DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-91-101 УДК 621.039

ОПЫТ ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННЫМ ГРУНТОМ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ

А. И. Соболев, А. А. Самойлов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 11 октября 2022 г.

В статье рассмотрен широкий спектр проблем обращения с радиоактивно загрязненными грунтами (РЗГ). Представлен анализ ретроспективных работ, а также современные подходы, особенно на стадии вывода из эксплуатации объектов ядерного наследия с реабилитацией территорий их размещения. Проведено описание предметной области обращения с РЗГ. Разработаны требования к организации технологической схемы обращения с ними для «идеальной» установки. Рассмотрены рекомендации по формированию эффективной схемы ведения работ.

Ключевые слова: *радиоактивно загрязненный грунт, радиоактивные отходы, радиометрическая сепарация, гидросепарация, реагентная обработка, предметная область обращения с РЗГ, аварийные хранилища РАО, реабилитация территорий объектов ядерного наследия.*

Мероприятия по выводу из эксплуатации (ВЭ) объектов использования атомной энергии предусматривают проведение работ со значительными объемами РЗГ, что особенно актуально в отношении объектов ядерного наследия (ОЯН), территории которых подверглись загрязнению по причине несовершенства технологий начальных этапов развития ядерных производств и методов обращения с радиоактивными отходами (РАО).

Анализ результатов работ по реабилитации территорий Курчатовского института, ликвидации последствий аварии на Подольском заводе цветных металлов позволяет оценить объемы РЗГ на территории каждого ОЯН в размере не менее 20 тыс. м^3.

Технологии обращения с РЗГ целесообразны для применения при условии кратного снижения их объемов за счет дезактивации или сепарации фракций, относящихся к РАО. Анализ результатов проведенных работ показывает, что большая часть радионуклидов в РЗГ концентрируется в мелкодисперсной фракции, характеризующейся глинистыми минералами. Их эффективное выделение лежит в основе технологических схем очистки грунтов, загрязненных радионуклидами.

В настоящее время к основным методам обращения с РЗГ относятся:

- радиометрическая сепарация;
- водно-гравитационная сепарация;
- реагентная дезактивация.

На основе опыта проведенных работ показано, что коэффициент сокращения объемов РЗГ лежит в интервале 5—6 раз (т. е. количество получаемых РАО составляло от 150 до 200 кг на тонну исходного грунта).

Однако процедура обращения с оставшимися после очистки массивами грунта, предписывающая его размещение на полигонах общего назначения, является практически неосуществимой.

Постановка задачи оптимизации технологической схемы обращения с РЗГ

Проведем сравнительный анализ преимуществ и недостатков традиционной и предлагаемой оптимизированной схемы обращения с РЗГ при проведении работ по ВЭ ОЯН и реабилитации территории их размещения.

Описание предметной области

Анализ различных ОЯН позволяет выделить характерные признаки, которые могут определять механизмы и технологические схемы по ВЭ и реабилитации территорий их расположения с учетом объема работ по обращению с РЗГ или строительными материалами, не относящимися к категории «радиоактивные отходы».

Проведем описание предметной области системы обращения с РЗГ и строительными материалами характерного ОЯН.

Пусть он расположен на территории площадью S, на которой размещены здания и сооружения, обеспечивающие проведение технологических процессов профильной деятельности, а также зоны выгрузки и хранения РАО, образующихся в результате профильной деятельности или за счет нарушения условий эксплуатации при радиационных авариях и инцидентах. В общем виде схема ОЯН приведена на рис. 1.

Проведем ее анализ с целью выявления зон возможного расположения и оценки объемов РЗГ и строительных материалов, не относящихся к категории РАО.

Рис. 1. Схема расположения объектов вывода из эксплуатации и реабилитации территорий на ОЯН

В зоне контролируемого доступа располагаются:
- объекты технологического цикла;
- хранилища РАО;
- элементы обеспечения систем радиационной безопасности.

Объекты технологического цикла представляют собой, как правило, комплекс систем и оборудования, предназначенных для выполнения целевых задач с применением радиоактивных материалов. При проведении мероприятий по ВЭ в основном образуются металлические РАО. Возникновение РЗГ на этом этапе работ исключено, можно предположить только образование загрязненных строительных материалов, использованных в качестве силовых и защитных элементов технологического оборудования, как правило, железобетонных конструкций.

Например, согласно данным проектной документации только в результате работ по ВЭ объектов технологического цикла АО «АЭХК», ФГУП «ПО «Маяк», ПАО «МСЗ», АО «Радиевый институт» и АО «СХК» в горизонте до 2030 г. ожидается образование более 50 тыс. м^3 РАО без учета РЗГ. Объем РЗГ и строительных материалов может быть оценен величиной не менее 25 тыс. м^3.

Хранилища РАО, расположенные в зоне контролируемого доступа, могут быть представлены как проектными сооружениями, так и временными конструкциями, возведенными в результате выполнения аварийных работ. В этом случае вероятность образования РЗГ становится значимой.

Рассмотрим основные варианты процедуры наработки РЗГ и строительных материалов.

При ВЭ хранилищ РАО планируется выполнение следующих операций:
- вскрытие обваловочного слоя грунта над верхним перекрытием хранилища;
- разборка и удаление элементов конструкции верхнего перекрытия;
- выгрузка и сортировка РАО;
- дезактивация, разборка и удаление пристенных и донных элементов конструкции хранилища;
- изъятие пристенных и донных слоев вмещающего грунта.

