

О цифровой интеграции радиационных измерений с данными наземной лазерной съемки

Рассмотрена проблематика применения наземной лазерной съемки для задач обеспечения безопасности объектов использования атомной энергии. Наибольшее внимание уделено вопросам вывода из эксплуатации и контроля объектов размещения радиоактивных отходов (приповерхностные пункты захоронения и пункты консервации особых РАО) на стадиях после закрытия и долговременной выдержки. Показано, что цифровые информационные модели являются наилучшей средой для концентрации всех необходимых для вывода из эксплуатации и обоснования безопасности типов данных. Рассмотрены вопросы сопряжения данных цифровых моделей объектов с данными радиационных обследований и иных изысканий. Предложено применение наземной лазерной съемки совместно с радиационными обследованиями и иными изысканиями с сохранением результатов в формате IFC.

Ключевые слова:

энергоблоки АЭС, объекты ядерного топливного цикла (ЯТЦ), радиоактивные отходы (РАО), пункты консервации особых РАО и пункты захоронения РАО (ПЗРО), наземная лазерная съемка, радиационные измерения, безопасность.

И.И.Линге

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), г. Москва

Технология наземного лазерного сканирования (НЛС) относится к цифровым технологиям, которые качественно изменяют общую картину натуральных данных и методологию изыскательских работ. Рынок наземных лазерных сканеров уже более 15 лет показывает устойчивый рост продаж как в России, так и по всему миру [1]. Технические характеристики сканеров и функции автоматизированной обработки данных съемки постоянно совершенствуются и доходят до показателей точности измерения линейного расстояния в 0,3 мм на 10 м от прибора до точки лазерного отражения (ТЛО). Это обеспечило расширение практики применения НЛС в изыскательских, контрольно-надзорных, аналитических и исследовательских задачах, а также в задачах контроля деформаций как капитальных объектов на каждой стадии жизненного цикла, так и природных объектов (оползни, карьеры) и объектов биосферы.

В отношении объектов использования атомной энергии метод НЛС применяется для актуализации конструкции объекта [2] на основе полученного цифрового образа объекта, подлежащего выводу из эксплуатации (ВЭ), отражающего фактическое состояние объекта – модели облака ТЛО от поверхности объекта ВЭ и его частей. Для многих объектов ВЭ данные НЛС стали основным источником информации для оценки объемов образующихся РАО, разработки и оптимизации проектов ВЭ с применением технологии информационного моделирования (ТИМ). Как отмечается в [3], потенциал применения цифровых технологий в повышении эффективности работ по выводу из эксплуатации и обращению с РАО лежит в процессах проведения и анализа результатов комплексного инженерного и радиационного обследования (КИРО), при оценке объемов образования РАО, проектировании и оптимизации работ по ВЭ, при рассмотрении и согласовании проекта ВЭ и непосредственно при демонтаже объекта ВЭ. Особо перспективными для цифровизации являются процессы извлечения знаний при управлении объектами ВЭ на стадиях жизненного цикла: после окончательного останова, подготовки и реализации дезактивационных работ, проектировании работ по ВЭ, снятии с регулирующего контроля по завершении ВЭ. Цифровизация этих процессов влечет актуализацию методик измерений. Очевидно, что цифровая информационная модель (ЦИМ) должна стать поставщиком информации о состоянии объекта для участников иных процессов и задач, а цифровой формат передачи данных – универсальным поставщиком измерений об объекте (радиационные, георадарные, пространственные геометрические измерения или иные данные).

С учетом изложенного в статье кратко рассмотрено: оборудование и программное обеспечение, необходимое для применения метода НЛС; применение НЛС для задач за-

вершающих стадий жизненного цикла объектов использования атомной энергии; особенности радиационных измерений и иных изысканий в целях обеспечения безопасности и вопросы цифрового сопряжения данных различного рода измерений, в том числе радиационных. Сразу отметим, что имеющийся опыт интеграции данных в рамках ЦИМ, объектов и площадок их размещения пока реализован в упрощенном варианте – путем включения отчетных данных в ЦИМ ручным способом с практической утратой точных данных с погрешностью геопозиционирования порядка 0,1 м. Во многих случаях это обстоятельство препятствует восстановлению объективной картины состояния объекта и его радиационных характеристик и, в конечном итоге, получению реалистичных оценок объемов РАО при выводе из эксплуатации и решению многих других задач.

Особенности применения НЛС

При наземной лазерной съемке осуществляется сканирование пространства вокруг сканера за счет движения прибора (блока лазерного луча) в двух плоскостях (рис.1). Съемка осуществляется путем детектирования отраженного от поверхности объекта лазерного луча (углов поворота сканера и лазерного блока, интенсивности сигнала, времени прохождения). Полученное значение определяет основные характеристики ТЛО: приборные координаты x , y , z , время и интенсивность отправленного и отраженного от поверхности объекта в конкретной точке сигнала лазерного луча. При фотопанорамной съемке эти данные дополняются значением цвета в формате RGB. Съемка данных осуществляется с каждого места установки сканера на местности или в помещении здания (станция сканирования). В среднем во время съемки крупного объекта может потребоваться до 2–3 тысяч станций сканирования. Для площадки ФГУП «РАДОН» в районе Сергиева Посада, например, потребовалось

