DOI: 10.25283/2587-9707-2025-3-75-85 УДК 621.039

О ПЕРИОДИЧЕСКОМ РАДИАЦИОННОМ КОНТРОЛЕ ПУНКТОВ ЗАХОРОНЕНИЯ РАО

Ин. И. Линге

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 23 июня 2025 г.

Рассмотрена проблематика оценки состояния инженерных барьеров безопасности (ИББ) пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) после закрытия и необходимости осуществления периодического радиационного контроля. Ограничиваясь рассмотрением только приповерхностных пунктов захоронения РАО (ППЗРО), решены следующие задачи: (1) показаны основные нормативные требования и направления развития регуляторной среды в отношении контроля целостности и оценки состояния их ИББ; (2) проанализирован национальный опыт по наблюдению за сохранностью инженерных барьеров безопасности пунктов хранения РАО (ПХ РАО); (3) описана методика наземной лазерной съемки дневной поверхности ППЗРО для определения изменений покрывающего экрана на долгосрочный период; (4) сформулированы предложения по представлению результатов мониторинга в составе цифровой информационной модели (ЦИМ) ППЗРО. Достигнутые результаты: процесс «периодического радиационного контроля ПЗРО после закрытия» должен быть конкретизирован в нормативной базе с учетом упреждающих знаков, процедуры и сроков его проведения, разработана методика контроля деформаций покрывающего экрана, выполнен анализ цифровизации данных о состоянии ИББ ПЗРО для информационного моделирования.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы (РАО), пункт хранения, пункты консервации особых РАО, пункты захоронения РАО (ПЗРО), наземная лазерная съемка, алгоритм сравнения облаков «модель к модели» (Model-to-Model Cloud Comparison, M3C2), информационное моделирование, Industry Foundation Classes (IFC).*

Введение

Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и безопасности обращения с радиоактивными отходами определяет закрытие пункта захоронения как «завершение всех операций в определенный момент после помещения отработавшего топлива или радиоактивных отходов в установку для захоронения. Оно включает окончательные инженерно-технические или другие работы, необходимые для приведения установки в состояние, которое будет оставаться безопасным в течение продолжительного времени». Вопросы контроля ПЗРО после их закрытия в конвенции не конкретизируются, поэтому концептуально в различных странах они решаются по-разному, в диапазоне от полного прекращения какой-либо деятельности в отношении закрытого ПЗРО, институционных ограничений и до определенных объемов контроля за состоянием безопасности. В российском законодательстве для периода после закрытия предусмотрена опция периодического радиационного контроля (ст. 13, 17, 18 и 20 ФЗ № 190). Тема конкретизации этого понятия становится

актуальной, в том числе по причинам ведущихся работ по проектированию и эксплуатации ПЗРО для различных классов РАО, а также мероприятий по консервации пунктов размещения особых РАО (ПРОРАО), сроки преобразования которых в пункты захоронения могут составить многие десятки лет. Формирование представлений о периодичности, объемах и видах радиационного контроля также важно и в контексте ведущихся дискуссий о непомерной стоимости захоронения. С учетом изложенного рассмотрим вопросы контроля состояния покрывающего экрана — одного из основных барьеров безопасности ППЗРО.

Нормативно-правовая среда контроля целостности инженерных барьеров безопасности

Для рассматриваемого вопроса наиболее важны разделы 48, 67—70 НП-069-14 (Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности). В них имеются указания о необходимости в течение обоснованного в проекте закрытия ППЗРО периода времени физической защиты, мониторинга системы захоронения РАО и периодического радиационного контроля, хранения документации, содержащей основные сведения о нем и захороненных РАО, а также основные результаты проведенных мероприятий по обеспечению безопасности закрытого ППЗРО.

Кратко остановимся на этих положениях, в том числе имея в виду отличия понятия захоронения в Объединенной конвенции и в федеральном законе по РАО (ФЗ № 190), где указано на необходимость обеспечения безопасности в течение всего периода потенциальной опасности отходов. Последний, даже при минимальном количестве долгоживущих радионуклидов, может оказаться чрезвычайно большим (многие столетия), и главным образом за счет разбавления активности в материалах ИББ и ближней зоне. В этом смысле п. 67 НП-069-14 дает более аккуратную формулировку, которая на самом деле сталкивается с трудностями обоснования. Можно предположить, что период мониторинга ППЗРО для подтверждения стабильности барьеров безопасности составляет сто и более лет. В ФЗ № 190 упомянут только один вид контроля, а именно — периодический радиационный контроль. Поэтому предполагаем, что мониторинг системы захоронения будет компонентой периодического радиационного контроля.

Отметим п. 69, который указывает, что закрытый ППЗРО должен быть оснащен предупреждающими маркировочными знаками, предназначенными для оповещения человека о радиационной опасности в случае его непреднамеренного вторжения. Понятно, что эти символы, а возможно, и отдельный индикаторный слой в составе ИББ должны существенно отличаться от традиционных указателей радиационной опасности.

В п. 70 указывается, что наблюдение за состоянием безопасности закрытого ППЗРО, мониторинг системы захоронения РАО и периодический радиационный контроль должны осуществляться по обоснованной программе и включать также защиту ИББ от разрушений, связанных с проникновением животных и корней растений.

Резюмируя требования нормативной базы, можно сделать вывод, что периодический радиационный контроль должен охватывать: процедуру оценки состояния покрывающего экрана ППЗРО, создание предостерегающих знаков или индикаторного слоя, меры по предупреждению нерегулируемого роста растений, интеграцию информации о пункте захоронения и результатах контроля.