Максимальные объемы РЗГ будут образовываться на этапах вскрытия обваловочного слоя над верхним перекрытием хранилища и изъятия пристенных и донных слоев вмещающего грунта. На этапах разборки и удаления элементов конструкции хранилища в основном будут нарабатываться радиационно загрязненные строительные материалы в виде бетонной крошки от проведения механической дезактивации их поверхностей.

Аналогичные пути формирования РЗГ и строительных материалов будут присутствовать и при ВЭ и хранилищ РАО, организованных при ликвидации последствий радиационных инцидентов на территории площадки ОЯН. Однако необходимо заметить, что их дополнительные объемы в этом случае могут формироваться и на этапе выгрузки и сортировки отходов. Причиной размещения значительных объемов РЗГ непосредственно в хранилище (зоне размещения) аварийных РАО может являться фактор проведения ликвидационных работ в сжатые сроки, в результате чего дополнительные объемы РЗГ могли быть размещены совместно с РАО. Кроме того, временные хранилища, как правило, не в достаточной мере соответствуют требованиям к гидроизоляции, что в процессе их эксплуатации приводит к возрастанию интенсивности миграционных процессов радионуклидов из массива РАО в зону грунтов. К тому же эффекту приводит и ситуация, связанная с отсутствием технологий его омоноличивания.

Характерным примером ВЭ временного аварийного хранилища РАО может являться комплекс работ по реабилитации промышленной площадки бывшего завода «Мосрентген» площадью 0,53 гектара, расположенной на территории Москвы [1].

На ней в результате радиационной аварии по перезагрузке источников ионизирующего излучения (ИИИ) с 1962 г. был создан объект, в котором находились РАО, активность которых была обусловлена в основном радионуклидами ^{60}Co и ^{137}Cs.

В ходе выполнения комплексного инженерно-радиационного обследования (КИРО) было установлено, что на поверхности холмообразной насыпи над зданием бывшей лаборатории обнаружены 6 участков радиоактивного загрязнения общей площадью до 100 м^2, сосредоточенных в основном:

- на юго-восточной части насыпи в районе ангара,
- в южной части обрушенного здания.

Показано, что радиоактивное загрязнение обусловлено цезием-137, а вклад кобальта-60 пренебрежимо мал.

Основная масса радиоактивных отходов располагалась в глубине насыпи. Проведение там исследований было крайне затруднено в связи с наличием внутри слоя грунта, образующего насыпь, многочисленных твердых включений (кирпича, бетона, металлических предметов и т. п.).

В связи с этим установить точные значения размеров, местоположение, конструктивные особенности технологического оборудования и различных ИИИ, размещенных внутри насыпи в хранилище твердых радиоактивных отходов (ХТРО), не представляется возможным.

По этой причине предварительная оценка объемов РАО, подлежащих извлечению, удалению из ХТРО, и объемов подлежащего сортировке грунта и других материалов (кирпича, бетона, металлических предметов и т. п.) имела весьма ориентировочный характер и была определена в интервале 1 200—1 600 м^3.

В ходе выполнения работ по реабилитации территории бывшего завода «Мосрентген» были достигнуты следующие результаты:

1) проведена сортировка грунта объемом 1400 м^3;

2) произведена фрагментация металлических РАО объемом 73 м^3;

3) осуществлена транспортировка и размещение на долговременное хранение 700 м^3 РАО массой 850 т.

Таким образом, необходимо сделать важный вывод, что объем РЗГ и строительных материалов может достигать до 50 % от объема РАО, находящихся в хранилищах, особенно оборудованных при ликвидации аварии.

Необходимо также рассмотреть и сценарий образования РЗГ в зонах наблюдения ОЯН.

Важным моментом в этом вопросе является тот факт, что их размеры следует исследовать в историческом аспекте. Известно, что в конце первого десятилетия XXI века значительное число объектов использования атомной энергии было переведено в 3 категорию по потенциальной радиационной опасности, не предусматривающую наличия зоны наблюдения.

Выполнение этого требования привело к ситуации, когда внешняя граница санитарно-защитной зоны совпадает с периметром объекта. Этот случай наиболее характерен для сооружений, расположенных в пределах городской застройки.

Например, такая ситуация возникла и при ВЭ АО «ВНИИХТ» — ведущего научно-исследовательского института Госкорпорации «Росатом». 3D-модель общего вида площадки представлена на рис. 2.

Промышленная площадка предприятия, расположенного на Каширском шоссе г. Москвы, является классическим примером ОЯН. Основные объекты технологического цикла этого института были введены в эксплуатацию более 70 лет назад и задействованы для проведения научных исследований с целью совершенствования различных технологий ядерно-топливного цикла. Только в двух основных корпусах института было сосредоточено более 300 лабораторий.

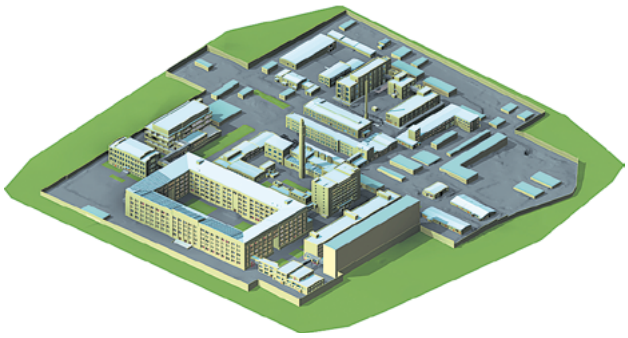

Рис. 2. 3D-модель общего вида площадки (площадь – 13,4 Га, количество зданий и сооружений – 76 шт., ввод в эксплуатацию – 1952 г., прекращение производства – 2021 г.)

