметического значения в каждой строке таблицы. Определяются компоненты нормализованного вектора приоритетов (НВП). Выполняется проверка согласованности критериев путем расчета трех характеристик: собственного значения матрицы, индекса согласованности, отношения согласованности (2)–(4) [15].

$$\lambda_{\max} = f'_1 * \frac{a_1}{\sum_{i=1}^n a_i} + f'_2 * \frac{a_2}{\sum_{i=1}^n a_i} + \dots + f'_n * \frac{a_n}{\sum_{i=1}^n a_i}, \quad (2)$$

$$\text{ИС} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (3)$$

$$\text{ОС} = \frac{\text{ИС}}{\text{ПСС}}, \quad (4)$$

где a_i – сумма всех среднеарифметических значений f_i ($f_1, f_2, f_3 \dots f_n$); n – число учитываемых

критериев ($n = 1, 2, 3 \dots 8$); ПСС – показатель случайной согласованности, определяемый для случая, когда оценки в матрице представлены случайным образом, и зависящий только от размера матрицы [16].

Оценки в матрице считаются согласованными, если $OC \leq 10-15\%$, в противном случае их следует пересмотреть [16].

Описанная методика использована для предварительной оценки потенциально пригодной тер-

ритории размещения комплексов ПЗРО в РФ (рис. 2).

По результатам проведенного ГИС-анализа было получено 52 участка с потенциально пригодной территорией для размещения комплексов ПЗРО. Анализ II этапа, основанный на принципах ALARA, показан на примере Центрального федерального округа РФ, в котором определено пять наиболее вероятных мест для промежуточного хранения низкоактивных отходов (рис. 3).

Таблица 3

Форма таблицы попарного сравнения критериев
 [Table 3. Form of the table of pairwise comparison of criteria]

	f_1'	f_2'	...	f_n'	Среднее арифметическое значение [Arithmetic average]	НВП [NVP]
f_1'	1					
f_2'		1				
...			1			
f_n'				1		
ИТОГО [TOTAL]						
λ_{max}						
ИС [IC]						
ОС [CR]						

Примечание: ИС – индекс согласованности; ОС – отношение согласованности; НВП – нормализованный вектор приоритетов; λ_{max} – собственное значение матрицы.

[Note: IC – the index of consistency; CR – the consistency ratio; NVP – the normalized vector of priorities; λ_{max} – eigenvalue of the matrix.]

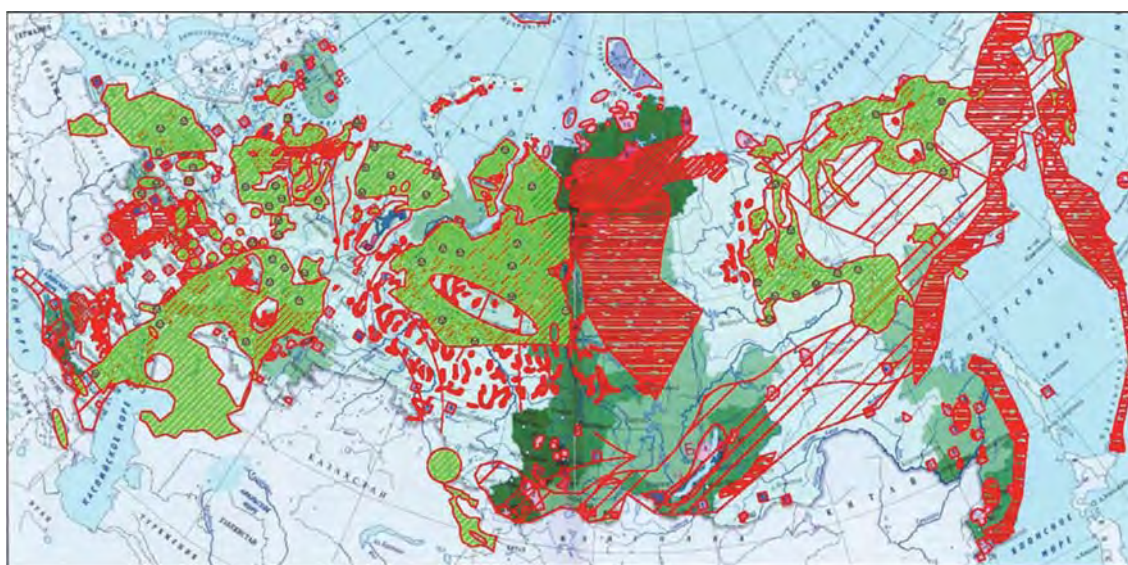


Рис. 2. Карта потенциально пригодных площадок для размещения комплексов ПЗРО на территории РФ, полученная путем реализации I этапа предлагаемой методики оценки:

▨ – размещение ПЗРО запрещено нормативными требованиями; ▨ – потенциально пригодные участки для размещения ПЗРО; ☣ – возможное местоположение ПЗРО

[Figure 2. A map of potentially suitable sites for placing RWDP on the territory of the Russian Federation obtained by implementing the I stage of the proposed assessment methodology:

▨ – placement of RWDP is prohibited by regulatory requirements; ▨ – potentially suitable sites for placement of RWDP; ☣ – possible location of RWDP]

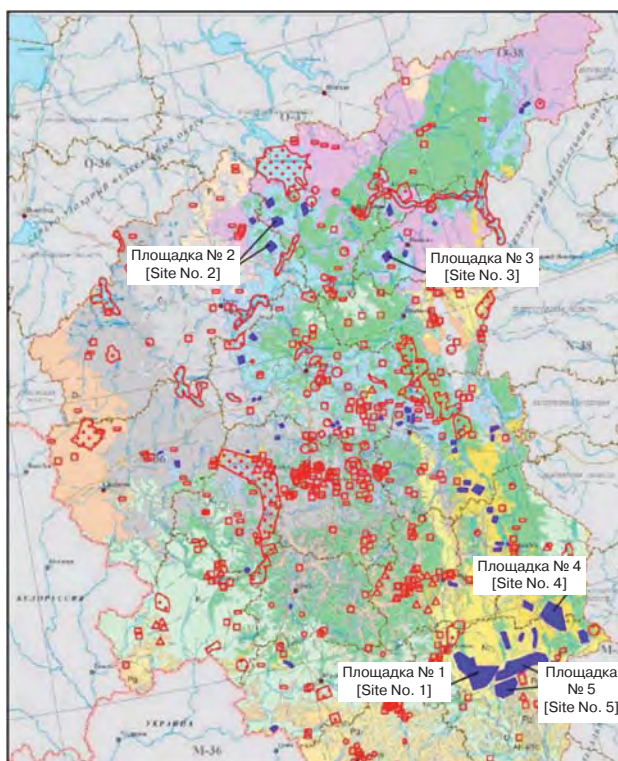


Рис. 3. Карта потенциально пригодных площадок для размещения комплексов ПЗРО на территории Центрального федерального округа РФ, полученная путем реализации II этапа предлагаемой методики оценки:

[Figure 3. A map of potentially suitable sites for placing RWDP in the Central Federal district of the Russian Federation obtained by implementing the II stage of the proposed assessment methodology:
■ – потенциально пригодные площадки
■ – potentially suitable sites]

Таблица 4

Результаты оценки потенциально пригодных площадок для размещения комплексов ПЗРО
[Table 4. Results of evaluating potentially suitable sites for placing RWDP]

	Площадка № 1 [Site No. 1]	Площадка № 2 [Site No. 2]	Площадка № 3 [Site No. 3]	Площадка № 4 [Site No. 4]	Площадка № 5 [Site No. 5]	Вес критерия [Criterion weight]	Вес группы критериев [Weight of the criterion group]
Критерий 1 [Criterion 1]	0,75	0,5	0,25	0,25	0,75	0,34	0,36
Критерий 2 [Criterion 2]	0,75	0,25	0,25	0,75	0,75	0,66	
Критерий 3 [Criterion 3]	0,15	0,17	0,29	0,22	0,17	0,37	0,4
Критерий 4 [Criterion 4]	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,37	
Критерий 5 [Criterion 5]	0,25	0,75	0,75	0,75	0,75	0,26	
Критерий 6 [Criterion 6]	0,75	0,25	0,5	0,5	0,25	0,2	0,24
Критерий 7 [Criterion 7]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,36	
Критерий 8 [Criterion 8]	0,75	0,25	0,25	0,25	0,25	0,44	
Весовой индекс [Weight index]	0,59	0,42	0,42	0,52	0,57		

Для каждого рассматриваемого варианта определены фактические значения критериев, которые приведены к сопоставимому виду (нормализованы). Весовые оценки, используемые для групп критериев и отдельных критериев внутри самих групп, были получены экспертным путем с привлечением специалистов АО «ГСПИ». Результаты оценки представлены в табл. 4.