Практика контроля целостности инженерных барьеров безопасности пунктов хранения РАО

Кратко рассмотрим современную практику мониторинга состояния объектов размещения РАО на предмет установления видов контроля, которые могут быть применены на стадии после их закрытия. В период эксплуатации ведется наблюдение за относительно широким набором параметров, многие из которых не могут быть признаны необходимыми после закрытия. Так, например, практикуемые контроль радиоактивного загрязнения атмосферного воздуха, уровня грунтовых вод и их радиоактивного и химического загрязнения, температуры в наблюдательных скважинах и газовыделения от упаковок РАО [1]—[4] актуальны только для стадии эксплуатации. Более того, некоторые из них реализуются через мониторинг в скважинах, что также не согласуется с концепциями закрытия. Проведение радиационных измерений (мощность дозы, плотность потока частиц) над покрывающими экранами мало информативно.

Однако радиационный контроль все же необходим. Его отсутствие в районе закрытого ППЗРО не будет понято общественностью, что является важным доводом в современных реалиях.

В качестве основных признаков безопасности закрытого ППЗРО является стабильность рельефа покрывающего экрана, которая вместе с отсутствием радикального изменения уровня осадков определяет устойчивость системы захоронения. Представляется, что проведение периодического лазерного сканирования покрывающих экранов ППЗРО позволит с высокой точностью установить:

- любые внешние воздействия и нарушение целостности барьеров безопасности, в том числе вследствие деятельности растений и животных, а также вмешательства человека;
- предполагаемые изменения состава и структуры невидимых на поверхности деформаций барьеров безопасности, а также, в совокупности с информацией об осадках, изменение гидрологического режима подземных вод в зоне объекта.

Принципиальных ограничений для применения метода наземного лазерного сканирования (НЛС) нет, поскольку требование о капитальных упреждающих знаках (они же пункты опорной сети) и уборка растительности предусмотрены нормативными требованиями. В случае их неисполнения корни растений будут разрушать барьеры безопасности и станут интенсивным каналом выхода радиоактивных веществ на дневную поверхность.

Если при проведении мониторинга системы захоронения РАО будут выявлены отступления от установленного в проекте закрытия ППЗРО конечного состояния, приводящие к снижению уровня безопасности, должны быть выполнены практически осуществимые обоснованные мероприятия.

Таким образом, процедура «периодического радиационного контроля ПЗРО после закрытия» как единственно предполагаемая на законодательном уровне, должна быть конкретизирована в нормативной базе и включать все виды мониторинга с учетом возможностей цифровизации, представляя результаты всех измерений. Применение наземной лазерной съемки, по мнению автора, может стать цифровой основой методики контроля деформаций покрывающего экрана (Методики).

Общий подход

В большинстве случаев объекты контроля представляют собой крупные сооружения с выраженными курганами и ИББ из различных материалов площадью от сотен до сотен тысяч м^2 (рис. 1). В силу внешних воздействий и природных факторов, дефектов закладки барьерных материалов и иных причин высоковероятно появление просадок и провалов грунта, образование эрозионных водотоков и их развитие.

В этих условиях характеристикой целостности ИББ ПХ РАО или ППЗРО установлен показатель «отсутствие значимых изменений покрывающих экранов инженерных барьеров безопасности» (дневной поверхности покрывающего экрана ПХ РАО), определяемый в стандартной системе измерений геометрических параметров (м, м^2, м^3) каждой деформации. Основное допущение — изменение дневной поверхности покрывающего экрана — напрямую коррелирует как с нарушениями внутренней структуры барьеров безопасности (т. е. признаками деградации барьеров безопасности), так и с влиянием в первую очередь внешних воздействий. Вопросы анализа и выявления причин данного процесса в рамках методики не рассматривались, ее задача — предоставить максимальный объем информации для изучения.

Также она позволяет осуществить измерение пространственных характеристик и построить

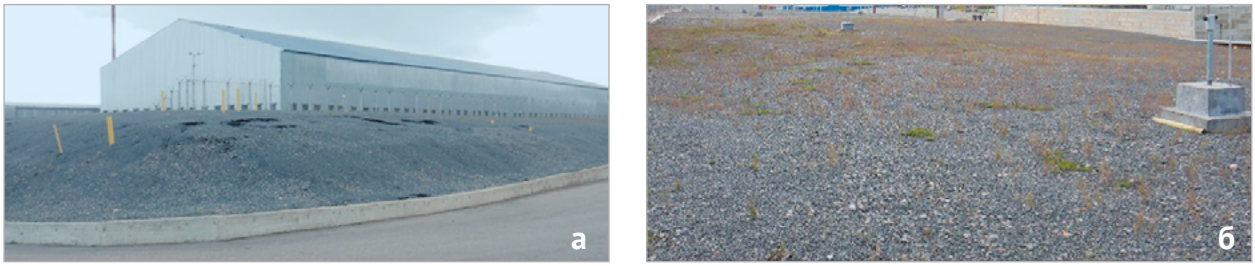


Рис. 1. Покрывающий экран пункта хранения и его деформации: а) оголение георешетки (черным), б) прорастание непроектной растительности

точечную модель поверхности покрывающего экрана. Путем применения методов их сравнения осуществляется кластеризация выявленных точек лазерного отражения деформаций и вычисление их параметров, характеризующих ее стабильность и целостность. Методика базируется:

- на создании вокруг объекта опорной сети III класса точности измерений деформаций [5] с проектным сроком эксплуатации ПЗРО не менее 100 лет с учетом совмещения конструкции опорного пункта и информационного упреждающего знака «радиационная опасность»;
- проведении циклов измерений дневной поверхности объекта раз в несколько лет методом НЛС с получением результата — пространственной точечной модели дневной поверхности покрывающего экрана;
- сравнении точечных моделей различных циклов съемки, приведенных в систему координат опорной сети;
- вычислении параметров деформаций;
- моделировании и сохранении значимых деформаций в составе цифровой информационной модели (ЦИМ) ИББ ППЗРО.