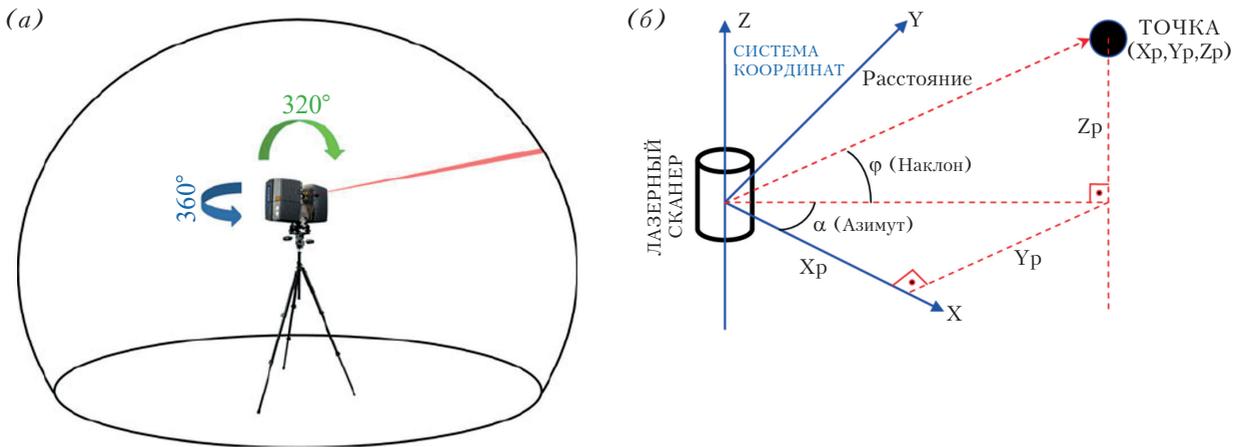


Рис.1. Пространственные измерения наземного лазерного сканера: (а) – рабочие плоскости движения сканера во время работы, (б) – принцип измерения положения точки лазерного отражения в пространстве системы координат сканера.

900 станций, в том числе более 200 в помещениях [4]. При этом топология размещения станций сканирования на открытых площадных объектах схожа с размещением точек радиационного замера при обследованиях. При съемке внутри помещений ситуация более сложная – частота расположения станций сканирования возрастает при наличии оборудования, как зачастую и при проведении основного объема радиационных измерений – площадных измерений мощности дозы и плотности потока частиц.

Для точности НЛС принципиальное значение имеет процедура уравнивания данных НЛС (облаков точек, полученных с разных станций сканирования, рис.1а). Уравнивание может быть выполнено: алгоритмическими методами (ICP-алгоритм [5] и его вариации); по контрольным опорным мишеням (маркам для уравнивания); координатным методом путем приведения совместной съемки координат глобальной навигационной спутниковой системой и НЛС.

Применение методов алгоритмического уравнивания данных НЛС ограничивается только съемкой внутренних помещений и частично фасадов зданий и сооружений. Для качественного выполнения алгоритма (напри-

мер, итеративным алгоритмом ближайшей точки (Iterative closest point)) уравнивания двух облаков точек важен параметр перекрытия облаков точек, то есть в каждом облаке точек должны содержаться стабильные, большие и размещенные в каждой из трех плоскостей ортогональной системы координат области одинаковой поверхности объекта съемки (до 50–70 % от всех ТЛО станции сканирования). Опыт показал, что применения алгоритмического уравнивания для получения единого облака точек крупных промышленных объектов типа здания и сооружения для задач вывода из эксплуатации достаточно. Однако для задач долговременного мониторинга состояния объектов требуется опорная сеть.

Совместная ГНСС и НЛС особо широко применяется для крупных природных и техногенных объектов (горных участков, оползней, карьеров, отвалов и пр.) с целью контроля опасных процессов на кратко- и среднесрочном горизонте. Главным ее достоинством является автоматическое уравнивание всех станций сканирования (более 100 для крупных проектов) по координатам центров станций сканирования, полученных ГНСС-методом непосредственно во время проведения лазерной съемки (рис.2д). Основную погреш-

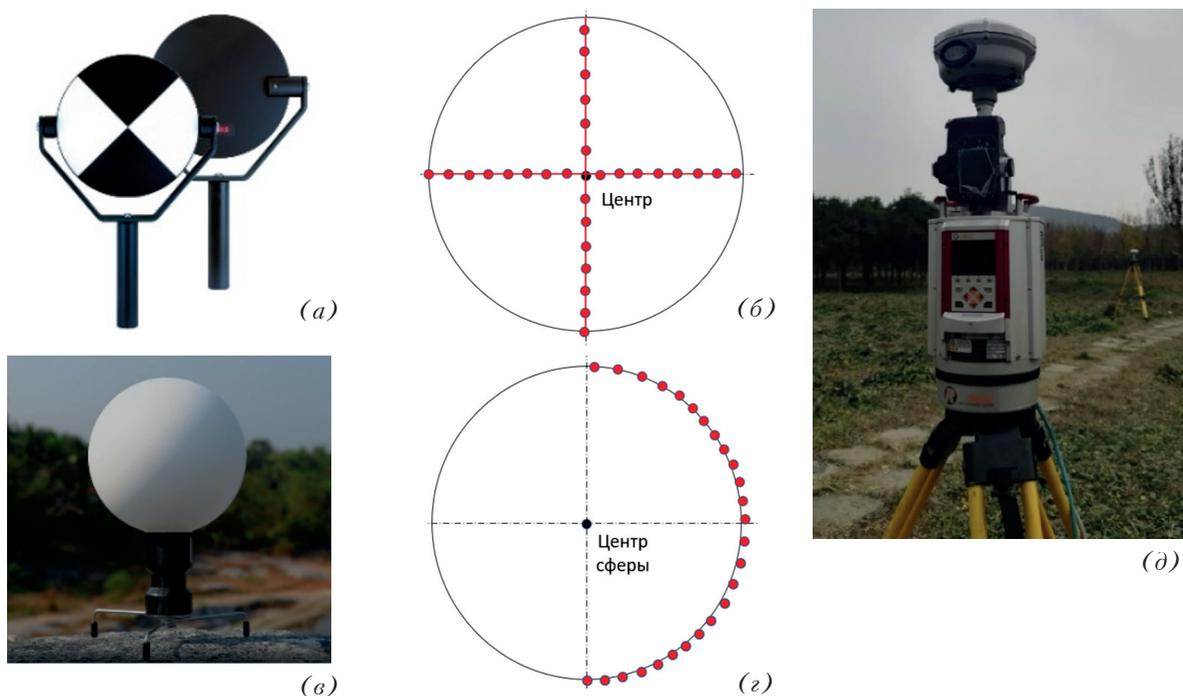


Рис.2. Марки и контрольные точки (центры): (а) – плоская марка, (б) – восстановление точки центра плоской марки (красным – ТЛО), (в) – сферическая марка, (г) – восстановление точки центра сферы (красным – ТЛО), (д) – совмещение ГНСС-приемника на лазерном сканере.