В план работ по ВЭ были включены следующие мероприятия:

- радиационное обследование территории, более 134 тыс. м^2;
- химическое обследование территории;
- инженерное обследование корпусов, более 84 тыс. м^2;
- вывоз твердых бытовых и коммунальных отходов (ТБО/ТКО) из корпусов, более 13 тыс. м^3;
- удаление более 600 м^3 химических реактивов с истекшим сроком годности (промышленные отходы 1 и 2 класса);
- удаление металлических отходов, более 400 т.;
- радиационное обследование производственных зданий и сооружений, более 50 тыс. м^2.

Однако реабилитация территории, расположенной на склоне реки Москва, в перечень работ включена не была, хотя хорошо известно, что радиационная обстановка данного участка характеризуется как радиационно опасная. Например, площадка на пойменной части территории, расположенная вплотную к периметру музея-заповедника «Коломенское», содержит как минимум один участок радиоактивного загрязнения. Глубина залегания участков радиационного загрязнения (УРЗ) составляет от 1,5 до 4,0 м, а максимальная мощность — 2,0 м.

По данным обследования максимальная величина мощности экспозиционной дозы гамма-излучения (МЭД ГИ) в массиве грунта составила 1,80 мкЗв/ч. Максимальные альфа- и бета-активности составили 8,2·10^4 и 1,1·10^4 Бк/кг соответственно. Эти загрязнения обусловлены главным образом природными радионуклидами (приведены максимальные значения): ^{232}Th — 1,4·10^3 Бк/кг, ^{226}Ra — 160 Бк/кг, ^{210}Pb — 1,7·10^3 Бк/кг. Содержание техногенного ^{137}Cs не превысило фоновых значений. Максимальное значение $A_{эфф}$ составило 2013 Бк/кг.

По величинам МЭД ГИ и $A_{эфф}$ суммарной альфа-активности внутри УРЗ выделены три зоны загрязнения:

Зона 1 — наиболее загрязненная часть грунтов, имеющих высокие значения МЭД ГИ до 1,80 мкЗв/ч, максимальные альфа- и бета-активности — до 8,2·10^4 и 1,1·10^4 Бк/кг соответственно. Их мощность на данном участке — не более 1,5 м, объем составляет около 40 м^3.

Зона 2 представлена грунтами, имеющими значения МЭД ГИ выше 1,0 мкЗв/ч альфа-активность — выше 10^3 Бк/кг, но $A_{эфф}$ — ниже 370 Бк/кг. Их мощность не превышает 1,0 м, а объем — 120 м^3.

Зона 3 сложена грунтами с суммарной альфа-активностью выше 10^3 Бк/кг, но с невысокими значениями МЭД ГИ — от 0,2 до мкЗв/ч и значениями $A_{эфф}$ ниже 370 Бк/кг. Мощность загрязнения не превышает 0,5 м, а объем — 240 м^3. Загрязнение в третьей зоне приурочено к коренным грунтам в зоне колебания уровня грунтовых вод.

Таким образом, объем РАО и РЗГ в бывшей зоне наблюдения института может быть оценен величиной не менее 200 м^3.

Вышеприведенная информация относится к той части предметной области, которая описывает наиболее вероятные зоны размещения РЗГ на территории ОЯН.

Опыт работ по реабилитации радиационно загрязненных территорий убедительно подтверждает необходимость проведения масштабных исследований радиационных характеристик не только всей поверхности территории ОЯН, но и распределения возможного загрязнения по глубине.

Обследование территории для выявления участков и зон распределения радионуклидов должно проводится по двум направлениям:

1. Поверхностное сканирование.
2. Глубинный зондаж.

Традиционно обследование территории проводится носимыми радиометрами, а по его результатам формируется карта поверхностного распределения мощностей доз излучения.

На следующем этапе работ осуществляется отбор представительных проб грунта с участков с максимальным значением МЭД ГИ для идентификации и определения основных дозообразующих радионуклидов. Например, для измерения уровней содержания ^{137}Cs в РЗГ площадки НИЦ «Курчатовский институт» [2] разработана схема с применением радиометра «Корад» (рис. 3), оснащенного специализированным программным обеспечением. Он позволяет проводить определение:

- удельной или поверхностной активности ^{137}Cs;
- толщины загрязненного слоя;
- толщины «чистого» слоя грунта, покрывающего загрязненный.

Рис. 3. Вид радиометра «Корад» на рабочей площадке

Эта схема пригодна и для определения других радионуклидов с высоким гамма-выходом, например, ^{60}Co.

Для измерения ^{90}Sr применен детектор бета-излучения, представляющий собой цилиндрический пластиковый сцинтиллятор внешним диаметром 50 мм, длиной 100 мм и толщиной 3 мм. Для обеспечения возможности работы в водных средах все его стыки снабжены резиновыми уплотнителями.

Для проведения измерений уровней содержания радионуклидов в скважинах исследуемой площадки разработана и апробирована на практике схема с применением коллимированных детекторов (рис. 4).

