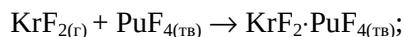


гексафторида плутония, а с увеличением массы обрабатываемого тетрафторида плутония расход твердого дифторида криптона приближается к стехиометрическому.

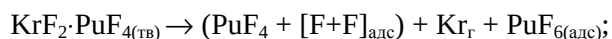
На основании экспериментальных данных можно предположить следующую схему протекания процесса:

низкотемпературная адсорбция молекул дифторида криптона на поверхности тетрафторида плутония



распад молекул дифторида криптона в поле кристаллической решетки тетрафторида плутония. Энергия активации распада дифторида криптона на поверхности тетрафторида плутония должна быть не более 25 кДж/моль. Продукты распада дифторида криптона — криптон и атомарный фтор также находятся в адсорбированном состоянии;

взаимодействие адсорбированных атомов фтора с тетрафторидом плутония



десорбция с поверхности тетрафторида плутония криптона и частичная десорбция гексафторида плутония, дифторида криптона и фтора. Так как распад молекул дифторида криптона происходит вследствие его взаимодействия с поверхностью тетрафторида плутония, то поте-

ри атомарного фтора за счет его рекомбинации сведены к минимуму.

Химическая стабилизация процесса радиолитического распада гексафторида плутония с использованием высших фторидов, незначительно отличающихся от гексафторида плутония по физико-химическим свойствам, вольфрама, урана и фреона, не является перспективной.

Определены направления стабилизации гексафторида плутония как основного продукта ядерного топлива в направлении, основанном на фторидной переработке облученного ядерного топлива.

Представленный в работе метод взаимодействия тетрафторида плутония с твердым дифторидом криптона расширяет границы низкотемпературного синтеза гексафторида плутония своей простотой и надежностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуев В.Л., Ломов В.И. Гексафторид плутония. М.: Атомиздат, 1975.
2. Ned E. Bibler. α and β radiolysis of plutonium hexafluoride vapor. — J. Phys. Chem., 1979, v. 83, № 17, p. 2179—2186.
3. Ерилов П.Е., Титов В.В., Серик В.Ф., Соколов В.Б. Низкотемпературный синтез гексафторида плутония. — Атомная энергия, 2002, т. 92, вып. 1, с. 56—62.

Поступила в Редакцию 19.04.13

УДК 623.454.82+621.039.591

ЭТАПЫ ПЕРЕВОДА ОБЪЕКТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯДЕРНОГО ЗАРЯДА В МИРНЫХ ЦЕЛЯХ «Глобус-1» В ПУНКТ КОНСЕРВАЦИИ ОСОБЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

*Касаткин В.В., Касаткин А.В., Ильичев В.А., Седов Н.С., Самородова Т.С.
(ОАО «ВНИПИПромтехнологии», г. Москва)*

Объект «Глобус-1» образован в результате подземного ядерного взрыва на территории Ивановской области в 4,2 км от дер. Галкино на левом берегу реки Шачи, входящей в систему водосбора Волги, по программе глубинного сейсмозондирования земной коры Министерства геологии СССР. Он имеет радиационные особенности ввиду сочетания в одном месте проб-

лем как общих для объектов мирных ядерных взрывов, так и связанных с аварийным характером работ. Общей проблемой для всех объектов является недолговечность цементной забойки и обсадной колонны и наличие в стволе технологической (зарядной) скважины кабелей подрыва и физических измерений. Разрушение цемента и коррозия металла со временем создают каналы

для возможного перетока радионуклидов из зоны взрыва в вышележащие водоносные горизонты и на земную поверхность [1—3].

Радиационная обстановка на территории «Глобуса-1» сформировалась в результате техногенных и природных процессов, включающих в себя:

образование загрязненной территории площадью ~5 км² в результате аварийного истечения газообразных и летучих радионуклидов вследствие разгерметизации заколонного пространства технологической скважины (№ ГБ-1) при проведении ядерного взрыва 19 сентября 1971 г.;

образование накоплений радиоактивных веществ (шлама и глинистого компонента бурового раствора) в предварительно сооруженных амбарах в грунте при бурении двух исследовательских скважин в 1975—1976 гг. (№ И-1, -2) в зоне взрыва для оценки причин аварии и исследования загрязнения недр;