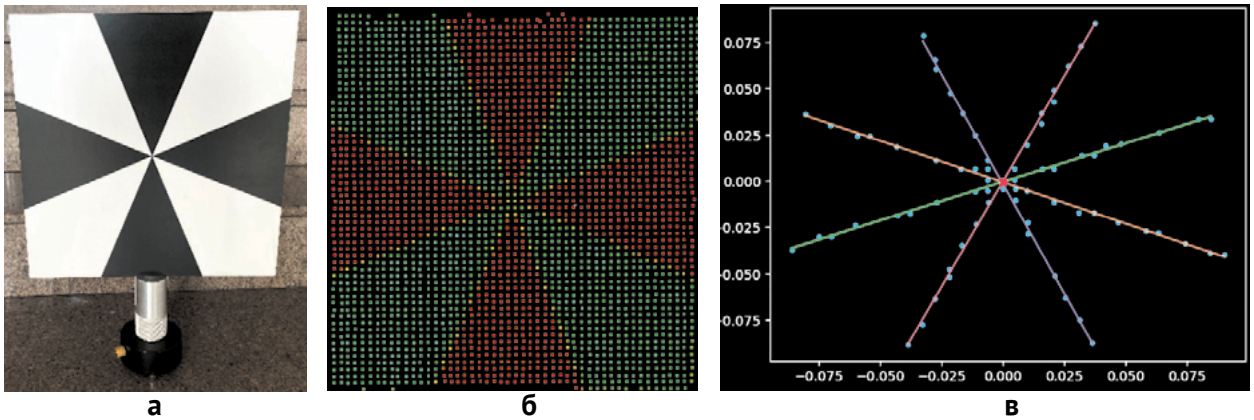
По результатам измерений наземным лазерным сканером углов и расстояний прибор рассчитывает координаты точек на дневной поверхности ИББ, определяющих места отражения лазерного луча сканера во время измерения (точечная модель, с максимальной средней квадратической погрешностью нахождения трехмерной координаты, близкой к приборной в 1 мм). Взаимное ориентирование всех результатов измерений (сканов) осуществляется способом по трем точкам, определяемым при съемке специальными марками (рис. 2) на каждом месте установки сканера, а также с учетом спроектированной сети взаимного ориентирования и маршрута съемки (рис. 3). Для этого Методикой установлена общая последовательность операций, схемы расстановки сканера и требования к расстоянию (15 м) и взаимному ориентированию марок и сканера при съемке (рис. 4). Особенностью данной работы является применение специальной марки для НЛС — BOTA8 [6], подходящей для съемки участков на открытой местности. Объем измерений для объектов с площадью поверхности 6—10 000 м^2 оценивается в один-два рабочих дня.

По результатам взаимного ориентирования всех сканов единая точечная модель дневной поверхности цикла съемки регистрируется в системе координат опорной сети (с точностью привязки не более 1 мм). Сравнение моделей различных циклов осуществляется с применением алгоритма (рис. 5), совершенствование которого может включать различные дополнительные методы автоматизированного выявления деформаций.

Сопоставление точечных моделей циклов съемки осуществляется тремя способами: визуальным, по интенсивности и с помощью алгоритма сравнения облаков точек (Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison, M3C2) [7]. Результатом анализа и кластеризации (рис. 5) являются группы точек лазерного отражения деформаций. Параметры каждой из них — горизонтальные и вертикальные смещения (мм), объем (м^3), площадь проекции (м^2) — вычисляются по координатам точек кластера. Методика оперирует тремя типами деформации (табл. 1).

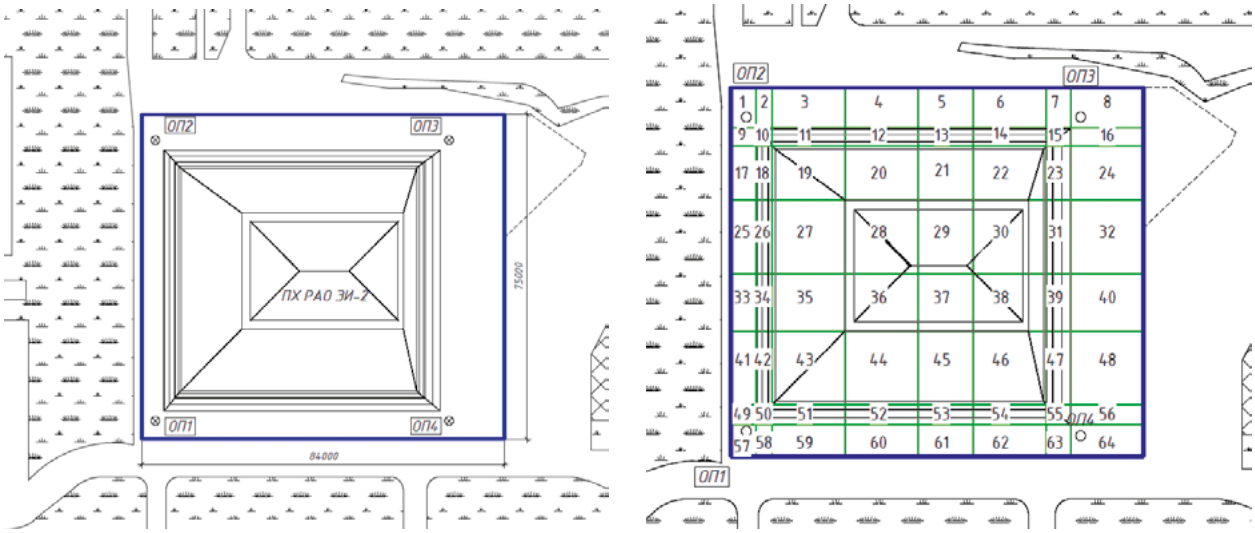
Погрешность измерения параметров деформаций сводится к средней квадратической погрешности (СКП) определения координаты точки, учитывающей систематические ошибки НЛС [8], приборные [9] и методические погрешности контроля его деформаций [10]. На текущий момент СКП определения параметров изменений оценивается в 5 мм, что соответствует III классу измерения по [5] (10 мм). Для опорной сети устанавливается требование двукратной точности определения координат центров пунктов по сравнению с НЛС. Это достижимо рядом методов высокоточной ГНСС и тахеометрической съемки площадки расположения ПХ [11]. III класс точности измерения деформаций, а также специфика взаимного ориентирования результатов НЛС лежат в основе требований к средствам измерений (приборная погрешность вычисления расстояний и углов), формирующих целый ряд потенциально применяемых моделей сканеров (Leica RTC360, Leica P30/40/50, Focus Premium 70/150/350, Z+F IMAGER 5016), штативов, адаптеров и специальных марок для наземной лазерной съемки.

