



УДК 543.52:541.18.045

Л. И. Руденко, В. Е. Хан, А. А. Одинцов, О. В. Джужа

Фазовое распределение, формы нахождения и доля микрочастиц в грунтовой воде по ^{137}Cs , ^{90}Sr , урану и трансурановым элементам

(Представлено академиком НАН Украины В. П. Кухарем)

Исследовано фазовое распределение и формы нахождения изотопов ^{137}Cs , ^{90}Sr , урана и трансурановых элементов (плутония, америция) на грубодисперсной твердой фазе, коллоидных частицах и в растворенном состоянии в грунтовых водах из скважин 1-3А, 4-3А и 2-Г промплощадки ЧАЭС за 2011–2012 гг. Показана важная роль микрочастичек размером 0,1–0,2 мкм и коллоидных частиц размером 0,01–0,1 мкм в механизме миграции радионуклидов с поверхностных слоев почвы в грунтовые воды. Основной экологической опасностью является миграция актинидов, связанных с техногенными коллоидными частицами.

В настоящее время влияние объекта “Укрытие” на экологическую обстановку в ближней зоне Чернобыльской АЭС определяется двумя основными факторами: выбросом радиоактивных аэрозолей через технологические отверстия и неплотности на верхних отметках объекта и его легкой кровли, а также неорганизованными протечками радиоактивно загрязненных вод, которые могут попасть в грунтовые воды.

Мониторинг радиоактивного загрязнения поверхностных и грунтовых вод является одной из основных задач контроля миграции радионуклидов в водных системах. Динамика распределения техногенных радионуклидов в системе вода — взвесь — донные отложения является предметом ряда исследований [1–4].

Регулярный контроль радиационного состояния вод из наблюдаемых скважин, который выполняется на всех ядерных объектах, в том числе и на ЧАЭС, сводится к регистрации изменения концентрации радионуклидов. Для решения практических задач по снижению радиоактивного загрязнения поверхностных и грунтовых вод необходимо знать фазовое распределение и формы нахождения радионуклидов.

В районе расположения ЧАЭС имеются два водоносных горизонта: верхний — четвертичный безнапорный — залегает на глубине от долей метра до 5–8 м, сложен мелко- и среднезернистыми песками с линзами супесей и суглинков; нижний — бучакско-каневский напорный — имеет мощность 15–17 м и сложен песками, местами с примесью гравия [5].

© Л. И. Руденко, В. Е. Хан, А. А. Одинцов, О. В. Джужа, 2013

Оба горизонта разделены слоем киевских мергелей и мергелистых глин. Мощность слоя от 5–7 м до 15 м. Слой киевских мергелей служит кровлей бучакско-каневского горизонта и одновременно подстилает четвертичный водоносный горизонт.

Потоки загрязненных вод от могильников, захоронений и промплощадки АЭС направлены в сторону р. Припять и затрагивают четвертичный водоносный горизонт и зону контрольных скважин. Оценка загрязненности бучакского водного потока сводится к вопросу о степени проницаемости водоупорной кровли, сложенной из киевских мергелей и мергелистых глин. Проницаемость мергелевой кровли зависит от того, есть ли в слое мергелей “окна”, нарушающие целостность перегородки.

Нельзя исключать наличие отдельных слоев или перемычек, сложенных из пород с малой величиной сорбционной емкости по отношению к техногенным радионуклидам. Существуют случаи, когда при закачке загрязненных вод возникали опасные протечки, которые не прогнозировались при разведывательном бурении [6].

Цель настоящего сообщения — изучение фазового распределения и форм нахождения ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{238-240}\text{Pu}$, ^{241}Am и U в образцах грунтовой воды, отобранных из скважин промплощадки объекта “Укрытие”, на мелкодисперсной твердой фазе, коллоидных частицах и в растворенном состоянии.