дополнительное загрязнение территории при гидродинамической откачке пластовой воды из исследовательских скважин;

образование приповерхностного хранилища радиоактивного грунта при дезактивации территории (1977 г.) путем снятия загрязненного грунта со сбором в ранее созданные амбары и дезактивация территории отсыпкой чистым песком;

установка в стволах исследовательских скважин цементных пробок (1981 г.) для предотвращения выхода радиоактивного раствора из центральной зоны взрыва на земную поверхность;

опускание цементных пробок в стволе исследовательских скважин (на 20 см от уреза оголовка) с проникновением радиоактивного рассола на устья скважин, выявленное при очередном мониторинге объекта в 1997 г.;

дальнейшее опускание цементных пробок в стволе исследовательских скважин с поступлением радиоактивного рассола на приустьевые площадки и в зону активного водообмена в период паводков;

создание шести разведочно-наблюдательных скважин № 5-рн—10-рн в 2002 г. для контроля миграции радионуклидов;

перераспределение радиоактивного грунта во время паводков, атмосферных осадков и изливания пластовой пресной воды с устья одной из исследовательских скважин;

заиливание стволов исследовательских скважин вследствие сноса грунта при паводках и интенсивных атмосферных осадках в скважины, устья которых расположены ниже земной поверхности, что привело к прекращению притока радиоактивного рассола из исследовательской скважины № И-1 и уменьшению притока из И-2;

герметизация устьев исследовательской (№ И-2) и разведочно-наблюдательной (№ 10-рн) скважин в 2011 г., предотвратившая вынос на земную поверхность радиоактивного рассола из зоны взрыва и пластовой воды из ветлужского водоносного комплекса;

организация новых разведочно-наблюдательных скважин № 100—108 в 2012 г.

Ядерный взрыв энергосодержанием (мощностью) 2,3 кт тротилового эквивалента проведен на глубине 610 м. Разрез в интервале 501,0—702,8 м представлен известняками, доломитами с прослоями и включениями мергелей, ангидритов и гипсов. Эти породы стратиграфически относятся к верхнекаменноугольно-нижнепермским (ассельский ярус) отложениям.

В результате взрыва в недрах образовалась специфическая зона, состоящая из первоначально образованной полости радиусом 14,1 м согласно сейсмическим измерениям при взрыве, столба обрушения высотой (от центра полости) 80 м, зоны дробления радиусом 72,5 м, зоны интенсивного трещинообразования радиусом 160 м и системы отдельных трещин протяженностью до 240 м.

Согласно теоретическим расчетам порода столба обрушения и расплав в первоначально образованной полости относятся к категории радиоактивных отходов. Исследования показывают, что центральная зона ядерного взрыва по существу является аналогом необустроенного инженерными барьерами хранилища радиоактивных породы и жидкости в глубоких геологических формациях, единственным барьером защиты которого является геологическая среда, и должна классифицироваться как «пункт разме-

щения особых радиоактивных отходов». При неблагоприятных обстоятельствах не исключается выход техногенных радионуклидов в зону активного водообмена и на земную поверхность.

Исследования образцов кернового материала, извлеченного из карбонатного коллектора одного из объектов мирных ядерных взрывов, показали, что при взрыве расплав в форме гранул размером менее 1 мм неравномерно распределен в породе, представляющей карбонат кальция с дефицитом CO_2 . Особенностью карбонатных пород в отличие от алюмосиликатных является переход в воду в значительном количестве не только трития и изотопов стронция, но и изотопов цезия. Коэффициент сорбции ^{137}Cs на карбонатной породе существенно зависит от содержания глинистого компонента (рис. 1). Поэтому исследования пластовой воды из центральных зон взрывов нескольких объектов показали различие объемной активности осколочных радионуклидов. Исследования распределения радионуклидов между водой и известняком, извлеченным из столба обрушения «Глобуса-1», также указали на преимущественный переход в водную фазу ^{137}Cs с коэффициентом $K_p \sim 1,6$ мл/г по сравнению со ^{90}Sr ($K_p \sim 12,7$ мл/г).

Существенное влияние на концентрацию радионуклидов в воде исследовательских скважин, пробуренных в центральной зоне взрыва, оказывают наряду с проницаемостью некачест-

венно установленных цементных пробок поступление атмосферных осадков и паводковых вод, а также сорбция радионуклидов на иле, скопившемся в стволе скважины (табл. 1).