Алгоритмы и методы определения точек лазерного отражения, свидетельствующих о деформации, по результатам сравнения моделей циклов съемки (рис. 6) могут быть дополнены или автоматизированы в программных средах обработки данных НЛС. На текущий момент в Методике применены такие операции для обработки точек лазерного отражения, как:

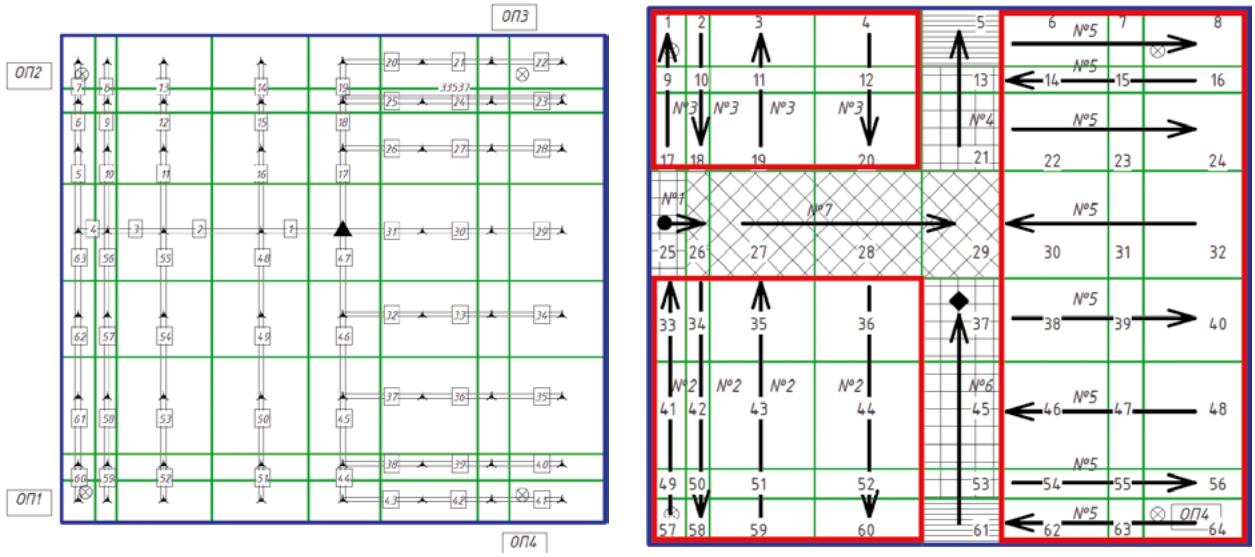


а б в

Рис. 2. Определение центра марки BOTA8 по алгоритму [6]: а) общий вид марки, б) точки лазерного отражения поверхности марки по интенсивности, в) определение центра марки как точки пересечения линий восстановленных по пограничным точкам (границ белой и черных секторов марки)



а б



в г

Рис. 3. Планирование съемки: а) определение границ участка съемки (синий); б) построение участков измерений (зеленый); в) расчет сети уравнивания сканов; г) планирование маршрута съемки в зависимости от схемы уравнивания участков измерений (красный — группы однотипных участков измерений, черными стрелками обозначен планируемый маршрут передвижений съемки)

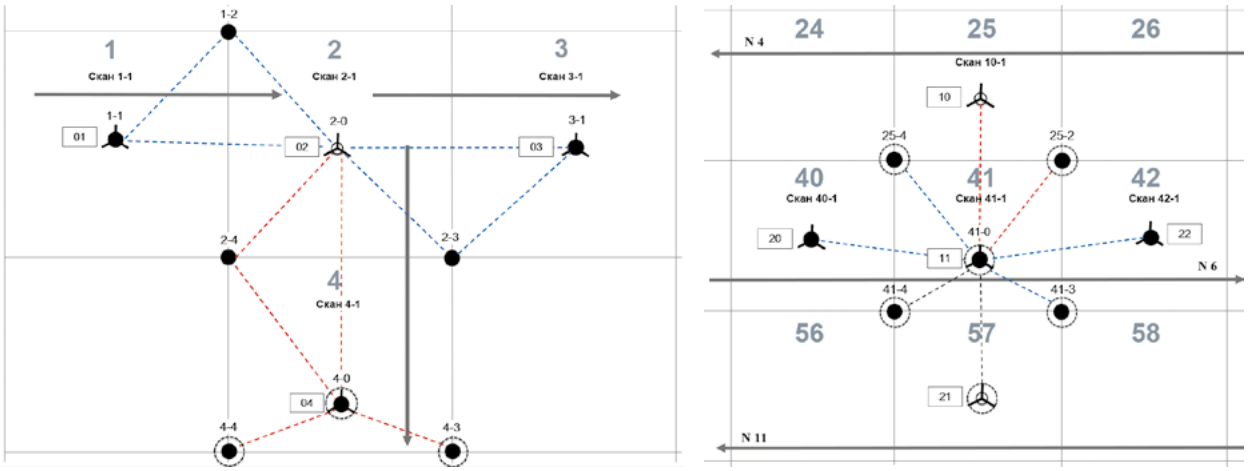


Рис. 4. Схемы расстановки марок и оборудования при наземной лазерной съемке со способом взаимного ориентирования по трем точкам: а) схема «Т-поворот», б) схема «Перекресток» ------ — связь взаимного ориентирования; ● — марка для НЛС; ◉ — сканер или марка на штативе; ⟶ — направление маршрута съемки; ▭ — участок измерений