В данной работе грунтовые воды отбирались из скважин 1-3А, 4-3А и 2-Г: в северной части промплощадки на каскадной стене ниже по потоку грунтовых вод находятся скважины 1-3А и 4-3А, а 2-Г расположена в локальной зоне объекта “Укрытие” ниже по потоку грунтовых вод. Направление потока грунтовых вод — с юго-запада на северо-восток. Разгрузка потока грунтовых вод происходит в русло р. Припять со скоростью горизонтальной фильтрации вод в пределах 15–35 м/год при расходе от 60 до 120 м³/сут. Глубина пробуренных скважин 1-3А и 4-3А составляет соответственно 24,5 и 26,5 м, а скважины 2-Г — 9 м. Скважины оборудованы фильтрами, расположенными в верхней зоне насыщения (1–2 м ниже минимального уровня грунтовых вод). Данная конструкция скважин, учитывая наличие воды по разрезу слоя загрязненных радионуклидами пород, позволяет исследовать именно верхний слой грунтовых вод. Некоторые гидрохимические свойства грунтовой воды из наблюдаемых скважин объекта ЧАЭС демонстрирует табл. 1 [7]. Как видно из данных таблицы, в гидрохимическом составе грунтовых вод основными компонентами, определяющими состав воды и ее минерализацию, являются катионы Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} и анионы Cl^- , Br^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- . Хлориды, сульфаты, гидрокарбонаты принадлежат к числу хорошо растворимых соединений, которые определяют химический состав грунтовых вод (гидрокарбонатный, сульфатный, хлоридный). Общая минерализация воды в исследуемых скважинах составляет 310–340 мг/дм³ и характерна для грунтовых вод локальной зоны объекта “Укрытие”.

Подготовка грунтовой воды включала последовательное фильтрование через бумажный фильтр “белая лента” с размером пор около 3 мкм и капроновый фильтр с размером

Таблица 1

Номер скважины	pH	Eh, мВ	Концентрация, мг/дм ³									
			HCO_3^-	CO_3^{2-}	Br^-	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
1-3А	6,9	180	150	—	190	58	20	1,2	40	13	6,4	26
4-3А	6,2	205	84	—	120	120	31	2,3	52	5,0	8,1	27
2-Г	9,9	175	160	33	46	91	3,5	2,0	32	40	3,0	17

пор 0,2 мкм. Для выделения тонкодисперсных взвешенных примесей из исследуемой воды использовался метод ультрафильтрации с набором мембранных фильтров с размером пор 0,1 и 0,01 мкм. Фильтрат, концентрат и фильтры направляли на радиометрию. Радионуклиды, находящиеся в фильтрате после мембраны 0,01 мкм, условно считали растворенными.

Исследованы формы нахождения радионуклидов в образцах грунтовых вод после фильтрования через мембраны 0,01 мкм. Фильтрат параллельно пропускали через катионообменную смолу КУ-2-8чСВ в водородной форме и через анионообменную смолу АВ-17-8чСВ в гидроксильной форме. Определяли активность изотопов Cs, Sr, трансурановых элементов и содержание U в исходной грунтовой воде, а также в фильтратах после мембраны 0,01 мкм, катионита и анионита. Находили вклад каждого из радионуклидов и урана, ассоциированных на твердой фазе (крупнее 0,1 мкм) и коллоидных частицах (0,01–0,1 мкм), а также в ионнодисперсной форме (отдельно катионная и анионная формы) в их активность (концентрацию) в исходной воде. Для определения содержания урана и радионуклидов на твердой фазе проводили радиохимический анализ осадков на фильтрах.

Для гамма-спектрометрических измерений и радиохимического анализа отбирали пробы грунтовой воды объемом 1,5–2,0 дм³. Концентрирование проб получали упариванием до влажных солей. Для озоления органической составляющей сухой остаток обрабатывали концентрированной азотной кислотой с добавлением перекиси водорода при упаривании до сухих солей.

Содержание U, Pu и Am определяли альфа-спектрометрическим методом после ионообменного выделения по методике, описанной в статье [8]. Для определения химического выхода U, Pu и Am вносили метки ²³²U, ²⁴²Pu и ²⁴³Am. Активность ²³⁸U, ²³⁸Pu, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu и ²⁴¹Am измеряли на восьмиканальном альфа-спектрометре ОСТЕТЕ РС фирмы ORTEC с полупроводниковыми кремниевыми детекторами серии ULTRA площадью 300 мм². Погрешность измерений активности ²³⁸U, ²³⁸Pu, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu и ²⁴¹Am составляла ±(15–40)% при доверительной вероятности $p = 0,95$. Весовое количество урана в осадках на фильтрах и его концентрацию в воде рассчитывали из активности ²³⁸U.