Таблица 1. Содержание техногенных радионуклидов в воде на устье ствола исследовательской скважины № И-2, Бк/л

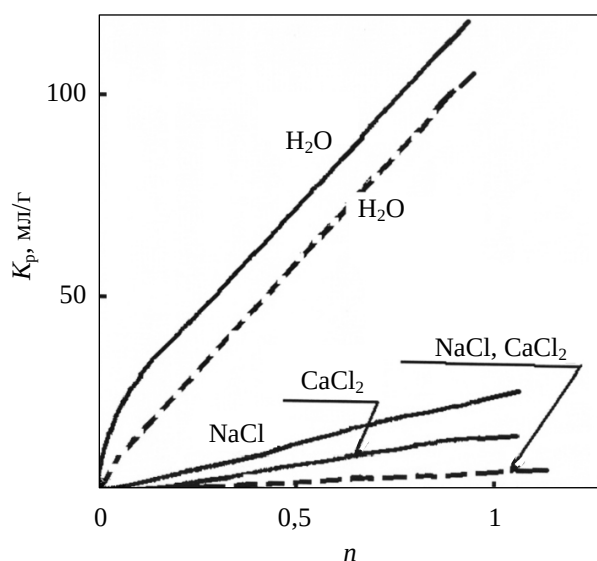
Дата отбора, год	Минерализация, г/л	^3H	^{137}Cs	^{90}Sr
1977	240	$8,9 \cdot 10^4$	$6,3 \cdot 10^4$	$5,3 \cdot 10^4$
2008	143,2	$7,2 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^2$
2011	158,4	$1,1 \cdot 10^5$	$4,6 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$

Наличие радиоактивной высокоминерализованной воды (рассола) в скважинах приводит к разрушению стенок обсадной колонны вследствие коррозии и миграции техногенных радионуклидов по водоносным горизонтам. Подтверждением указанного процесса является появление ^{90}Sr в 2009 г. в ветлужском водоносном комплексе на глубине 98—103 м. Активность воды контролировали многократно в период с 2002 г. посредством отбора и анализа проб объемом 30 дм³ на устье самоизливающейся скважины № 10-рн.

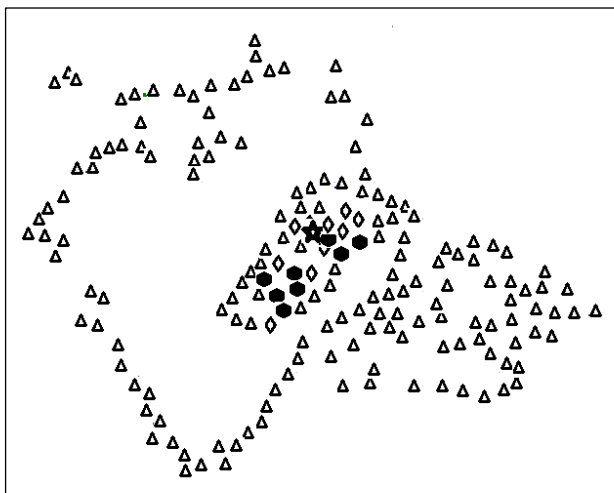
Другим возможным источником появления радиоактивного рассола на земной поверхности является канал заколонного пространства технологической скважины № ГБ-1, образованный вследствие аварийного прорыва газообразных продуктов на земную поверхность при взрыве. Кроме того, наблюдается незначительное просачивание на устье этой скважины рассола из зоны взрыва, что подтверждается наличием ^{137}Cs ($1,2 \cdot 10^3$ Бк/л) и ^{90}Sr ($1,2 \cdot 10^3$ Бк/л) в грунте, отобранном в 2009 г. из межколонного пространства.

Техногенные процессы привели к неравномерному поверхностному загрязнению 4 км² территории. Наибольшая доля радионуклидов (93%) сосредоточена на глубине 15—30 см с проникновением до 1,5 м. По удельной активности грунт соответствует категории промышленных отходов, содержащих радионуклиды.