Таблица 1. Типы и параметры минимально идентифицируемых деформаций

Тип	Наименование типа изменения	Параметр (обозначение, единица измерения)	Значение
№ 1	Изменение типа покрывающего материала (оголение покрывающего материала)	Площадь проекции деформации на дневную поверхность (S, м^2)	более 0,5
№ 2	Объемное изменение поверхности (просадка или подъем)	Площадь проекции деформации на дневную поверхность (S, м^2)	более 0,5
		Вертикальное смещение ($H_{верт}$, мм)	более 30
		Горизонтальное смещение ($L_{гор}$, мм)	
№ 3	Непроектный элемент	Объем деформации (V, м^3)	более 0,002

фильтрация по расстоянию от сканера, визуальная классификация точек деформаций в различных режимах отображения модели (по интенсивности — рис. 6а), с наложенным цветом RGB от фотопанорамной съемки (рис. 6б), по рассчитанному алгоритмом M3C2 расстоянию (рис. 6в и 7, красным отмечены точки лазерного отражения с максимальной дистанцией между облаками), кластеризация методом *k*-ближайших соседей. Этих способов, основным из которых выступает алгоритм M3C2 (рис. 7), достаточно для определения деформаций дневной поверхности ПХ РАО.

На завершающем шаге Методики предложен подход к изображению повреждений в составе ЦИМ оценки состояния ИББ ПХ РАО [12], [13], а именно: твердотельное моделирование деформаций и представление результатов съемки в формате IFC 4.3 (IFC4X3_ADD2) (табл. 2, рис. 4). Для каждого кластера точек лазерного отражения по алгоритму Пуассона [14] строится твердотельная модель деформации в форматах MESH-модели и Wavefront 3D (OBJ-формат).

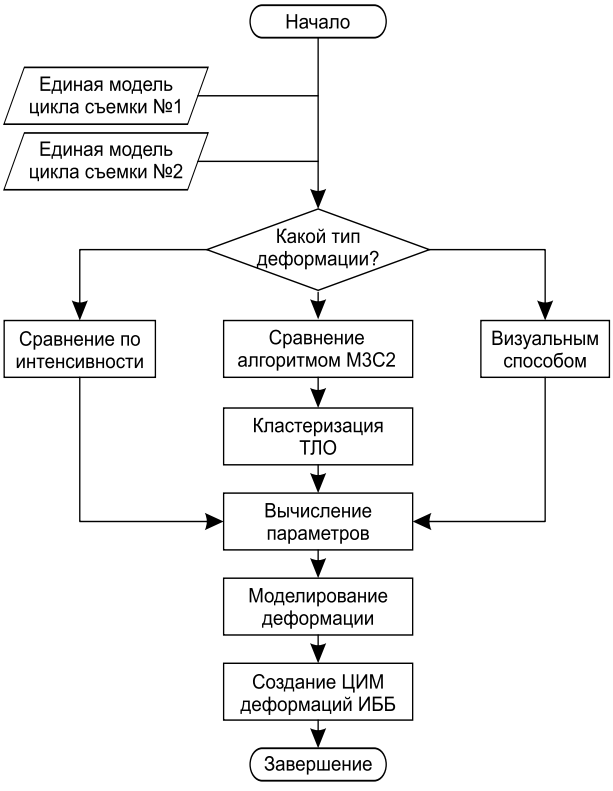
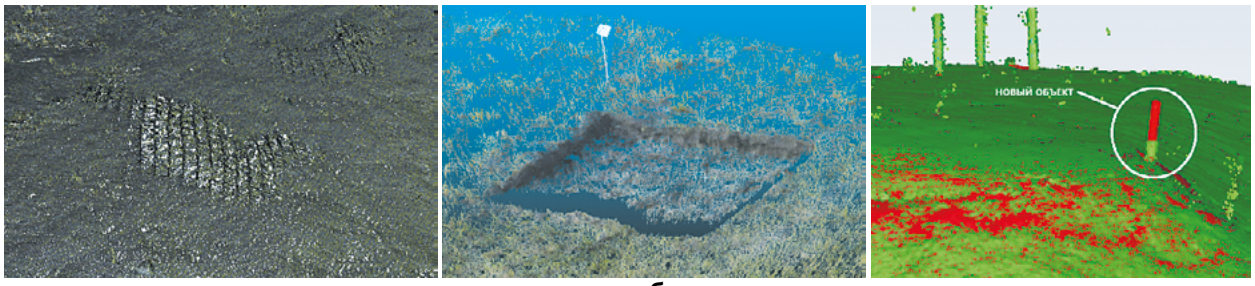


Рис. 5. Последовательность выявления деформаций



а б в

Рис. 6. Демонстрация деформаций поверхности участка грунта по данным НЛС: а) визуальное определение изменений типа покрывающего материала (оголение георешетки); б) просадки грунта и в) новых непроектных элементнов