ность в уравнивание вносит, соответственно, погрешность ГНСС-метода. Недостатком метода высокоточной ГНСС-съемки является длительность точного определения координат (до нескольких часов).

Отметим отдельно опыт создания опорной сети для контроля объектов захоронения РАО, в том числе такого сложного объекта, как В-9 [6]. Опыт проведения такого рода классической геодезической съемки говорит о серьезных трудозатратах существующих методов, отсутствии решения по представлению результатов контроля объектов в цифровой форме.

В последние десятилетия получили широкое развитие методы сравнения облаков точек с целью выявления изменений (деформаций поверхности), среди них: трехмерное сопоставление поверхностей методом наименьших квадратов (least squares 3D surface matching, LS3D) развитый в [7] и [8], метод аффинного преобразования двух циклов съемки и его разложении на поступательные и вращательные

движения поверхности [9], алгоритм кусочного выравнивания (piecewise alignment method), основанный на итеративном алгоритме определения ближайшей точки (ICP) для автоматического вычисления поля смещения [10]. В [11] при анализе метода НЛС для контроля деформаций отмечается вопрос строгости и эффективности методов обработки облаков точек для обнаружения изменений и анализа деформации, а также, что НЛС способна обнаруживать деформации в миллиметровом диапазоне. Отмечается перспективность методик, учитывающих классические геодезические методы и НЛС, а также то, что применимость контроля деформаций на основе НЛС требует строгой привязки данных НЛС, три перспективных метода в составе алгоритма сравнения облаков точек – многомасштабное сравнение модели с моделью облака (the Multiscale Model to Model Cloud Comparison, МЗС2), метод кусочного выравнивания и метод точечной оценки от блока к блоку. Определенные коллизии,

связанные с применением алгоритма МЗС2, поясняет рис.3.

Традиционные методы сравнения облаков точек: облако–облако (С2С, рис.3а), облако–модель (С2М, рис.3б) и алгоритм МЗС2 (рис.3в), том числе его вариант МЗС2-PM-алгоритм [12], в котором оцениваются перемещения путем сравнения соответствий в объекте, а не в евклидовом пространстве, что не соответствует нормативному определению горизонтальных и вертикальных деформаций. Эти алгоритмы развиваются, в частности, в работе [13] (2020 г.) предложена новая среда на основе трехмерных векторов смещения (Feature to Feature Supervoxel-based Spatial Smoothing, F2S3, рис.3г). Метод F2S3 чувствителен как к параллельному, так и к ортогональному движению относительно поверхности. Черные стрелки (рис.3г) обозначают предполагаемые векторы смещения. Апробация автоматизированной версии алгоритма показывает достаточно высокую эффективность при обработке больших объемов данных (несколько часов) [14]. Однако полностью корректным подходом сравнения облаков, снимающим неопределенности обработки, является сравнение облаков точек в привязке к опорной системе координат (опорной сети). При этом ключевой характеристикой изменений между облаками точек будут параметры трехмерного тела идентифицируемой деформации покрывающего экрана.

На рис.4 приведен пример сравнения облаков точек для конкретного грунтового могильника с разницей в циклах измерений в 3 года.

По результатам применения алгоритма МЗС2 каждой точке модели присвоены значения рассчитываемого МЗС2-расстояния, отражающего смещение между облаками точек двух циклов съемки по направлению нормали к поверхности. Красные области на рисунке отражают деформации дневной поверхности покрывающего экрана более 5 см, зеленые – отклонения между двумя циклами съемок менее 1 см. Этот же метод применен на данных модельного эксперимента по оценке вертикальных деформаций (рис.5), в рамках которого оценены вертикальные деформации грунта (подъемы и провалы, № 1, 4, 7, рис.4) и алгоритм идентификации такого рода деформации. Как показывают результаты эксперимента, изменения грунта более 5 см (подъемы и провалы) однозначно идентифицируются по данным НЛС (№ 3, 6, 9 рис.4). При этом граница области деформации формально может быть определена по ТЛО, но на практике требует расширения до 5 см вокруг подъема или провала ввиду неоднородной структуры поверхности в данных НЛС. Подобное предположение для грунтовых поверхностей не мешает решению практических задач определения деформаций.

Опыт полевых работ по наземной лазерной съемке сканером Leica RTC360 показал, что установка сканера на высоте 1,6–2,0 м обеспечивает стандартные потребности в съемке с расстоянием между станциями 20–30 м для съемки фасадов зданий и сооружений. Для обеспечения качественного угла покрытия применяют различной высоты штативы и мачты,

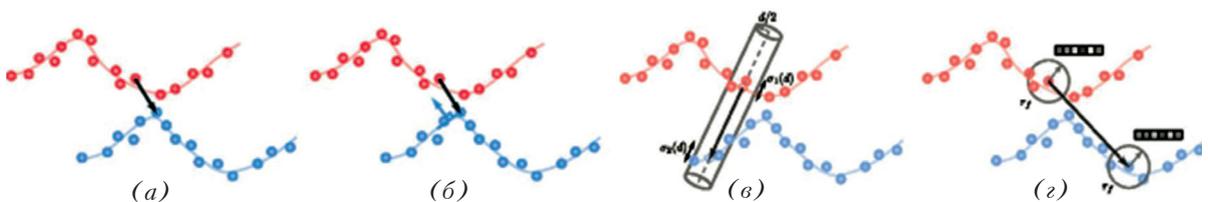


Рис.3. Методы сравнения облаков точек: (а) – облако–облако (С2С), (б) – облако–модель (С2М), (в) – многомасштабное сравнение облаков от модели к модели (multiscale model-to-model cloud comparison, МЗС2 [12]), (г) – функция пространственного сглаживания на основе супервокселей (F2S3). Синим цветом – смещенное облако точек, красным – точки нулевого цикла съемки.