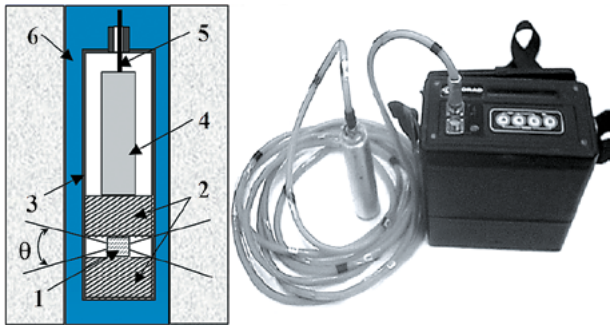

Рис. 4. Схема детектирования и вид прибора для измерений в скважинах: 1 – сцинтилляционный детектор, 2 – корпус детектора, 3 – скважина, 4 – кабель и спектрометр, 5 – предусилитель, 6 – коллиматор

Результаты радиометрического и спектрометрического обследований являются основой для проведения оценок объемов РЗГ и выбора способов их дальнейшей технологической переработки.

Методология работ по планированию и осуществлению комплекса данных обследований территории ОЯН в большей степени зависит от вида технологической деятельности объекта и характера образования очагов радиоактивного загрязнения.

Сценарий загрязнения территории единственным радионуклидом характерен для объектов, на которых произошли радиационные аварии. Типичным примером этого может служить ситуация по устранению последствий радиационного загрязнения на ОАО «Подольский завод цветных металлов» (ПЗЦМ).

Промышленная площадка завода площадью 42 га расположена в верхней левобережной части водосбора реки Петрицы, притока реки Москвы.

Радиоактивное загрязнение территории обнаружено летом 1989 г. по результатам аэрогаммасъемки. Пешеходная разведочная и детальная гамма-съемка выявили загрязненность радионуклидом ^{137}Cs части территории объекта в результате попадания ИИИ в плавильные печи ПЗЦМ.

В результате аварии радиоактивному загрязнению подверглись следующие объекты и территории предприятия:

- производственные помещения цеха рафинировочного отделения с прилегающей территорией;
- склад объекта капитального строительства;
- внутризаводская железнодорожная ветка;
- площадка металлолома;
- два открытых шлаконакопителя.

Таким образом, радиоактивное загрязнение было обнаружено на 5 га территории из 42 га общей площади завода, что составило 12 %.

К аналогичным объектам, территория которых загрязнена мононуклидом или известным набором природных нуклидов, когда основная часть работ по выявлению участков радиоактивного загрязнения сводится в основном к радиометрическим измерениям, можно отнести приведенные ниже примеры.

Во-первых, это монацитовая рассыпь, являющаяся источником радиационного загрязнения на территории бывшего Новотроицкого рудоуправления. В ходе работ были ликвидированы аварийные строительные объекты, загрязненные торием, а также рекультивировано 35 участков радиоактивного загрязнения, в т. ч. семь выявленных при производстве работ (общая площадь — 11 га).

Новотроицкое рудоуправление располагалось в долине реки Унды в 2—3 км от поселка Новотроицк Балейского района Забайкальского края, в 240 км юго-восточнее Читы. Его производственная деятельность (1949—1964 годы) была связана с добычей монацитового сырья для последующего извлечения из него тория. В результате производственной деятельности объекты предприятия оказались загрязнены

радиоактивным торием, а на территории жилого поселка Новотроицкого рудоуправления были построены объекты с применением торийсодержащих отходов горного производства, которые использовались в качестве наполнителя бетона, штукатурного и строительного растворов.

Другим примером аномалий такого типа может служить территория хвостохранилища объектов гидрометаллургического завода и рудников № 1 и № 2 бывшего государственного предприятия «Алмаз» (г. Лермонтов, Ставропольский край).

В комплекс масштабных работ были включены:

- разборка зданий;
- ликвидация штолен, стволов шахт, вентиляционных каналов, квершлагов, засыпка провалов устьев штолен;
- рекультивация отвалов горных пород;
- рекультивация территории хвостохранилища ГМЗ;
- реконструкция радонопровода в пределах штольни № 16.

Общая площадь реабилитации составила более 920 тыс. м^2.

Наиболее сложными в части проведения радиометрических и спектрометрических исследований являются объекты ядерного наследия, вывод из эксплуатации которых предполагает проведение таких работ, как вскрытие и выгрузка хранилищ радиоактивных отходов. Радионуклидный состав массива РАО, как правило, представлен полным спектром коротко- и долгоживущих бета-излучателей, альфа-нуклидами и низкоэнергетическими бета-излучателями. Это обстоятельство приводит, с одной стороны, к необходимости проведения детальной сортировки, а с другой — является фактором образования РЗГ за счет присутствия радионуклидов, вклад которых в мощность дозы будет пренебрежимо мал, а концентрация превышает уровни, установленные для освобождения от радиационного контроля.

К таким объектам могут быть отнесены НИЦ «Курчатовский институт», Мурманское, Казанское, Челябинское и Благовещенское отделения ФГУП «Федеральный экологический оператор» (ранее ФГУП «РосРАО»).

По результатам проведенных работ по реабилитации территории НИЦ «Курчатовский институт» установка водно-гравитационной сепарации грунта была дооснащена устройством радиометрической сепарации, что повысило эффективность очистки грунтов в целом. В итоге данный технологический комплекс позволил переработать 7 000 м^3 РЗГ, с образованием до 1 250 м^3 РАО, направленных на хранение в ФГУП «Радон». Оставшийся объем грунта (5 750 м^3) был задействован для обратной засыпки котлованов.