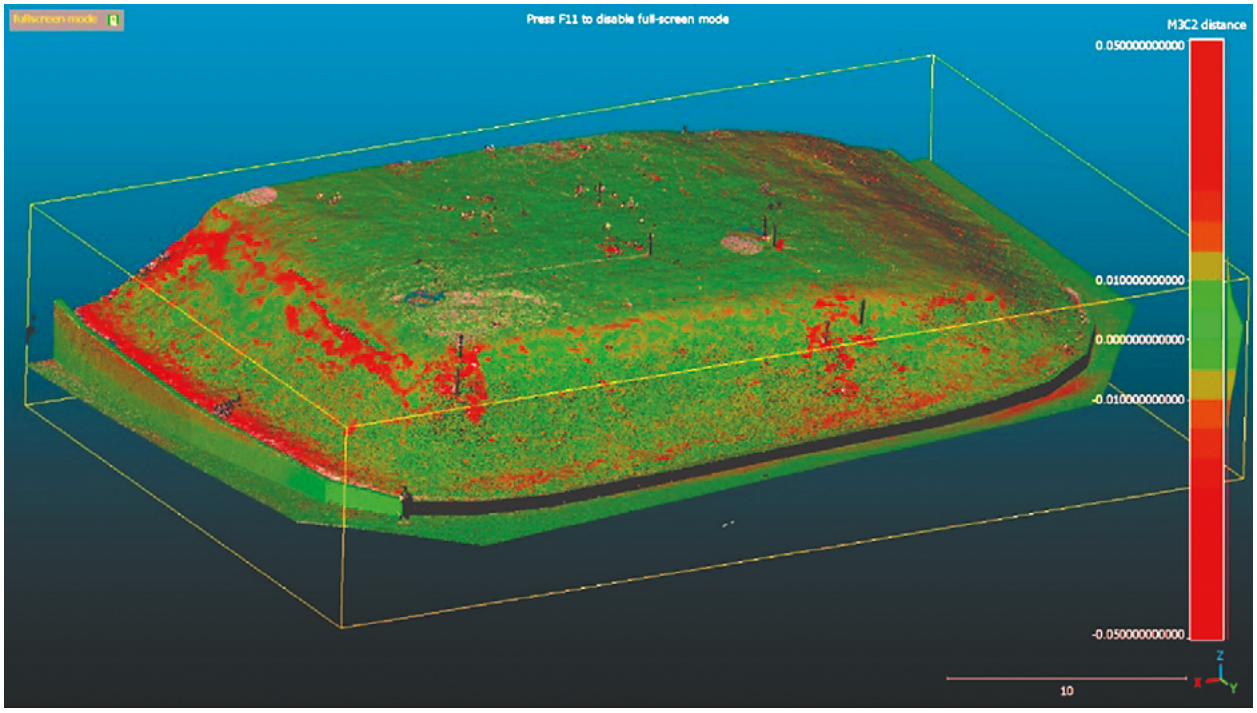


Рис. 7. Применение M3C2-алгоритма для определения деформаций поверхности участка грунта

Таблица 2. Форматы экспорта 3D-моделей деформации

Модель деформации	Тип данных	Формат выходного файла
Кластер точек лазерного отражения деформации	Набор точек	Двоичный или текстовые форматы: PCD, TXT, LAS, LAX, e57.
Модель поверхности	Трехмерная MESH-сетка	mesh
Замкнутое твердотельное трехмерное тело	Модель твердого тела (Wavefront 3D)	OBJ

Для построения ЦИМ оценки состояния ИББ ПХ РАО взята за основу существующая схема открытого формата данных IFC 4.3 [15]. Ключевой проблемой ее применения являются нестандартизированные элементы модели, в частности применение IFC-класса для отображения непосредственно деформаций ИББ. Среди возможных вариантов решения, исходя из работы [13], предложена схема описания и наследования измененных элементов через объект IfcElementAssembly. Периодическая актуализация элементов ЦИМ требует стандартизации библиотеки семейств (элементов) и IFC-классов при информационном моделировании пунктов хранения и захоронения РАО и представления результатов контроля целостности барьеров безопасности. В предложенной ЦИМ оценки состояния ИББ ПХ РАО смоделированы: объекты «деформации» (IFC-класс IfcSurfaceFeature), связи с элементом проекта (покрывающим экраном или другими компонентами ПХ/ПЗ РАО, например георешеткой), информация о проведенном цикле измерений, параметрах повреждений.

Триангуляционная сеть модели твердого тела деформации описывается IfcTriangulatedFaceSet. Связи с элементом ЦИМ «покрывающий экран» (который можно выразить нестандартизированным IFC-классом IfcCoveringScreen) задаются через IfcRelVoidsElements, определяемые характеристики (тип и параметры) целостности и стабильности «покрывающего экрана» или даже в отношении элемента «Система инженерных барьеров» — через наборы свойств класса IfcPropertySingleValue. Таким образом, сформировано представление (геометрическая фигура и параметры) и связи деформации в ЦИМ. Такой учет результатов контроля ПХ РАО в ЦИМ демонстрирует возможности комбинированного хранения данных различных видов съемки, например георадарной (по аналогии с [15]), контроля уровня грунтовых вод, радионуклидного и химического состава, фотофиксации состояния дневной поверхности. Данные, представленные как атрибуты или документы (в т. ч. организационные), процессы и объекты, объединяются посредством ассоциации элементов модели (класс IfcRelAssociatesApproval) с элементами трудовых ресурсов, юридической организации (IfcOrganization) или со связанными работами (iTasks). Это дает полное описание параметров всех видов контроля в составе ЦИМ ИББ ПХ/ПЗРАО.

По результатам апробации Методики, помимо подтверждения ее пригодности, точности измерения и оценки реализуемости, представляется важным оценить влияние поверхностных грунтовых вод на сезонные колебания дневной поверхности объекта. Влажность потенциально возможно контролировать методом НЛС, поскольку эта характеристика влияет на количество отражаемой от дневной поверхности энергии лазерного луча сканера. Вероятно, возможные колебания грунта будут фиксироваться только в отношении окружающей ПХ/ПЗ РАО территории, что, однако, требует накопления статистически значимого объема наблюдений (от 10 циклов съемки).