Стронций из предварительно подготовленных проб воды и осадков на фильтрах выделяли экстракционно-хроматографическим методом. В качестве носителя использовали порошки фторопласта-4, импрегнированного раствором 0,4 моль/дм³ эфира дициклогексил-18-краун-6 в хлороформе. Химический выход Sr 90–95%. Активность ⁹⁰Sr измеряли с помощью β-радиометра РУБ-01П, в состав которого входят измерительное устройство УИ-38П1 в комплекте с блоком детектирования БДЖБ-06П1. Минимально измеряемая активность ⁹⁰Sr за 1800 с — 0,7 Бк (для плоской пробы). Погрешность измерений активности Sr ±25% при $p = 0,95$.

Содержание ¹³⁷Cs в образцах определяли на гамма-спектрометре с германиевым детектором LG 2020, имеющем входное бериллиевое окно толщиной 0,5 мм с энергетическим разрешением 1,6 МэВ ⁶⁰Co и 0,5 кэВ ²⁴¹Am. Минимально детектируемая активность ¹³⁷Cs составляла (0,1 ± 0,02) Бк. Погрешность измерений активности ¹³⁷Cs ±22% при $p = 0,95$.

Данные радиохимического состава и формы нахождения ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ^{238–240}Pu, ²⁴¹Am и U в образцах грунтовой воды (% активности (концентрации)) из скважин промплощадки объекта “Укрытие” на грубодисперсной твердой фазе, коллоидных частицах и в растворенном состоянии демонстрируют табл. 2 и 3 (соответственно 2011 и 2012 гг.).

Активность ¹³⁷Cs в изученных грунтовых водах составляла 28–50 Бк/дм³. Доля растворенного ¹³⁷Cs, находящегося преимущественно в катионной форме, 23–83% общей актив-

ности этого радионуклида в пробе. Вклад активности ^{137}Cs на твердой фазе с размером частиц 0,1–0,2 мкм колеблется в пределах от 6 до 12%, а на коллоидных частицах от 6 до 30%. Вклад ^{137}Cs на твердой фазе с размером частиц больше 0,2 мкм в суммарную активность радионуклида в воде равен 2–42%.

Активность ^{90}Sr в исследованных пробах грунтовых водах 23–160 Бк/дм³. Доля растворенного ^{90}Sr , находящегося преимущественно в катионной форме, равна 68–96% общей активности радионуклида в воде. Вклад активности ^{90}Sr на твердой фазе с размером частиц 0,1–0,2 мкм колеблется в пределах от 2,2 до 4,9%, а на коллоидных частицах — от 1,2 до 26% в суммарную активность радионуклида в пробах воды. Вклад ^{90}Sr , находящегося

Таблица 2

Скважина	Радионуклиды	Активность в воде, Бк/дм ³	Фаза (размер частиц, мкм)			
			грубодисперсная твердая		коллоидная (0,01–0,1)	ионно-дисперсная
			>0,2	0,1–0,2		
1-3А	^{137}Cs	32	42	6,0	11	41
	^{90}Sr	56	23	4,5	7,5	65
	U	1,4*	16	4,5	2,5	77
	$^{238-240}\text{Pu}$	1,6	43	6,0	12	39
	^{241}Am	1,4	63	14	20	3,0
4-3А	^{137}Cs	28	2,0	9,0	6,0	83
	^{90}Sr	160	0,6	2,2	1,2	96
	U	0,13*	44	12	14	30
	$^{238-240}\text{Pu}$	0,33	2,0	47	26	25
	^{241}Am	0,44	1,0	51	35	13

*Концентрацию определяли в мкг/дм³.