В ходе выполнения работ по ВЭ ПХРО Мурманского отделения ФГУП «ФЭО» было извлечено 600 м^3 РАО, при этом образовалось около 100 м^3 вторичных отходов. Площадь территории, подвергнутой радиационной реабилитации, составила 1 200 м^2. Выполненные работы позволили достигнуть конечного состояния ПХРО уровня «коричневая лужайка» (предполагает демонтаж оборудования и освобождение зданий и сооружений, не предназначенных для дальнейшего использования, переработку и вывоз всех радиоактивных отходов с территории и доведение ее до состояния, пригодного для нужд атомной энергетики, таких как строительство хранилища радиоактивных отходов, или иной экономической деятельности, например создание технопарка).

Знания, полученные при ВЭ ПХРО Мурманского отделения, важны для наработки опыта обращения с тритийсодержащими РАО.

В процессе ВЭ ПХРО Казанского отделения ФГУП «ФЭО» из временных хранилищ было извлечено 550 м^3 РАО. Объем образовавшихся вторичных отходов составил 108 м^3. Реабилитационные работы до состояния «коричневая лужайка» проводились на площади более 1000 м^2.

Аналогичные показатели: в Благовещенском отделении — 770 м^3 извлекаемых РАО (96 м^3 вторичных), площадь реабилитации — почти 650 м^2, а также в Челябинском отделении — более 1000 м^3 (130 м^3), площадь реабилитации — 1000 м^2, с достижением критерия «коричневая лужайка».

К примерам, характеризующим необходимость радиометрических и спектрометрических исследований территорий потенциального радиационного риска за счет их расположения в пределах объектов использования атомной энергии, следует отнести и масштабные работы по выявлению и ликвидации участков радиоактивного загрязнения на территории города Москвы, основная часть которых была выполнена в 1986—1997 гг. [3]. Динамика выявления более 1 200 участков представлена на рис. 5.

В ходе ликвидации обнаруженных очагов радиоактивного загрязнения установлено, что непосредственно РЗГ являлись составной частью более чем 750 участков, а строительный мусор — более чем 70.

Все территории радиоактивного загрязнения были разделены на точечные и площадные.

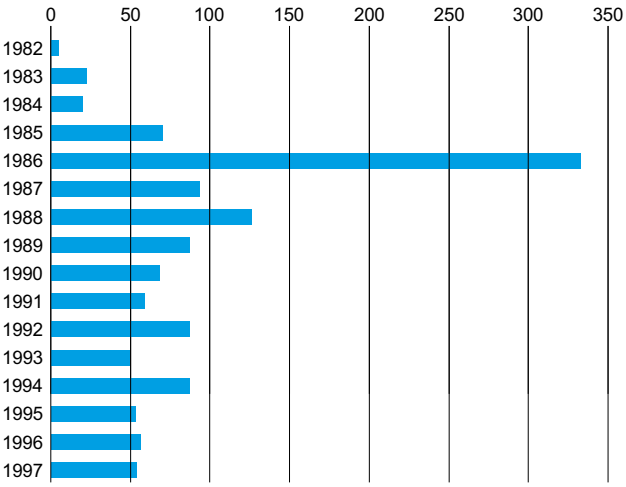

Рис. 5. Динамика выявления участков радиоактивного загрязнения на территории города Москвы

Точечные аномалии были образованы ИИИ, технология их ликвидации предусматривала выемку радиоактивного источника совместно с окружающим грунтом, что также приводило к увеличению объемов РЗГ [4], [5].

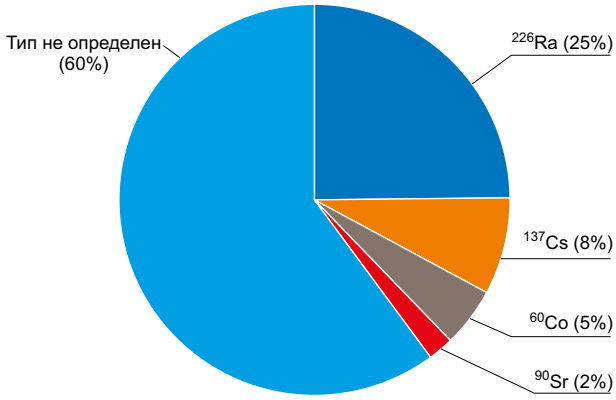

Рис. 6. Изотопный состав участков радиоактивного загрязнения мегаполиса Москва

Изотопный состав участков радиоактивного загрязнения приведен на рис. 6.

Для 60 % аномалий он не был определен ввиду их малой радиационной опасности, и радиохимические исследования для точного определения радионуклида не проводились.

Аномалии, обусловленные присутствием ^{226}Ra, составили 25 %, а ^{137}Cs — 8 %. Такое соотношение свидетельствует об их «давнем» происхождении на территории Москвы, во времена интенсивного применения ^{226}Ra (1950—1958 гг.).

Таким образом, резюмируя предметную область, описывающую проведение работ по обращению с РЗГ или загрязненными строительными материалами, не относящимися к категории «радиоактивные отходы», можно выделить основные требования к организации технологических процессов, выполняемых «идеальной» установкой по обращению с ними при выполнении работ на ОЯН:

1. Производительность установки должна быть достаточной для выполнения технологических процессов за время, отведенное на завершение работ по ВЭ ОЯН и реабилитации его территории.