Выводы

Предложен состав системы мониторинга объектов захоронения РАО после закрытия. Ее основной элемент — контроль стабильности покрывающих экранов методом наземного лазерного сканирования с периодичностью раз в несколько лет. Это требует создания опорной сети и освобождения территории от древесно-кустарниковой растительности, что ограничивает период между циклами съемки 10—15 годами.

Резюмируя требования нормативной базы, можно сделать вывод, что периодический радиационный контроль должен охватывать: наблюдение за состоянием покрывающих экранов ППЗРО, размещение упреждающих знаков, меры по предотвращению стихийного роста растений и соответствие информации о ППЗРО современному уровню развития технологий.

Разработана методика проведения НЛС пунктов захоронения РАО для контроля деформаций дневной поверхности покрывающего экрана. Она основывается на создании опорной сети, применении специальных марок для наземной лазерной съемки и обеспечивает эффективность ее планирования на основе автоматизированного расчета минимизации ошибок уравнивания. Методикой зафиксированы оптимальные алгоритмы и способы решения задач: определение центра марки для НЛС, взаимное ориентирование результатов измерений, последовательность проведения деформаций (M3C2), методы расчета параметров деформаций (включая объем); предложена модель представления результатов в формате IFC, пригодном для использования в информационном моделировании.

Литература

1. *Гаврилов П. М., Антоненко М. В., Друзь Д. В., Чубреев Д. О.* Мониторинг пунктов размещения особых РАО ФГУП «ГХК» // Радиоактивные отходы. 2018. № 3 (4). С. 50—59.

2. *Мокров Ю. Г., Алексахин А. И.* Мониторинг — основа обеспечения безопасности при выполнении работ по консервации водоема Карачай // Радиоактивные отходы. 2018. № 3 (4). С. 60—68.

3. *Павлюк А. О., Котляревский С. Г., Марков С. А., Шатров М. В.* Организация и результаты мониторинга пункта хранения радиоактивных отходов, созданного при выводе из эксплуатации промышленного уран-графитового реактора ЭИ-2 // Радиоактивные отходы. 2018. № 3 (4). С. 69—77.

4. ГОСТ 24846-2019. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. Москва, 2019.

5. *Janßen J., Medic T., Kuhlmann H., Holst C.* Decreasing the Uncertainty of the Target Center

Estimation at Terrestrial Laser Scanning by Choosing the Best Algorithm and by Improving the Target Design // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. No. 7. P. 845. DOI: 10.3390/rs11070845.

6. *Lague D., Brodu N., Leroux J.* Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the Rangitikei canyon (N-Z) // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2013. Vol. 82. Pp. 10—26. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009.

7. *Wang J., Kutterer H., Fang X.* On the detection of systematic errors in terrestrial laser scanning data // Journal of Applied Geodesy. 2012. Vol. 6. No. 3—4. Pp. 187—192. DOI: 10.1515/jag-2012-0025.

8. *Kersten T. P., Lindstaedt M.* Geometric accuracy investigations of terrestrial laser scanner systems in the laboratory and in the field // Applied Geomatics. 2022. Vol. 14. Pp. 421—434. DOI: 10.1007/s12518-022-00442-2.

9. *Wujanz D.* Terrestrial laser scanning registration for geodetic deformation monitoring. Dissertationen von der Fakultat VI — planen Bauen Umwelt der Technischen Universitat Berlin zur Erlangung des academischen Grades Doktor des Ingeneuerwissenschaften genehmigte Dissertation. München, 2016. ISBN 978-3-7696-5187-4. DOI: 10.14279/depositonce-5136.

10. *Передерин Ф. В., Холодков К. И., Татаринов В. Н., Шевчук Р. В., Маневич А. И.* Наблюдения за деформациями земной поверхности на полигоне ФГУП «Радон» // Сейсмические приборы. 2022. Т. 58. № 4. С. 160—174. DOI: 10.21455/si2022.4-10.

11. *Шарафутдинова А. А.* Разработка методики наземного лазерного сканирования промышленных объектов для создания цифровых информационных моделей : дис. ... канд. техн. наук. — Санкт-Петербург, 2022. 198 с.

12. *Isailović D., Stojanovic V., Trapp M., Richter R., Hajdin R., Döllner J.* Bridge damage: Detection, IFC-based semantic enrichment and visualization // Automation in Construction. 2020. Vol. 112. P. 103088. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103088.

13. buildingSMART International, IFC4 Addenum 2 Specification. — URL: https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4/ADD2_TC1/HTML/ (дата обращения: 13.09.2019).

14. *Kazhdan M., Bolitho M., Hoppe H.* Poisson Surface Reconstruction // Eurographics Symposium on Geometry Processing, 2006.

15. *Xiang Zh., Ou G., Rashidi A.* Automated Translation of Rebar Information from GPR Data into As-Built BIM: A Deep Learning-based Approach // 2021 ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering. DOI: 10.48550/arXiv.2110.15448.

Информация об авторе

Линге Иннокентий Игоревич, главный специалист, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: iil@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Линге Ин. И. О периодическом радиационном контроле пунктов захоронения РАО // Радиоактивные отходы. 2025. № 3 (32). С. 75—85. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-3-75-85.