Таблица 3

Скважина	Радионуклиды	Активность в воде, Бк/дм ³	Фаза (размер частиц, мкм)				
			грубодисперсная твердая		коллоидная (0,01–0,1)	ионно-дисперсная	
			>0,2	0,1–0,2		катионная форма	анионная форма
1-3А	^{137}Cs	50	36	11	30	21	2,0
	^{90}Sr	50	2,7	2,3	26	57	12
	U	0,90*	19	33	14	13	21
	$^{238-240}\text{Pu}$	1,2	9,4	9,7	77	0,9	3,0
	^{241}Am	1,1	17	12	68	1,4	1,6
4-3А	^{137}Cs	14	41	12	12	27	8,0
	^{90}Sr	23	17	2,9	11	68	1,1
	U	0,63*	32	4,6	8,4	55**	
	$^{238-240}\text{Pu}$	0,25	38	27	29	3,0	3,0
	^{241}Am	0,63	59	14	22	2,0	3,0
2-Г	^{137}Cs	37	27	9,5	22	38	3,5
	^{90}Sr	50	9,3	4,9	18	62	5,8
	U	1,1*	10	3,0	23	27	37
	$^{238-240}\text{Pu}$	0,32	23	17	51	6,6	2,4
	^{241}Am	0,54	20	17	62	0,66	0,34

*Концентрацию определяли в мкг/дм³.

**Ионно-дисперсная фаза.

на твердой фазе с размером частиц больше 0,2 мкм, в его активность в исходной воде равен 0,6–23%.

Концентрация урана в грунтовой воде составляла 0,13–1,4 мкг/дм³, доля растворенного U, находящегося как в анионной, так и катионной формах, — 30–77% его общего содержания в воде. Вклад твердой фазы с размером частиц 0,1–0,2 мкм в суммарное содержание U в воде равен 4,5–33%, а на коллоидных частицах — 2,5–23% суммарного его содержания в образцах грунтовых вод. Вклад урана с размером частиц больше 0,2 мкм в его активность в исходной воде равен 10–44%.

Объемная активность изотопов плутония ($^{238}\text{Pu} + ^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$) в изученных грунтовых водах составляла 0,25–1,6 Бк/дм³. Доля растворенного $^{238-240}\text{Pu}$, находящегося как в анионной, так и в катионной формах, равна 3,9–39% общей активности этих изотопов в исходной воде. Вклад твердой фазы с размером частиц 0,1–0,2 мкм в суммарную активность изотопов Pu в воде равен 6–47%, а на коллоидных частицах сосредоточено 12–77% суммарной активности изотопов Pu в воде. Вклад плутония, размер частиц которого больше 0,2 мкм, в его активность в исходной воде равен 2–43%.

Активность ^{241}Am в грунтовых водах 0,44–1,4 Бк/дм³. Доля растворенного ^{241}Am , находящегося как в анионной, так и катионной формах, равна 1–13% общей активности этого изотопа в воде. Вклад твердой фазы с размером частиц 0,1–0,2 мкм в суммарную активность ^{241}Am в воде колеблется от 12 до 51%, а на коллоидных частицах — находится от 20 до 68% суммарной активности ^{241}Am в пробах воды. Вклад ^{241}Am , размером частиц которого больше 0,2 мкм, в его активность в исходной воде равен 1–63%.

В данном сообщении приведены новые данные о существенной роли твердой фазы с размером частиц 0,1–0,2 мкм и коллоидных частиц в механизме переноса радионуклидов водой из поверхностных слоев почвы в грунтовые воды. Об этом свидетельствуют значения активностей радионуклидов, ассоциированных на этих частицах (см. табл. 2, 3). Так, активность ^{137}Cs на частицах составляет 3,4–21 Бк/дм³ в пробах воды, что соответствует 15–41% общей активности этого изотопа в грунтовой воде. Активность ^{90}Sr на микрочастицах составляет 3,2–15 Бк на 1 дм³ воды, что соответствует 3,4–28% общей активности этого изотопа в грунтовой воде. Содержание U в составе микрочастиц в пересчете на 1 дм³ воды равно 0,034–0,42 мкг, что соответствует 7–47% суммарного содержания U в грунтовой воде. Активность изотопов Pu на микрочастицах составляет 0,22–1,0 Бк на 1 дм³ воды, что соответствует 18–87% общей активности этих изотопов в грунтовой воде. Активность ^{241}Am на микрочастицах составляет 0,23–0,88 Бк на 1 дм³ воды, что соответствует 34–86% общей активности этого изотопа в грунтовой воде.