Неравномерность распределения техногенных радионуклидов по территории показана на рис. 2. Она измерена дозиметром ДКГ-01 «Стал-



Р и с. 1. Сорбция ^{137}Cs (—) и ^{90}Sr (---) в системе CaCO_3 +монтмориллонит (Т:Ж = 1:10, n — массовая доля монтмориллонита)



Р и с. 2. Мощность эквивалентной дозы γ -излучения 0,1—0,3 (Δ), 0,31—0,6 ($\diamond$), >0,6 мкЗв/ч ($\bullet$) скважины ГБ-1 ($\star$) на объекте «Глобус-1» и прилегающей территории

кер» с блоком детектирования БДГ-01 и использованием навигационной системы привязки данных к геодезическим координатам в автоматическом режиме записи. Измерения проводили непрерывно по разным направлениям на высоте 1 м от поверхности с интервалом записи через каждые 10 с.

Из табл. 2 следует:

за пределами объекта «Глобус-1» радиационная обстановка (мощность эквивалентной дозы γ -излучения) соответствует естественному радиационному фону, характерному для данного региона;

на объекте «Глобус-1» средняя мощность эквивалентной дозы γ -излучения в 2 раза превышает естественный фон, в отдельных точках — в 10 раз и более;

наиболее загрязненными участками объекта являются территория хранилища отходов, приустьевые площадки технологической скважины № ГБ-1, исследовательских скважин № И-1, -2.

Т а б л и ц а 2. Максимальная и средняя мощность эквивалентной дозы γ -излучения при минимальной 0,04 мкЗв/ч

Территория	$\dot{H}$, мкЗв/ч	
	максимальная	средняя
Объект «Глобус-1»	1,3	$0,24 \pm 0,17$
Окрестности объекта «Глобус-1»	0,24	$0,12 \pm 0,04$

Хранилище радиоактивных отходов занимает площадь $\sim 660 \text{ м}^2$. Верхний слой грунта, соответствующий категории отходов, расположен на глубине 65—140 см в зависимости от рельефа местности. Основная масса отходов находится в состоянии плавуна (сильно обводненная смесь почвы, глины и песка). Мощность слоя радиоактивного грунта равна $55 \pm 5 \text{ см}$. Остальная масса грунта в теле хранилища соответствует категории материалов, которые загрязнены радионуклидами выше уровня, установленного для неограниченного использования, за исключением верхнего 5—10-сантиметрового слоя. Объем загрязненного грунта составляет $\sim 1650 \text{ м}^3$, в том числе 400 м^3 радиоактивных отходов. Активность тела хранилища определяют два радионуклида: γ -излучающий ^{137}Cs , находящийся в равновесии со ^{137m}Ba , и ^{90}Sr , находящийся в равновесии с ^{90}Y . По исследованиям 2011 г. водная фаза содержит $(1,5 \pm 0,3)10^2 \text{ Бк/л } ^{137}\text{Cs}$, $(3,3 \pm 0,4)10^2 \text{ Бк/л } ^{90}\text{Sr}$ и $21 \pm 14 \text{ Бк/л } ^3\text{H}$.

Активность отходов в приповерхностном хранилище составляет 75 ГБк. Среднее содержание ^{137}Cs в радиоактивных отходах составляет $1,2 \cdot 10^5 \text{ Бк/кг}$, ^{90}Sr — $8,6 \cdot 10^2 \text{ Бк/кг}$. Максимальная удельная активность складированных в хранилище отходов в основном определяется ^{137}Cs и равна $3,6 \cdot 10^5 \text{ Бк/кг}$.

В хранилище поступает вода в процессе инфильтрации поверхностных осадков, с потоком грунтовых вод, направленных в сторону реки Шачи, и до 2012 г. вода, изливаемая из скважины № 10-рн. Миграцию радионуклидов из хранилища контролировали по системе наблюдательных скважин, начиная с 2001 г. Наличие ^{90}Sr (0,41—2,7 Бк/л) и трития (максимально $20,4 \pm 2,4 \text{ Бк/л}$) в воде четвертичных отложений выявлено в скважинах № 9-рн и 101, расположенных примерно в 10 м к югу от хранилища. В пробах грунтовой воды на расстоянии 50 м от хранилища и в воде реки Шачи техногенные радионуклиды содержатся на уровне глобального фона.