Из пяти рассматриваемых площадок наибольший рейтинг получила площадка № 1, главным преимуществом которой является отсутствие необходимости землеотвода территории.

Предложенная методика соответствует поставленным задачам, так как позволяет осуществить рациональный и обоснованный выбор площадок для размещения ПЗРО с учетом его жизненного цикла.

Достоинством разработанной методики выбора площадок является универсальность, гибкость, наглядность, удобство в обработке результатов анализа.

Заключение

В настоящий момент выбор площадок для потенциально опасных объектов из-за многокритериальности их оценки может быть наглядно и информативно представлен с использованием ГИС-анализа данных с нанесением соответствующих ограничивающих и предпочтительных требований непосредственно на карту местности, как это показано выше на примере комплексов ПЗРО.

Учет необходимых требований, предъявляемых на различных этапах жизненного цикла, а также их значимость возможно в полной мере оценить методом взвешенных оценок и попарных сравнений с последующим их внесением в ГИС-анализ.

Предложенные дополнения к методике выбора площадки подходят для использования в решении задач размещения потенциально опасных объектов, объектов использования атомной энергии, что позволяет рациональным образом, с соблюдением всех необходимых нормативных требований, проводить выбор вариантов размещения потенциальных площадок с учетом жизненного цикла объекта.

В дальнейшем следует расширить количество учитываемых критериев, использовать по возможности имеющиеся статистические данные и технико-экономические сравнения вместо экспертных оценок.

Список литературы

1. Об утверждении прогнозируемого объема образования РАО для организаций ЯРОО: приказ Госкорпорации «Росатом» № 1/825-П от 10 сентября 2012 г. М.: ГК «Росатом», 2012. URL: <https://www.rosatom.ru/> (дата обращения: 29.04.2020 г.).
2. Фромзель В.Н., Шлейфер В.А. Проблема с РАО на АЭС России: ситуация может быть улучшена // Атомная стратегия. 2017. 13 декабря. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=7786> (дата обращения: 29.04.2020 г.).
3. Кочкин Б.Т. Геоэкологический подход к выбору районов захоронения радиоактивных отходов. М.: Наука, 2005. 115 с.
4. Морозов В.Н., Шилиц И.Ю., Камнев Е.Н. Выбор площадок для захоронения радиоактивных отходов в геологических формациях. М.: Горная книга, 2011. 216 с.
5. Цебаковская Н.С., Уткин С.С., Капырин И.В., Медянцева Н.В., Шамина А.В. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО / под ред. И.И. Линге, Ю.Д. Полякова. М.: Комтехпринт, 2015. 208 с.
6. Metlay D.S. Selecting a Site for a Radioactive Waste Repository: A Historical Analysis // ELEMENTS. 2016. Vol. 12. Pp. 269–274. doi: 10.2113/gselements.12.4.269.
7. Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности»: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22 августа 2014 г. № 379. М., 2014.
8. НП-060-05. Размещение пунктов хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности: утв. пост. Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 31 августа 2005 г. № 3. М.: НТЦ ЯРБ, 2005.
9. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 83 с.
10. ГОСТ Р 52037-2003. Могильники приповерхностные для захоронения радиоактивных отходов. Общие требования. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. 22 с.
11. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности. № SSR-5 // Нормы МАГАТЭ по безопасности для защиты людей и охраны окружающей среды. Вена: МАГАТЭ, 2011. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1449r_Web.pdf (дата обращения: 29.04.2020 г.).
12. STI/PUB/1073. Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования // Серия изданий по безопасности. № WS-R-1. Вена: МАГАТЭ, 2003. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1073r_web.pdf (дата обращения: 29.04.2020 г.).

13. Отчет по экологической безопасности ФГУП «ПО «Маяк»» за 2018 год / Госкорпорация «Росатом»; ФГУП «ПО «Маяк»». Озерск: РИЦ ВРБ; Типография ФГУП «ПО «Маяк»», 2019. 44 с.

14. НД п.4.2 СППНАЭ-93. Основные требования к разработке технико-экономического обоснования строительства атомной станции. Положение о порядке выбора площадки строительства. М.: Атомэнергопроект, 2000.