2. Конечным результатом работы установки должны быть однозначные продукты: или радиоактивные отходы, или грунты и строительные материалы, выведенные из-под радиационного надзора.

3. Режимы работы установки должны быть перенастраиваемыми для адаптации к условиям и характерным особенностям объекта, на территории которого проводится ВЭ.

4. Установка должна обеспечивать универсальность обращения с РЗГ в части обеспечения очистки от возможного химического загрязнения в случае, если реабилитируемая территория планируется к использованию по критерию «зеленая лужайка» (предусматривает полный демонтаж зданий и сооружений ОЯН, переработку, упаковку и удаление радиоактивных и нерадиоактивных отходов, рекультивацию освободившейся территории с целью ее неограниченного использования).

Приведенные требования к технологическим возможностям «идеальной» установки, безусловно, в значительной степени противоречивы, поэтому до настоящего времени интенсивное применение таких комплексов не нашло широкого применения при ВЭ ОЯН и реабилитации территорий их расположения.

Рассмотрим существующие и перспективные методы обращения с РЗГ, которые могут быть заложены в основу создания «идеального» технологического комплекса.

Методы обращения с радиоактивным грунтом при реабилитации территорий

Как уже указывалось ранее, основными методами дезактивации грунтов являются:

- радиометрическая сепарация;
- водно-гравитационная сепарация;
- реагентная дезактивация.

В настоящее время на основе опыта уже проведенных работ предложены и на практике реализованы технологии радиометрической и водно-гравитационной сепарации радиоактивного грунта.

Лабораторные исследования показали, что большая часть радионуклидов в РЗГ содержится

в мелкодисперсной, илистой, фракции и что оптимальным с точки зрения эффективного выделения радиоактивной составляющей грунта является его разделение на следующие фракции по размеру частиц:

- фракция 1 — крупнокусковая, свыше 100 мм;
- фракция 2 — крупная, 3—100 мм;
- фракция 3 — песчаная, 0,1—3 мм;
- фракция 4 — мелкодисперсная (илистая), до 0,1 мм.

Для этих целей могут использоваться установки водно-гравитационной или ситовой сепарации.

Технологическая схема процедуры радиометрической сепарации предусматривает следующие стадии:

- фракция 1 (крупнокусковая) направляется после выделения на дополнительную сепарацию;
- фракция 2 (крупная) и фракция 3 (песчаная) считаются «условно чистыми» и направляются на повторное использование;
- фракция 4 (мелкодисперсная) представляет собой радиоактивные отходы и направляется на переработку и кондиционирование.

Количество получаемых радиоактивных отходов составляет от 150 до 200 кг на тонну исходного грунта.

Установка радиометрической сепарации включает:

- загрузочный модуль;
- измерительный модуль;
- исполнительный механизм.

Проведение радиометрической сепарации требует подготовки грунта к измерению за счет выравнивания толщины его слоя.

Эта процедура проводится при соблюдении условия разделения потоков грунта по величине удельной активности на три части: $A < 10$ Бк/г, 10 Бк/г $< A <$ 50 Бк/г и $A >$ 50 Бк/г.

Установка водно-гравитационной сепарации грунта (рис. 7) является основным элементом технологического процесса и позволяет выделять мелкодисперсную фракцию, т. е. снижать объемы низкоактивных отходов.

Комплекс позволил переработать 7 000 м^3 грунта, что до сих пор является рекордным достижением отечественной технологической практики в сфере обращения с РЗГ.

В настоящее время учеными и исследователями АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. акад. А. А. Бочвара» и МГУ им. М. В. Ломоносова проводятся исследования в области разработки и испытания