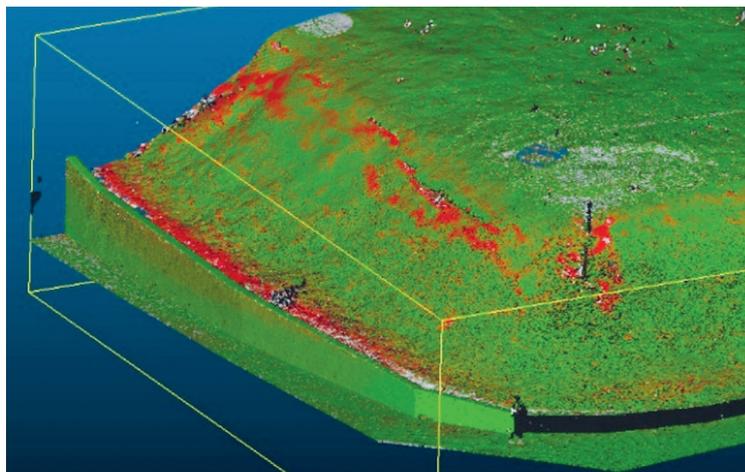


Рис.4. Пример сравнения дневной поверхности покрывающего барьера ПХ РАО методом МЗС2.

подбирая оптимальную высоту и соотношение угла падения лазерного луча на рабочую поверхность съемки. Для обеспечения уравнивания данных с различных мест сканирования применяются чаще плоские марки для уравнивания. Для привязки к опорной сети рациональнее использовать стационарные точки опорной сети. В работах со сканером принимает участие небольшая команда (от 1 до 3 человек в зависимости от объема съемки и применения марок для уравнивания или дополнительных геодезических привязок).

Время может быть оценено от 2 до 10 минут на съемку с одного места сканирования (одна станция сканирования) в зависимости от сложности установки станции и условий для уравнивания результатов съемки и иных обеспечивающих мер.

Последующая камеральная обработка включает такие операции, как импорт и конвертирование данных из приборного формата данных НЛС,

предварительная фильтрация ТЛО, распознавание образа ТЛО марок для уравнивания, определение точки центра марки, уравнивание облаков точек, преобразование координат (приведение к системе координат опорной сети), фильтрация ТЛО (устранение ТЛО шума, обрезка файла проекта облака точек). В отношении инструментов стоит отметить высокую долю импортного ПО [15] для автоматизации операций камеральной обработки данных НЛС. Ряд программных библиотек (PointNet++, PCL, Open3D, PyMeshLab,

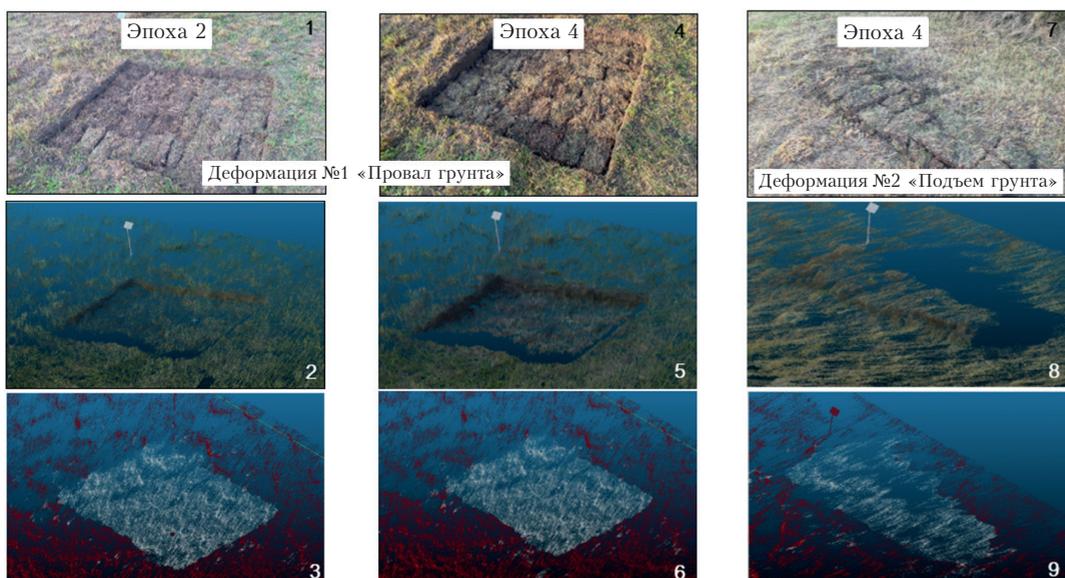


Рис.5. Идентификация вертикальных деформаций грунта МЗС2-алгоритмом по данным НЛС.

TensorFlow и PyTorch и пр.) позволяет автоматизировать специальные задачи обработки данных.

В отношении контроля деформации дневной поверхности ПЗРО по данным НЛС оценка точности проводимых измерений включает в себя оценку погрешности Методики съемки, оценку погрешности измерения линейных параметров деформаций по модели облака точек, оценку стабильности опорной сети. Работы по развитию математического обоснования оценки точности НЛС [16,17] и погрешности съемки современных моделей сканеров (Leica RTC360, P50, FARO FOCUS 3D X330, VZ-440i, Z+F 5016i) [18] периодически актуализируются.