15. *Имашева З.З., Карамышева Э.Ф.* Технологии HR-менеджмента в стратегическом управлении компанией // *Науковедение*. 2015. Т. 7. № 5. С. 1–11. <http://dx.doi.org/10.15862/10EYN515>

16. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

Для цитирования

Панкратов Н.С., Белов В.В. Выбор площадок для строительства пунктов захоронения радиоактивных отходов // *Вестник Российского университета дружбы народов*. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 1. С. 36–47. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-36-47>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-36-47

Research paper

Selection of sites for the construction of radioactive waste disposal points

Nikolai S. Pankratov

Moscow Regional Construction Central Research Laboratory, 20 Kulakova St, bldg. 1L, Moscow, 123592, Russian Federation
Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation

Vyacheslav V. Belov

Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation

Article history:

Received: May 7, 2020

Revised: May 13, 2020

Accepted: May 18, 2020

Keywords:

siting, radioactive waste, burial site radioactive waste, geoinformation analysis, ALARA principles, ranking of areas, waste management

The article deals with the selection of sites for the construction of nuclear installations, radioactive waste disposal sites and other facilities for the use of nuclear energy. The review of modern approaches to the selection of sites for placement of near-surface radioactive waste disposal points shows that the system research in this area is not fully presented, and is mainly aimed at solving problems of an engineering-geological nature for the location area, as well as the choice of materials for engineering protection barriers. In this paper, using the example of radioactive waste disposal sites, we review the requirements set by the regulatory documents of the Russian Federation and the International Atomic Energy Agency in the field of site selection. The authors proposed additions to the methodology for selecting sites for the construction of low-and medium-level waste disposal sites based on the system and GIS analysis of the ALARA principles, as well as the method of weighted evaluation of criteria and their pairwise comparisons. The multicriteria nature of the site selection problem is proposed to be described by GIS analysis of data with drawing the corresponding “limiting” and “preferred” requirements directly on the map of the area, which is shown in the article by the example of selecting sites for radioactive waste disposal points. Taking into account the necessary requirements at various stages of the life cycle, as well as their significance, can be assessed by weighted estimates and pairwise comparisons, followed by their introduction into the GIS analysis. This approach allows to choose rational options for placing potential sites, taking into account the life cycle of the object, in a rational way, with compliance with all necessary regulatory requirements.

References

1. *Ob utverzhdenii prognoziruемого ob"ema obrazovaniya RAO dlya organizacij YAROO* [Approval of the pro-

jected volume of radioactive waste generation for organizations of nuclear radiation-hazardous facilities]: order of the Rosatom State Corporation dated September 10, 2012, No. 1/825-R. Moscow: Rosatom State Corporation; 2012. Available from: <https://www.rosatom.ru/> (accessed: April 29, 2020). (In Russ.)

2. Fromzel VN, Shlejfer VA. Problema s RAO na AES Rossii: situaciya mozhet byt' uluchshena [The problem with radioactive waste from Russian nuclear power plants: the si-

Nikolai S. Pankratov, consultant of the testing laboratory of MosoblstroiTsnIL, master of the Department of Construction of Thermal and Atomic Power Stations of MGSU, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0075-6185>, pankratovnic@mail.ru
Vyacheslav V. Belov, senior lecturer of the Department of Construction of Thermal and Atomic Power Stations of MGSU, PhD in Technical Sciences, eLIBRARY SPIN-code: 6936-1160, BelovVV@mgsu.ru

tuation can be improved]. *Atomnaya strategiya [Atomic Strategy]*. 2017, December 13. Available from: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=7786> (accessed: April 29, 2020). (In Russ.)

3. Kochkin BT. *Geoekologicheskij podhod k vyboru rajonov zahoroneniya radioaktivnyh othodov [Geocological approach to the choice of territories for disposal of radioactive waste]*. Moscow: Nauka Publ.; 2005. (In Russ.)

4. Morozov VN, Shishchic IYu, Kamnev EN. *Vybor ploshchadok dlya zahoroneniya radioaktivnyh othodov v geologicheskikh formacijah [Selection of sites for the disposal of radioactive waste in geological formations]*. Moscow: Gornaya kniga Publ.; 2011. (In Russ.)