ON PERIODIC RADIATION MONITORING OF RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL FACILITIES

Linge In. I.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on June 23, 2025

The article considers the problems associated with the post-closure evaluation of engineered safety barriers at RWDF and their condition and the need for a periodic radiation monitoring of RWDF. Limited in its scope to near-surface radioactive waste disposal facilities (NSDF) only, the study addresses the following tasks: (1) it presents the main regulatory requirements and trends supporting further development of the regulatory framework with respect to integrity control and evaluation of NSDF engineered safety barriers and their condition; (2) it analyzes national experience in monitoring the integrity of engineered safety barriers at radioactive waste storage facilities (RWSF); (3) it describes a methodology for the ground-based laser survey of the daytime surface at NSDFs developed to monitor the changes on the surface of the covering screen over long-term periods; (4) it discusses the proposals regarding the presentation of monitoring findings as part of the NSDF digital information model (DIM). It summarizes the achieved results, in particular: the procedure for "periodic post-closure radiation monitoring of RWDF" should be specified in the regulatory framework taking into account the monitored early warning indicators, the monitoring procedures and schedule; a Methodology has been developed to monitor the deformations of the cover barrier; the level of data digitalization on the state of RWDF EBS has been analyzed to support information modeling.

Keywords: *radioactive waste, storage facility, special RW isolation facilities and RW disposal facilities (RWDF), ground-based laser survey, Model-to-Model Cloud Comparison (M3C2) algorithm, information modeling, Industry Foundation Classes (IFC).*

References

1. Gavrilov P. M., Antonenko M. V., Druz D. V., Chubreev D. O. Monitoring punktov razmeshcheniya osobykh RAO FGUP "GKHK" [Monitoring the Points of Special RAW Placement at FSUE "MCC"]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste,* 2018, no. 3 (4), pp. 50—59.

2. Mokrov Yu. G., Alexakhin A. I. Monitoring — osnova obespecheniya bezopasnosti pri vypolnenii rabot po konservatsii vodoyema Karachay [Monitoring as the Basis for Ensuring Safety of Karachay Lake Closure Implementation]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste,* 2018, no. 3 (4), pp. 60—68.

3. Pavliuk A. O., Kotlyarevskij S. G., Markov S. A., Shatrov M. V. Organizatsiya i rezul'taty monitoringa punkta khraneniya radioaktivnykh otkhodov, sozdannogo pri vyvode iz ekspluatatsii promyshlennogo uran-grafitovogo reaktora EI-2 [Monitoring of RW Storage Facility Built as a Result of EI-2 Uranium-Graphite Reactor Decommissioning]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste,* 2018, no. 3 (4), pp. 69—77.

4. GOST 24846-2019. *Grunty. Metody izmereniya deformatsiy osnovaniy zdaniy i sooruzheniy* [Soils. Measuring methods of strains of structures and building bases]. Moscow, 2019.

5. Janßen J., Medic T., Kuhlmann H., Holst C. Decreasing the Uncertainty of the Target Center Estimation at Terrestrial Laser Scanning by Choosing the Best Algorithm and by Improving the Target Design. *Remote Sensing,* 2019, vol. 11, no. 7, p. 845. DOI: 10.3390/rs11070845.

6. Lague D., Brodu N., Leroux J. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,* 2013, vol. 82, pp. 10—26. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009.

7. Wang J., Kutterer H., Fang X. On the detection of systematic errors in terrestrial laser scanning data. *Journal of Applied Geodesy,* 2012, vol. 6, no. 3—4, pp. 187—192. DOI: 10.1515/jag-2012-0025.

8. Kersten T. P., Lindstaedt M. Geometric accuracy investigations of terrestrial laser scanner systems in the laboratory and in the field. *Applied Geomatics,* 2022, vol. 14, pp. 421—434. DOI: 10.1007/s12518-022-00442-2.

9. Wujanz D. Terrestrial laser scanning registration for geodetic deformation monitoring. Dissertationen von der Fakultat VI — planen Bauen Umwelt

der Technischen Universitat Berlin zur Erlangung des academischen Grades Doktor des Ingeneuerwissenschaften genehmigte Dissertation. München, 2016. ISBN 978-3-7696-5187-4. DOI: 10.14279/depositonce-5136.
10. Perederin F. V., Kholodkov K. I., Tatarinov V. N., Shevchuk R. V., Manevich A. I. Nablyudeniya za deformatsiyami zemnoy poverkhnosti na poligone FGUP "Radon" [Observations of Earth surface deformations at the FSUE "Radon" test site]. *Seysmicheskiye pribory — Seismic Instruments,* 2022, vol. 58, no. 4, pp. 160–174. DOI: 10.21455/si2022.4-10.
11. Sharafutdinova A. A. *Razrabotka metodiki nazemnogo lazernogo skanirovaniya promyshlennykh ob"yektov dlya sozdaniya tsifrovykh informatsionnykh modeley* [Development of a terrestrial laser scanning methodology for industrial facilities supporting the development of digital information models], Doctors thesis, Saint- Petersburg, 2022. 198 p.
12. Isailović D., Stojanovic V., Trapp M., Richter R., Hajdin R., Döllner J. Bridge damage: Detection, IFC-based semantic enrichment and visualization. *Automation in Construction,* 2020, vol. 112, p. 103088. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103088.
13. buildingSMART International, IFC4 Addenum 2 Specification. — URL: https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4/ADD2_TC1/HTML/ (accessed on: 13.09.2019).
14. Kazhdan M., Bolitho M., Hoppe H. Poisson Surface Reconstruction. *Eurographics Symposium on Geometry Processing,* 2006.
15. Xiang Zh., Ou G., Rashidi A. Automated Translation of Rebar Information from GPR Data into As-Built BIM: A Deep Learning-based Approach. 2021 *ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering.* DOI: 10.48550/arXiv.2110.15448.

Information about the author

Linge Innokentiy Igorevich, Senior specialist, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: iil@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Linge In. I. On Periodic Radiation Monitoring of Radioactive Waste Disposal Facilities. *Radioactive Waste*, 2025, no. 3 (32), pp. 75—85. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-3-75-85. (In Russian).