Сегодня можно констатировать, что для задач актуализации пространственных характеристик объекта, необходимых при разработке проекта ВЭ и в работах по ВЭ, состояние приборной базы НЛС и существующего ПО для обработки данных НЛС может быть охарактеризовано как развитое на высоком уровне. Методы сравнения результатов НЛС-съемки различных циклов съемки (облака точек различных временных периодов) с целью идентификации и классификации выявленных деформаций могут быть охарактеризованы как развивающиеся высокими темпами и могут быть автоматизированы.

Применение наземной лазерной съемки для задач вывода из эксплуатации и контроля состояния пунктов хранения РАО

В России применение наземной лазерной съемки для задач вывода из эксплуатации началось более 15 лет назад, прежде всего на энергоблоках АЭС [19]. Первые задачи, на которые было ориентировано применение НЛС – учет отличий фактически существующих сооружений и установленного оборудования от предусмотренных проектом решений (план/факт анализ) при создании цифровых моделей энергоблоков. На основе этих цифро-

вых моделей последовал первый опыт применения технологий информационного моделирования, в том числе для задач отработки монтажа графитовой кладки, подготовки персонала и ряда других [20]. В силу ряда обстоятельств, среди которых обилие данных по радиационным характеристикам, наличие большой доли короткоживущих радионуклидов, а для многих энергоблоков и продолжение эксплуатации, задача цифровизации данных о радиационных характеристиках, в том числе из состава КИРО, для энергоблоков АЭС не определялась как наиболее актуальная.

Принципиально иная ситуация с выводом из эксплуатации объектов ядерного топливного цикла. Работы по созданию цифровых информационных моделей объектов ЯТЦ были начаты в 2018 году, в том числе с участием автора [4,21]. К настоящему времени созданы ЦИМ более 120 объектов различных типов (производство ядерного топлива, радиохимические производства, исследовательские установки, пункты хранения РАО различных типов и т. д.), проанализированы десятки отчетов о проведении КИРО с включением данных в ЦИМ, применены методы геостатистики для определения дефицитов радиационных измерений, выполнены предпроектные оценки объемов и классов РАО от вывода из эксплуатации [22]. К принципиальным особенностям этих работ относится тот факт, что для объектов, созданных 50 и более лет тому назад с утраченной на момент ВЭ первичной проектной документацией, лазерное сканирование стало практически основным инструментом создания ЦИМ объектов и проектирования работ по демонтажу. Создание цифровой информационно-радиационной модели объекта на основе данных КИРО – это несовершенный способ интеграции и анализа необходимых для разработки проекта ВЭ данных, поскольку основной способ привязки данных ради-

ационных измерений – это принципиальная схема обследования с погрешностями метрового порядка. По итогам рассмотрения этих работ на заседании НТС № 10 Госкорпорации «Росатом» (октябрь 2023 г.) и стратегической сессии по выводу из эксплуатации в Санкт-Петербурге (декабрь 2023 г.) были сделаны выводы о первоочередности перехода к цифровому КИРО как ключевому условию разработки эффективного проекта ВЭ. По сути, речь идет о повышении точности основного объема радиационных измерений на порядок.

Еще одним перспективным применением НЛС является контроль стабильности покрывающих экранов приповерхностных пунктов захоронения РАО после их закрытия, а также пунктов консервации особых РАО на этапе их долговременной выдержки до преобразования в пункты захоронения. Действующая нормативная база в области требований по контролю после закрытия ПЗРО содержит много указаний на его необходимость. В том числе статьей 13 Федерального закона от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» предусмотрено новое понятие «периодического радиационного контроля» на территории размещения такого пункта захоронения после его закрытия, который должен быть предусмотрен проектом пункта захоронения РАО. Очевидно, что контроль целостности покрывающих барьеров определяет, что по отношению к ПЗРО могут иметь место только неразрушающие методы контроля. В данной статье автор предлагает подходы к организации одновременных или сопряженных иными способами обследований, включающих лазерную съемку, радиационные измерения и иные методы изысканий покрывающих экранов пунктов хранения РАО.

Таким образом, задачи ВЭ и контроля барьеров безопасности пунктов консервации

и захоронения РАО определили запрос на формирование и последующее применение интегрированных пространственных данных, включающих пространственную модель объекта или его части с данными радиационного и иных обследований и изысканий. Очевидно, что такие пространственные данные должны поставляться заинтересованным участникам ЖЦ объекта в рамках технологии информационного моделирования. Различные методы получения пространственных данных могут предусматривать как приборно-программные средства для интеграции данных радиационных измерений с данными лазерного сканирования, так и иные методы сопряжения для применения различных методов обработки и представления данных. Отметим, что задачи информационной поддержки ВЭ (проектирования и собственно работ по ВЭ) и долговременного контроля принципиально отличаются. В первом случае речь идет об интеграции и обобщении данных для решения разовой задачи, но с широким полем задач цифровизации [3]. При этом точное позиционирование результатов измерений является вспомогательной задачей, уточняющей оценку объемов РАО. Во втором случае – о выявлении нарушений стабильности системы барьеров с последующим анализом возможных причин их возникновения и оценкой долговременных последствий, которые возможны только в случае сопоставимости измерений в одной и той же точке. По этой причине НЛС как способ детального описания поверхностей покрывающих экранов пункта захоронения не имеет конкурентов.