5. Cebakovskaya NS, Utkin SS, Kapyrin IV, Medyancev NV, Shamina AV. *Obzor zarubezhnyh praktik zahoroneniya OYAT i RAO [Review of foreign practice of burial of OI RAO]*. Moscow: Komtekhpriint; 2015. (In Russ.)

6. Metlay DS. Selecting a site for a radioactive waste repository: a historical analysis. *ELEMENTS*. 2016;12: 269–274. doi: 10.2113/gselements.12.4.269.

7. *Ob utverzhdenii federal'nykh norm i pravil v oblasti ispol'zovaniya atomnoi energii "Zahoronenie radioaktivnykh otkhodov. Printsipy, kriterii i osnovnye trebovaniya bezopasnosti" [Federal norms and rules in the field of atomic energy use "Disposal of radioactive waste. Principles, criteria and basic safety requirements"]*: order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of August 22, 2014, No. 379. Moscow; 2014. (In Russ.)

8. NP-060-05. *Razmeshchenie punktov hraneniya yadernyh materialov i radioaktivnyh veshchestv. Osnovnye kriterii i trebovaniya po obespecheniyu bezopasnosti [Placement of storage points for nuclear materials and radioactive substances. Basic safety criteria and requirements]*: approved by resolution of Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of August 31, 2005, No. 3. Moscow: NTC YARB Publ.; 2005. (In Russ.)

9. SP 2.6.1.2612-10. *Osnovnye sanitarnye pravila obespecheniya radiacionnoj bezopasnosti (OSPORB-99/2010) [Basic sanitary rules of radiation safety (OSPORB-99/2010)]*. Moscow: Federal'nyj centr gigieny i epidemiologii Rospotrebnadzora Publ.; 2010. (In Russ.)

10. GOST R 52037-2003. *Mogil'niki pripoverhnostnye dlya zahoroneniya radioaktivnyh othodov. Obshchie trebovaniya [Near-surface burial grounds for the disposal*

of radioactive waste. General requirements]. Moscow: IPK Izd-vo standartov Publ.; 2003. (In Russ.)

11. *Zahoronenie radioaktivnyh othodov. Konkretnye trebovaniya bezopasnosti. No. SSR-5 [Disposal of radioactive waste. Specific security requirements. No. SSR-5]. Normy MAGATE po bezopasnosti dlya zashchity lyudej i ohrany okruzhayushchej sredy [IAEA safety standards for the protection of people and the environment]*. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2011. Available from: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1449r_Web.pdf (accessed: April 29, 2020). (In Russ.)

12. STI/PUB/1073. *Pripoverhnostnoe zahoronenie radioaktivnyh othodov. Trebovaniya [Surface disposal of radioactive waste. Requirements]. Seriya izdanij po bezopasnosti. No. WS-R-1 [Series of publications on safety. No. WS-R-1]*. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2003. Available from: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1073r_web.pdf (accessed: April 29, 2020). (In Russ.)

13. Rosatom State Corporation, Mayak Production Association. *Otchet po ekologicheskoy bezopasnosti FGUP "PO 'Mayak' " za 2018 god [Report on environmental safety of Mayak Production Association for 2018]*. Ozersk: RIC VRB Publ.; Tipografiya "PO 'Mayak' ", 2019. (In Russ.)

14. ND p.4.2 SPPNAE-93. *Osnovnye trebovaniya k razrabotke tekhniko-ekonomicheskogo obosnovaniya stroitel'stva atomnoj stancii. Polozhenie o poryadke vybora ploshchadki stroitel'stva [Basic requirements for the development of a feasibility study for the construction of a nuclear power plant. Regulations on the procedure for selecting a construction site]*. Moscow: Atomenergoproekt Publ.; 2000. (In Russ.)

15. Imasheva ZZ, Karamysheva EF. *Tekhnologii HR-menedzhmenta v strategicheskom upravlenii kompaniej [HR-management technologies in strategic management of the company]*. *Naukovedenie*. 2015;7(5):1–11. <http://dx.doi.org/10.15862/10EVEN515> (In Russ.)

16. Saati T. *Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarhij [Decision-making. Method for analyzing hierarchies]*. Moscow: Radio i svya Publ.; 1993. (In Russ.)

For citation

Pankratov NS, Belov VV. Selection of sites for the construction of radioactive waste disposal points. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(1):36–47. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-36-47> (In Russ.)