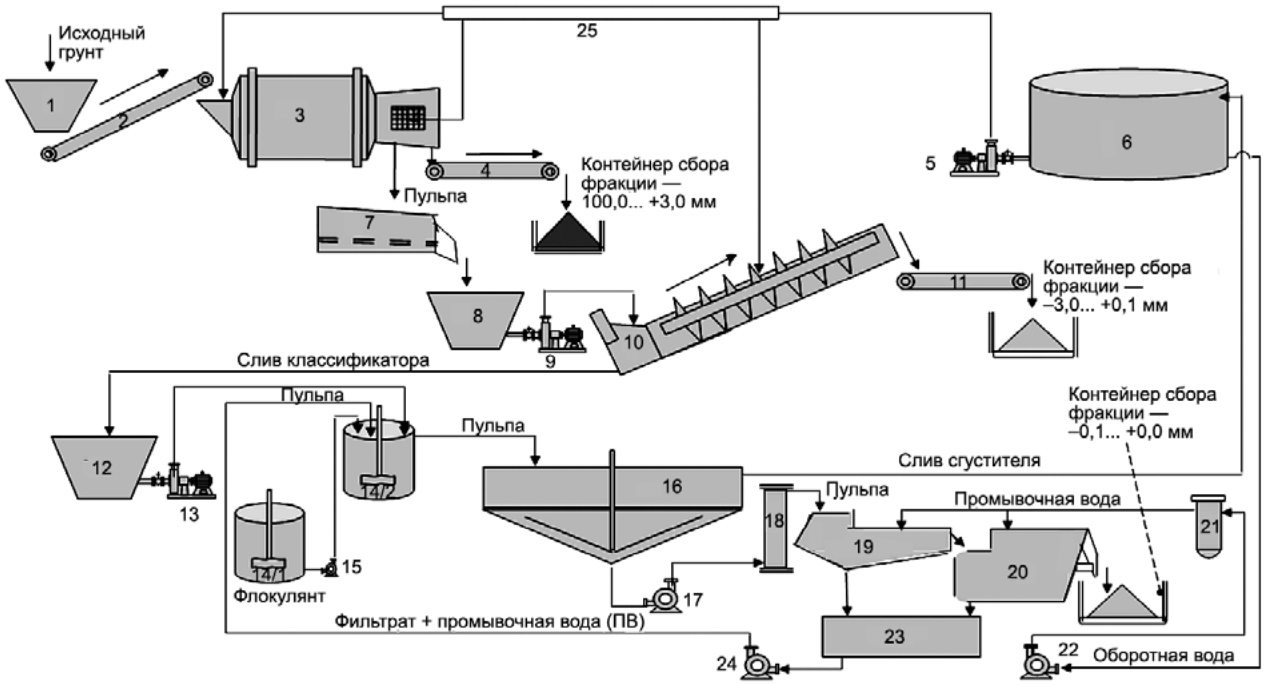

Рис. 7. Схема организации технологического процесса водно-гравитационной сепарации грунта:

1 — приемный бункер, 2 — загрузочный конвейер № 1, 3 — скруббер-бутара, 4 — конвейер № 2, 5 — водяной насос, 6 — бак оборотной воды, 7 — плоскокачающийся грохот, 8 — зумпф насоса песчаной фракции № 1, 9 — насос № 1 песчаной фракции, 10 — спиральный классификатор, 11 — конвейер № 3, 12 — зумпф насоса песчаной фракции № 2, 13 — насос песчаной фракции № 2, 14/1 — контактный чан № 1, 14/2 — контактный чан № 2, 15 — дозирующий насос, 16 — радиальный сгуститель, 17 — шламовый насос, 18 — башенный смеситель, 19 — гравитационный стол, 20 — ленточный фильтр-пресс, 21 — механический фильтр, 22 — насос высокого давления, 23 — сборник фильтрата, 24 — пульповый насос

технологии дезактивации РЗГ АО «АЭХК» от урана, относящихся к категории очень низкоактивных отходов (ОНАО), образование которых ожидается при ВЭ сублиматного производства. Показано, что для увеличения эффективности процесса дезактивации РЗГ необходимо модернизировать технологию гидросепарации с последующей обработкой целевой фракции растворами реагентов. Результаты испытаний будут использованы для разработки установки очистки РЗГ АО «АЭХК» категории ОНАО [6], [7].

Направления совершенствования технологической схемы

Отметим уже сложившуюся практику и достижения в части обращения с массивами РЗГ и строительных материалов для нужд выполнения мероприятий по ВЭ ОЯН и реабилитации территорий их размещения. В настоящее время разработаны, апробированы и внедрены следующие модули технологии:

1. Блоки радиометрической сепарации.
2. Модули гидросепарации.
3. Узлы реагентной обработки наиболее загрязненной (целевой) фракции.

Необходимо решить проблему значительного сокращения объемов образования РЗГ, размещение которых на полигонах ТБО связано с существенными организационно-техническими проблемами, за счет включения в технологический процесс установки по обращению с ними модуля, формирующего на выходе технологического процесса очищенные грунты.

Такой подход может быть реализован путем организации этапа радиометрической сепарации, который будет решать обратную задачу, а именно — подмешивать к массиву анализируемого РЗГ инертный материал с целью достижения значений концентраций, удовлетворяющих требованиям к освобождению от радиационного надзора.

Работа выполнена в рамках государственного контракта от 19.10.2021 № Д.4ш.244.20.21.1156.

Литература

1. *Соболев А. И.* Современное состояние отраслевой инфраструктуры переработки, кондиционирования и хранения РАО: достигнутые результаты, новые вызовы / Материалы научно-практической конференции «Философия обращения с радиоактивными отходами: плюсы и минусы существующих технологий». — Москва, ООО «Винпресс», 2016. С. 206—213.

2. *Волков В. Г., Данилович А. С., Зверков Ю. А., Иванов О. П., Колтышев С. М., Лемус А. В., Потапов В. Н., Семенов С. Г., Степанов В. Е., Чесноков А. В., Шиша А. Д.* Опыт очистки радиоактивного грунта на территории НИЦ «Курчатовский институт» // Атомная энергия. 2011. Т. 110. № 2. С. 106—112.

3. *Абрамкин А. С., Коренков И. П., Козлов А. А., Соболев А. И.* Оценка вероятности обнаружения радиоактивных загрязнений в локальной области. // Атомная энергия. 1990. Т. 68. Вып. 5. С. 378—381.

4. *Баринов А. С., Гусев А. Е., Козлов А. А., Комаров В. В., Лавров К. Н., Соболев И. А., Соколов В. Б.* Радиационные аномалии г. Москвы. — М. : Эномар, 1996. 48 с.

5. *Баринов А. С., Гусев А. Е., Козлов А. А., Комаров В. В., Лавров К. Н., Соболев И. А., Соколов В. Б.* Радиационные аномалии Московской области. — М. : Эномар, 1994. 52 с.

6. *Склифасовская Ю. Г.* Физико-химическое обоснование реагентной дезактивации грунтов, загрязненных α-излучателями: Автореферат дисс. канд. хим. наук. — Москва, 2012. 27 с.