Комплексные инженерно-радиационные обследования

При проведении радиационных измерений ориентируются, как правило, на три методических документа [22–24], в которых не содержится требований к точности позициониро-

вания радиационных измерений. В качестве средств измерения часто используется дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с блоками детектирования БДКГ-03, БДПА-01, БДПБ-01, которые имеют примерно одинаковые массогабаритные характеристики: диаметр до 80 мм, высота до 300 мм, вес до 0,6 кг каждый. Производители приборов отмечают наличие интеллектуального блока детектирования бета-излучения БДПБ-01, который может входить в комплект поставки дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М, а также работать автономно в реальном режиме времени путем подключения через кабель к ПЭВМ. Применение дозиметрических приборов со встроенными устройствами геопозиционирования на основе глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС) и/или системы позиционирования (GPS) принципиально не меняет ситуации, поскольку точность оперативного определения местоположения лежит в диапазоне 3–4 метров [25], что недостаточно для многих практических приложений.

Размещение точек радиационных замеров близко к схемам, применяемым при НЛС. Наиболее простым способом интеграции данных радиационных измерений и лазерного сканирования является непосредственное проведение радиационных замеров в точках станций сканирования с помощью дополнительной консоли на геодезической треноге для установки или позиционирования дозиметрических приборов. В этом случае будут полностью исключены погрешности координатной привязки замеров, упростится привязка дополнительных замеров, в том числе по контролю наличия снимаемого радиоактивного загрязнения методом снятия мазков с обследуемых поверхностей и взятия проб материалов стен и пола и многие другие. Последующая интеграция данных радиационных измерений в ЦИМ в этом случае не составит проблем, а оценка площадных и объемных характеристик РАО

будет избавлена от неопределенностей квадратичного характера.

Актуальна интеграция в ЦИМ данных НЛС и иных видов изысканий, проводимых в рамках КИРО. В особой мере это касается неразрушающих методов контроля, которые позволяют судить о распространении ареала загрязнения на значительных глубинах по косвенным показателям на расстоянии. В этом случае только сопоставление данных измерений за различные периоды, но выполненных в фиксированных точках, может дать объективную информацию о развитии негативных процессов. Так, например, применяемый в практике обследования бассейнов-хранилищ РАО метод радиоэлектронного зондирования (георадарного обследования) позволяет получить зависимости удельного электрического сопротивления (УЭС) в экране и подэкранной толще на глубинах до 20–30 метров. При разовом обследовании этот метод дает качественную картину состояния объекта. Сравнение данных различных циклов такой съемки возможно по двум вариантам: (1) путем сравнения рядов функции УЭС различных циклов наблюдения, взятых в одной точке зондирования, (2) путем импорта результатов георадарной съемки в среду моделирования, например, в цифровую информационную модель и сравнения соответствующих элементов уже в модели. Очевидно, что, по крайней мере, сравнение рядов функции УЭС сильно зависит от однозначного взаимного сопоставления точек зондирования. Обеспечение точной привязки точек зондирования мало встречается в работах по георадарному мониторингу.

Наличие ЦИМ результатов изысканий открывает широкие возможности оценки и прогнозирования состояния объекта, которые становятся еще более практически значимыми за счет интеграции данных иных инженерных изысканий и применения специальных методов анализа, в том числе с применением

нейронных и иных систем распознавания образов. В качестве примера можно привести работу [26] по решению задачи представления результатов георадарной съемки в составе ЦИМ. Предлагаемый автором подход к увязке данных георадара и ЦИМ основан на распознавании образов объекта с применением нейронной сети Faster R-CNN и последующей локализацией данных обработки в 3D-модели. Основной вывод [26] заключается в том, что предложенный метод может точно преобразовывать арматурные стержни из данных георадара в соответствующие элементы ЦИМ. По мнению автора, вполне правомерно выставить гипотезу о реализуемости аналогичного метода моделирования границ инженерных барьеров безопасности в составе ЦИМ по данным анализа циклов УЭС.

О периодическом радиационном контроле пунктов консервации и пунктов захоронения РАО

Предпосылкой данной работы является принцип контроля пунктов консервации и ПХ захоронения РАО после их закрытия. С учетом предполагаемой эволюции ПЗ РАО оптимальным представляется осуществлять контроль радиационных характеристик и целостность инженерных барьеров как в части дневной поверхности, так и скрытых (подземных) элементов системы инженерных барьеров безопасности. Для осуществления такого контроля определены такие технологии изысканий как наземное лазерное сканирование и георадарная съемка. Автором настоящей статьи предложен метод комбинированной НЛС и сбора радиационных характеристик ПЗ РАО (далее – Метод комбинированной съемки). Применение такого метода позволит оптимизировать объем натурных работ, проводимых с периодичностью в 5–10 лет, и обеспечит интеграцию данных. При наличии признаков изменения покрывающих экранов или установ-

ления фактов появления значимых деформаций последующие циклы обследований сопровождаются в местах локализации деформаций дополнительной георадарной и/или радиоэлектромагнитной съемкой. По итогам очередного обследования методом комбинированной съемки предполагается заключение, в котором фиксируется: стабильность внешних поверхностей покрывающих экранов и параметры радиационной обстановки на объекте; наличие незначительных изменений с рекомендацией на последующих циклах съемки дополнительных изысканий; наличие деформаций покрывающих экранов, требующих углубленного анализа. В настоящее время методика разработана и проходит апробацию.

Комбинированная методика наземной лазерной съемки и радиационного оборудования

Методика комбинированной съемки направлена, во-первых, на проведение радиационных измерений приповерхностных пунктов хранения РАО или ПЗРО в привязке к пространственным данным, а, во-вторых, на контроль деформаций дневной поверхности. Развитие Методики может быть продолжено за счет включения данных георадарной съемки.