Проведено сопоставление активности радионуклидов в грунтовых водах из скважин промплощадки объекта “Укрытие”, полученных в нашем исследовании, с такими же данными за период с декабря 2004 г. по февраль 2006 г. по скважине 2-Г [9]. Активности ^{137}Cs и ТУЭ в 2011–2012 гг. существенно возросли по сравнению с активностями этих радионуклидов, которые были определены в исследовании [9], что, вероятно, связано с сезонными колебаниями уровня грунтовых вод и миграцией радионуклидов из вышележащих высокоактивных слоев почвы.

Содержание ^{90}Sr в пробах грунтовой воды из наблюдаемых скважин в 2004–2006 гг. составляло 71–540 Бк/дм³ и снизилось в 2011–2012 гг. до значений 23–160 Бк/дм³.

Распределение радионуклидов по различным фракциям взвеси показывает, что Pu и Am в значительной степени связаны с крупнодисперсной фракцией с размером частиц более 3 мкм и вероятнее всего находятся в составе топливных “горячих” частиц.

В данном исследовании выявлена еще одна особенность проб грунтовых вод, связанная с состоянием и формами нахождения U, Pu и Am. Так, содержание U в пересчете на 1 дм³ воды в составе ионно-дисперсной фазы равно 30–77% общего его содержания в воде, при этом вклад катионной составляющей равен 21–37% (см. табл. 3). Активность изотопов Pu в составе ионно-дисперсной фазы составляет 3,9–39% общей их активности в воде, вклад анионной составляющей равен 2,4–3,0%. Активность ²⁴¹Am в составе ионно-дисперсной фазы составляет 1–13% общей ее активности в грунтовой воде, при этом вклад анионной составляющей равен 0,34 – 3%. Присутствие как катионных, так и анионных форм U, Pu и Am в грунтовой воде вызвано возможностью образования их ассоциатов с фракциями фульвокислот и гуминовых кислот, характерных для различных почв ближней зоны отчуждения ЧАЭС [10].

Миграция радионуклидов в почве происходит в результате нескольких одновременно протекающих процессов: диффузии в почвенном растворе и двойном диффузионном слое, переносе с гравитационным током воды [11, 12]. Диффузия ионов часто вносит основной вклад в суммарное перемещение радионуклидов в почвах [11]. При конвективном переносе радионуклиды мигрируют в почвах не только в растворенном состоянии, но и в виде твердой фазы [12]. Установлено, что частицы размером 0,5–20 мкм способны перемещаться в почве с током свободной влаги по типу механического переноса через поры, а частицы меньшего размера – с движением пленочной влаги [13]. Независимо от типа почв большое количество нуклидов задерживается в верхней части почвенного профиля (0–10 см) и их содержание уменьшается по глубине.

Таким образом, по итогам исследований, выполненных в 2011–2012 гг., показано, что наряду с миграцией радионуклидов в ионной форме существенный вклад в механизм переноса радионуклидов вносят микрочастицы размером 0,1–0,2 мкм и коллоидные частицы размером 0,01–0,1 мкм. Экспериментальные данные механизма миграции радионуклидов с промплощадки объекта “Укрытие” свидетельствуют о быстрой их миграции радионуклидов с поверхностных слоев почвы в грунтовые воды и впервые были опубликованы в работе [14].