7. *Варлаков А. П., Германов А. В., Маряхин М. А., Варлакова Г. А., Калмыков С. Н., Петров В. Г., Власова И. Э., Романчук А. Ю.* Дезактивация грунта, загрязненного ураном, с использованием метода гидросепарации с последующей реагентной обработкой фракций // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 85—90. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-85-90.

Информация об авторах

Соболев Андрей Игоревич, доктор технических наук, профессор, главный специалист, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: sobolev_ai@ibrae.ac.ru.

Самойлов Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, заведующий отделом, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: samoylov@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Соболев А. И., Самойлов А. А. Опыт обращения с радиоактивно загрязненным грунтом при выводе из эксплуатации объектов ядерного наследия // Радиоактивные отходы. 2023. № 1 (22). С. 91—101. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-91-101.

EXPERIENCE IN THE MANAGEMENT OF RADIOACTIVELY CONTAMINATED SOIL DURING THE DECOMMISSIONING OF NUCLEAR LEGACY FACILITIES

Sobolev A. I., Samoilov A. A.

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

Article received on October 11, 2022

The article considers a wide range of problems associated with the management of radioactively contaminated soils (RCS). It presents and analyzes the main research milestones, as well as modern approaches, in particular, those addressing the nuclear legacy decommissioning stage involving the cleanup of relevant nuclear sites. The paper describes the subject area dealing with RCS. It presents the developed requirements for the implementation of a process flowchart providing RCS management considering an "ideal" facility. The paper also considers the recommendations on the development of a high-performance operational flowchart.

Keywords: *radioactively contaminated soil, radioactive waste, radiometric separation, hydroseparation, reagent treatment, subject area of RCS management, emergency RW storage facilities, nuclear legacy cleanup.*

The research was funded under the state contract No. D.4sh.244.20.21.1156 of October 19, 2021.

References

1. Sobolev A. I. Sovremennoye sostoyaniye otraslevoy infrastruktury pererabotki, konditsionirovaniya i khraneniya RAO: dostignutyye rezul'taty, novyye vyzovy [State-of-Art in the Development of Industrial RW Processing, Conditioning and Storage Infrastructure: Achieved Results, New Challenges]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii "Filosofiya obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami: plyusy i minusy sushchestvuyushchikh tekhnologii."* Materials of the international scientific and practical conference "Philosophy of radioactive waste management: pros and cons of existing technologies". Moscow, OOO "Vinpress" Publ., 2016, pp. 206—213.

2. Volkov V. G., Danilovich A. S., Zverkov Yu. A., Ivanov O. P., Koltyshev S. M., Lemus A. V., Potapov V. N., Semenov S. G., Stepanov V. Ye., Chesnokov A. V., Shisha A. D. Opyt ochistki radioaktivnogo grunta na territorii NITS «Kurchatovskiy institut» [Experience in Treating Radioactive Soil at the Site of the National Research Center Kurchatov Institute]. *Atomnaya energiya — Atomic Energy,* 2011, vol. 110, iss. 2, pp.106—112.

3. Abramkin A. S., Korenkov I. P., Kozlov A. A., Sobolev A. I. Otsenka veroyatnosti obnaruzheniya radioaktivnykh zagryazneniy v lokal'noy oblasti [Assessing the Probability of Radioactive Contaminant Identification in a Local Region]. *Atomnaya energiya — Atomic Energy,* 1990, vol. 68, iss. 5, pp. 378—381.

4. Barinov A. S., Gusev A. Ye., Kozlov A. A., Komarov V. V., Lavrov K. N., Sobolev N. A., Sokolov V. B.

Radiatsionnyye anomalii g. Moskvy [Radiation Anomalies in Moscow]. Moscow, Enomar Publ., 1996. 48 p.

5. Barinov A. S., Gusev A. Ye., Kozlov A. A., Komarov V. V., Lavrov K. N., Sobolev I. A., Sokolov V. B. *Radiatsionnyye anomalii Moskovskoy oblasti* [Radiation Anomalies in the Moscow Region]. Moscow, Enomar Publ., 1994. 52 p.

6. Sklifasovskaya Yu. G. *Fiziko-khimicheskoye obosnovaniye reagentnoy dezaktivatsii gruntov, zagryaznennykh* α*-izluchatelyami* [Physical and Chemical Substantiation for the Reagent-based Decontamination of Soils Contaminated with α-emitters]. Cand. chem. sci. diss. Abstr. Moscow, 2012. 27 p.

7. Varlakov A. P., Germanov A. V., Mariakhin M. A., Varlakova G. A., Kalmykov S. N., Petrov V. G., Vlasova I. E., Romanchuk A. Yu. Dezaktivatsiya grunta, zagryaznennogo uranom, s ispol'zovaniem metoda gidroseparatsii s posleduyushchei reagentnoi obrabotkoi fraktsii [Decontamination of Soil Contaminated by Uranium Using Hydroseparation Method with Further Reagent Treatment of Fractions]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2019, no. 4 (9), pp. 85—90. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-85-90.

Information about the authors

Sobolev Andrey Igorevich, Doctor of technical sciences, Professor, Chief Specialist, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: sobolev_ai@ibrae.ac.ru.

Samoilov Andrey Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: samoylov@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Sobolev A. I., Samoilov A. A. Experience in the Management of Radioactively Contaminated Soil During the Decommissioning of Nuclear Legacy Facilities. *Radioactive Waste,* 2023, no. 1 (22), pp. 91—101. DOI: 10. 25283/2587-9707-2023-1-91-101. (In Russian).