Методика предусматривает выполнение следующих работ по объекту:

- определение границ участка объекта для проведения наземной лазерной съемки;
- создание опорной сети (ОС) для контроля деформаций объекта, включая назначение класса точности определения деформаций и закладку пунктов ОС вокруг участка съемки;
- выполнение подготовительных работ по НЛС на объекте, включая расчет измерительного объема НЛС, разработку программы и плана НЛС, проверку исполнения требований ФНП по отсутствию растительности (НП-069-14, раздел 2, пункты 23, 70);

- проведение цикла радиационных измерений и НЛС дневной поверхности объекта;
- определение деформаций объекта по результатам сопоставления текущего состояния дневной поверхности с различными циклами съемки;
- формирование заключения по оценке состояния инженерного барьера безопасности (покрывающего экрана) с установлением фактов: отсутствия изменений; наличия деформаций (изменений), не существенных для безопасности, но требующих внимания на последующих циклах съемки; значимых для безопасности деформации, требующих углубленного анализа и, при необходимости, корректирующих мер.

Создание и сопровождение опорной сети для контроля деформаций дневной поверхности ПЗРО, а также проверка ее стабильности осуществляется на основе существующих нормативных требований и классических задач (например, ГНСС-съемкой).

Непосредственно метод комбинирования радиационных измерений и данных НЛС заключается в геопривязке данных замеров (маршрута радиационного обследования – последовательности точек замера) к пространственной модели объекта (облака точек дневной поверхности ПЗРО), получаемого методом НЛС. Отметим, что потребность в размещении точек радиационного замера на дневной поверхности ПЗРО примерно уместается в расстояния между станциями сканирования НЛС (15–20 м), в свою очередь, определяемыми из методических требований к точности уравнивания облаков точек. Для задач контроля радиационного состояния объекта этих расстояний необходимо и достаточно. Это означает, что оптимально соединить геопозиционирование станции сканирования и точки замера. Рекомендациями к методу геопривязки

радиационных замеров могут быть: во-первых, мобильное крепление радиационного детектора на штатив лазерного сканера во время съемки на каждой станции сканирования, во-вторых, вынос в натуру временных идентификационных знаков для привязки точки замера или привязка маршрута (пути) радиационных замеров к опорным пунктам и соответственно конвертация координат точек замера в систему координат опорной сети контроля деформаций. Реализация этих методов не требует особых экономических затрат и может быть осуществлена в современном ПО для обработки данных НЛС, геодезических изысканий, систем автоматизированного проектирования, или информационного моделирования, или автоматизировано программным способом самостоятельно.

Методы определения деформаций двух циклов съемки, определенные в Методике, основываются на визуальном анализе облаков точек, кластеризации ТЛО по интенсивности, алгоритмах расчета расстояния между облаками точек (M3C2 и F2S3). По результатам расчета расстояний между облаками точек осуществляется кластеризация ТЛО деформаций, создание простых моделей деформации дневной поверхности покрывающего экрана ПЗРО и вычисление параметров деформаций и импорт в формат цифровой информационной модели (IFC) упрощенной модели деформации с сохранением параметров деформаций и точек радиационного контроля.

Таким образом, Методика обеспечивает, во-первых, единую модель данных по радиационному контролю, состоянию покрывающего экрана ПЗРО и проекта ПЗРО в составе цифровой информационной модели и, во-вторых, оптимизацию полевых работ по радиационному обследованию и контролю деформации покрывающего экрана.

Заключение

Создание ЦИМ объектов для целей вывода из эксплуатации или контроля ПЗРО после закрытия с включением в них данных НЛС принципиально расширяет возможности анализа и поиска эффективных решений по обоснованию безопасности.

Включение в ЦИМ данных радиационных обследований до последнего времени осуществлялось на основе отчетных материалов, в которых данные по геопривязке точки радиационного замера содержали погрешность до 0,5–1 м, что приводило к существенным потерям (из-за отсутствия точной координатной привязки измерений) при сравнении различных временных интервалов и оптимизации проектов вывода из эксплуатации. Постановка задачи о переходе к цифровому КИРО поддержана на уровне отрасли и начинает реализовываться.

Основной вопрос, который предстоит решить при переходе к цифровому КИРО, – это цифровая интеграция данных радиационных измерений с основным источником информации по геопространственным данным описа-

ния объекта. Автором рассмотрен подход по комбинированному радиационному обследованию и наземной лазерной съемке. Определено основное содержание методики контроля покрывающих экранов барьеров безопасности пунктов хранения РАО после закрытия и консервации для их периодического радиационного контроля.

Особенностью представленного в Методике подхода является импорт результатов комбинированной съемки в цифровую информационную модель объекта с включением данных по геопозиционированию радиационных измерений на основе НЛС. Это обеспечивает единство подхода к хранению и представлению данных, обработки и возможности проведения измерений на основе ранее созданных ЦИМ.

При проведении контроля за состоянием объектов, в том числе пунктов захоронения РАО, требования к координатной привязке результатов радиационных измерений и иных изысканий должны составлять не более 50–100 мм. Предложенная Методика комбинированной съемки позволяет такую точность обеспечить.

Литература

1. Global Terrestrial LiDAR Market Size, Share, Trends, Industry Growth by Component (GPS, Navigation (IMU), Laser Scanner, Others), by Application (Corridor Mapping, Engineering, Environment, Exploration, ADAS, Others), by End-Use, by Region, and Forecast to 2030, Report ID: RC156440.
2. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Вывод из эксплуатации. Под общей редакцией Большова Л.А., Лаверова Н.П., Линге И.И. М., 2015. 316 с. Т.3.
3. Иванов А.Ю., Линге Ин.И. К вопросам цифровизации при обращении с радиоактивными отходами // Радиоактивные отходы. 2022. № 4(21). С. 39-47. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-39-47.
4. Лужецкий А.В., Невров Ю.В., Ведерникова М.В., Иванов А.Ю., Линге Ин.И., Неуважаев Г.Д., Савельева Е.А., Шпиньков В.И., Понизов А.В. О создании интегральной информационной модели для определения стратегии развития промышленного комплекса по обращению с радиоактивными отходами ФГУП «РАДОН» // Радиоактивные отходы. 2020. № 1(10). С. 101-112. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-101-112.
5. B. Paul, N. McKay. A Method for Registration of 3-D Shapes, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell, April 1992, Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering, no. 14(3), pp. 239-256. DOI: 10.1117/12.57955, дата: 1992/04/30, 1992.
6. 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.