Основной риск радиационной угрозы представляет возможность разгерметизации скважин, пробуренных в зоне взрыва, с выносом радиоактивной воды в вышележащие водоносные

горизонты и на земную поверхность. Опасность приповерхностного хранилища обусловлена риском его размыва паводковыми водами со сносом радиоактивного грунта в Шачу и далее в Волгу. Как временные мероприятия для предотвращения поступления радионуклидов в Шачу в 2004 г. было сооружено новое русло для отвода от территории объекта и в 2011 г. затампонированы устья скважин № И-2 и 10-рн (рис. 3).

Для перевода объекта «Глобус-1» в пункт консервации особых радиоактивных отходов необходимо выполнить комплекс работ, включающий:

изоляция центральной зоны ядерного взрыва от вышерасположенных водоносных горизонтов путем закачки в один из водоносных горизонтов над зоной трещинообразования глинистого раствора;

изоляционно-ликвидационные работы на технологической и двух исследовательских скважинах;

ликвидацию всех скважин на промплощадке в радиусе 30 м;

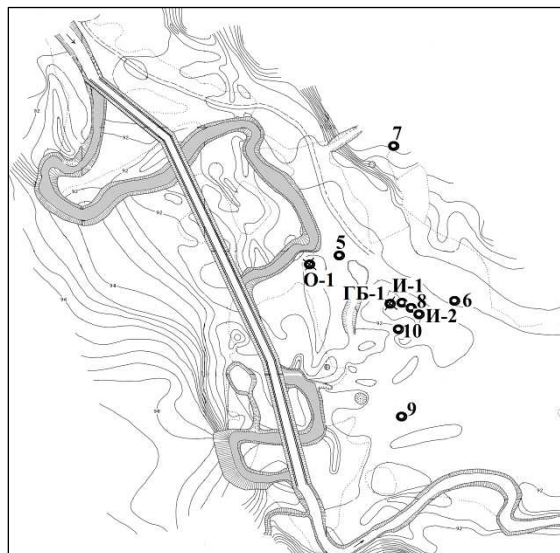
закачку раствора жидкого стекла или бентонита в тело приповерхностного хранилища для увеличения устойчивости к выщелачиванию и разрушению;

гидроизоляцию приповерхностного хранилища и участка расположения устьев технологической и исследовательских скважин от паводковых вод и атмосферных осадков;

ограждение территории с установкой предупреждающих знаков в соответствии с требованиями к организации охранной зоны [4].

Альтернативным и радикальным способом обращения с отходами в поверхностном хранилище является их извлечение, сортировка по активности и упаковка в контейнеры, транспортировка, размещение в специализированных хранилищах. Грунт активностью ниже критериев отнесения к радиоактивным отходам может быть размещен на полигонах промышленных отходов. После обустройства объекта как пункта консервации необходим радиоэкологический мониторинг.

В заключение авторы отмечают большой вклад В.Л. Иванова в выполнение полевых ра-



Р и с. 3. Отводной канал — новое русло реки Шачи (—) на объекте «Глобус-1»; — — ликвидированное русло; О — скважины; ✕ — ликвидированные скважины

бот на всех стадиях исследований объекта и выражают ему за это благодарность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камнев Е.Н., Касаткин В.В., Мамонов Б.П., Ильичев В.А. Основные положения радиационной безопасности при выводе из эксплуатации объектов проведенных ядерных взрывов в мирных целях. — В сб.: Безопасность ядерных технологий. Обращение с радиоактивными отходами. VII Межд. конф. Санкт-Петербург, 27 сентября—1 октября 2004, с. 256—258.
2. Лопатин В.В., Ильичев В.А., Касаткин В.В. и др. Защитные мероприятия по ликвидации последствий аварии на объекте подземного ядерного взрыва «Глобус-1» в Ивановской области. — В сб.: Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий. Т. 2. Радиоактивное загрязнение окружающей среды после ядерных взрывов и аварий. Мониторинг, базы данных, поля загрязнения и их динамика. Под ред. Ю.А. Израэля. СПб: Гидрометеиздат, 2006, с. 221—224.
3. Касаткин В.В., Камнев Е.Н., Клишин В.И., Ильичев В.А. «Глобус-1»: радиоактивное загрязнение и проект реабилитации участка. — Безопасность окружающей среды, 2009, № 1, 82—86.
4. Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения (1965—1988 гг.) ядерных взрывов в мирных целях. СанПиН 2.6.1.2819—10. Утв. Постановлением Главного гос. санитарного врача от 29.12.2010 № 183.

Поступила в Редакцию 25.12.13