7. A. Gruen, D. Akca, «Least squares 3D surface and curve matching», *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, № 59(3), pp. 151-174, 2005.
8. O. Monserrat, M. Crosetto. «Institute of Geomatics, Barcelona, Spain, Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching», *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, № 63, pp. 142-154, January 2008. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.07.0082008>.
9. Oppikofer T., «Detection, analysis and monitoring of slope movements by high-resolution digital elevation models». PhD Thesis, Institute of Geomatics and Analysis of Risks, Faculty of Geosciences and Environment, University of Lausanne, Switzerland, 2009.
10. G. Teza, A. Galgaro, N. Zaltron, R. Genevois, «Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach», *International Journal of Remote Sensing*, vol. 28, pp. 3425-3446, 2007.
11. W. Mukupa, G.W. Roberts, C.M. Hancock, K. Al-Manasir, «A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures», *Survey Review*, DOI: 10.1080/00396265.2015.1133039, 2016.
12. Mike R. James, Stuart Robson, Mark W. Smith, «3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys», *Earth surface processes and landforms*, № 42(12), pp. 1769-1788, 2017. DOI: 10.1002/esp.4125.
13. Gojcic Z., Zhou C., Wieser A. «Robust pointwise correspondences for point cloud based deformation monitoring of natural scenes», 4th Joint international symposium on deformation monitoring (JISDM), 2019.
14. Z. Gojcic, L. Schmid, A. Wieser, «Dense 3D displacement vector fields for point cloud-based landslide monitoring», *Landslides*, pp. 18:3821-3832. DOI: 10.1007/s10346-021-01761-y.
15. Медведев В.И., Райкова Л.С. Программы для обработки данных лазерного сканирования местности. DOI: 10.17273/CADGIS.2017.2.2, 2017.
16. T.P. Kersten, M. Lindstaedt, «Geometric accuracy investigations of terrestrial laser scanner systems in the laboratory and in the field», *Applied Geomatics*, 14:421-434, URL: <https://doi.org/10.1007/s12518-022-00442-2>, 2022.
17. Surface related uncertainties of laser scanning: a simulation-based and experimental study, a thesis submitted to attain the degree of Doctor of Sciences of ETH Zurich (Dr. sc. ETH Zurich). Sukant Chaudhry M.Sc. Physics, diss. eth no. 27989. DOI: 10.3929/ethz-b-000533401.
18. E. Serantoni, «Integrated structural monitoring using point clouds obtained from terrestrial laser scanning», A dissertation submitted to attain the degree of doctor of sciences of ETH Zurich, ETH Zurich, diss. eth no. 26773. URL: <https://gseg.igp.ethz.ch/research0/current-phd-topics0/completed-dissertations.html>, 2020.
19. Былкин Б.К., Бунто П.А., Тихоновский В.Л., Чуйко Д.В. Применение имитационно-обучающего тренажера для демонтажа блоков АЭС // Атомная энергия. 2012. Т. 113. № 6. С. 333-336. 2012.
20. Александрова Т.А., Иванов А.Ю., Линге Ин.И., Лунов Д.М., Савельева Е.А., Самойлов А.А., Уткин В.Б. Оценка объемов образования РАО от вывода из эксплуатации с использованием информационных моделей // Радиоактивные отходы. 2020. № 3(12). С. 19-31. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-19-31.
21. Ильясов Д.Ф., Иванов А.Ю. Экономика и цифровизация вывода из эксплуатации объектов ядерного наследия: монография. М.: РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2024. 219 с., ISBN 978-5-7307-2149-4.
22. МУ 2.6.5.008-2016. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Контроль радиационной обстановки. Общие требования. Методические указания.
23. МУ 2.6.5.032-2017. Контроль радиоактивного загрязнения поверхностей.

24. МУ 2.6.1.2838-11. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности. Методические указания.
25. Скрышник О.Н., Арефьев Р.А., Арефьева Н.Г. Оценка характеристик погрешностей позиционирования комбинированных ГЛОНАСС/GPS приемников // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 10-2. С. 296-301.
26. Z. Xiang, Ge Ou, Abbas Rashidi, «Automated Translation of Rebar Information from GPR Data into As-Built BIM: A Deep Learning-based Approach», ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering, URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.15448>, 28 oct 2021, 2021.

On the Digital Integration of Radiation Measurements with Terrestrial Laser Scanning Survey Data

Linge Innokentiy (Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (NSI RAS), Moscow, Russia)

Abstract. The problems of using terrestrial laser scanning imaging for the tasks of ensuring the safety of nuclear energy facilities are considered. The greatest attention is paid to the issues of decommissioning and control of facilities for the disposal of radioactive waste (near-surface burial sites and conservation sites for special radioactive waste) at the stages after closure and long-term exposure. It is shown that digital information models are the best environment for the concentration of all data types necessary for decommissioning and justification of safety. The issues of interfacing data from digital models of objects with data from radiation surveys and other surveys are considered. The use of terrestrial laser scanning imaging in conjunction with radiation studies and other surveys with the preservation of results in the IFC format is proposed.

Keywords: nuclear power plants, nuclear fuel cycle facilities (NFC), radioactive waste (RW), special RW conservation and RW disposal facilities (RW disposal sites), ground-based laser imaging, radiation measurements, safety.

И.И.Линге (вед.спец.)

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), г. Москва

Контакты: +7 (495) 276-20-00, iil@ibrae.ac.ru.