1. Новиков А. П., Калмыков С. Н., Ткачев В. В. Формы существования и миграция актиноидов в окружающей среде // Рос. хим. журн. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева). – 2005. – **49**, № 2. – С. 119–126.
2. Горяченкова Т. А., Казинская И. Е., Кузовкина Е. В. и др. Изучение связи радионуклидов с коллоидным веществом почвенных растворов // Радиохимия. – 2009. – **51**, № 2. – С. 178–186.
3. Kersting A. B., Efurud D. W., Finnegan D. L. et al. Migration of plutonium in ground water at the Nevada Test Site // Nature. – 1999. – **397**, No 6714. – P. 56–59.
4. Penrose W. R., Polzer W. L., Essington E. M. et al. Mobility of Plutonium and Americium through a Shallow Aquifer in a Semiarid Region // Environ. Sci. and Technol. – 1990. – **24**, No 2. – P. 228–234.
5. Кононович А. Л., Осколков Б. Я., Кудрявцева Н. А. и др. Оценка радиоактивного состояния подземных вод в районе Чернобыльской АЭС // Атом. энергия. – 1994. – **77**, № 5. – С. 386–391.
6. Батук Д. Н., Ширяев А. А., Калмыков С. Н. и др. Взаимодействие U, Np и Pu с коллоидными частицами SiO₂ // Радиохимия. – 2012. – **54**, № 6. – С. 522–526.
7. Радиогидроэкологический мониторинг в районе объекта “Укрытие”: (Отчет о НИР, дог. 328/11) / Ин-т пробл. безопасности АЭС НАН Украины. – Чернобыль, 2011. – 128 с.
8. Одинцов А. А., Пазухин Э. М., Хан В. Е. Методика одновременного определения урана и трансураниевых элементов в грунтовой воде и жидких радиоактивных отходах объекта “Укрытие” // Радиохимия. – 2005. – **47**, № 5. – С. 467–471.
9. Одинцов А. А., Хан В. Е., Краснов В. А., Пазухин Э. М. Радионуклиды в грунтовой воде наблюдательных скважин локальной зоны объекта “Укрытие” // Радиохимия. – 2007. – **49**, № 5. – С. 467–472.

10. *Одинцов А. А., Пазухин Э. М., Саженьюк А. Д.* Распределение ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am и ^{244}Cm по компонентам природных органических веществ ближней зоны отчуждения ЧАЭС // Там же. – 2005. – 47, № 1. – С. 91–96.
11. *Павлоцкая Ф. И.* Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах. – Москва: Атомиздат, 1974. – 216 с.
12. *Прохоров В. М.* Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 98 с.
13. *Мельникова М. К., Ковеня С. В.* Применение радиоактивных индикаторов для моделирования процесса лессиважа // Почвоведение. – 1971. – № 10. – С. 42–49.
14. *Руденко Л. И., Хан В. Е., Панасюк Н. И.* Физико-химическое обоснование механизма миграции радионуклидов из объекта “Укрытие” и его промплощадок в грунтовые воды // Радиохимия. – 2003. – 45, № 3. – С. 268–272.

*Институт биоорганической химии
и нефтехимии НАН Украины, Киев
Институт проблем безопасности атомных
электростанций НАН Украины, Чернобыль*

Поступило в редакцию 13.02.2013

Л. І. Руденко, В. Є. Хан, О. О. Одинцов, О. В. Джужа

Фазовий розподіл, форми знаходження мікрочастинок у ґрунтовій воді за ^{137}Cs , ^{90}Sr , ураном і трансурановими елементами

Досліджено фазовий розподіл та форми знаходження ізоотопів ^{137}Cs , ^{90}Sr , урану й трансуранових елементів (плутонію, америцію) на грубодисперсній твердій фазі, колоїдних частинках і в розчиненому стані в ґрунтових водах зі свердловин 1-3А, 4-3А й 2-Г проммайданчика ЧАЕС за 2011–2012 рр. Показано важливу роль мікрочастинок розміром 0,1–0,2 мкм і колоїдних частинок розміром 0,01–0,1 мкм у механізмі міграції радіонуклідів з поверхневих шарів ґрунту в ґрунтові води. Основною екологічною небезпекою є міграція актинідів, пов'язаних з техногенними колоїдними частинками.

L. I. Rudenko, V. E. Khan, O. O. Odintsov, O. V. Dzhuzha

Phase distribution and modes of occurrence percentage of microparticles in the groundwater at ^{137}Cs , ^{90}Sr , uranium, and transuranic elements

The phase distribution and modes of occurrence of isotopes ^{137}Cs , ^{90}Sr , uranium, and transuranic elements (plutonium, americium) for the coarse solid phase, colloidal particles, and dissolved in groundwater from wells 1-3A, 4-3A, and 2-Г of the ChNPP industrial site for 2011–2012 are studied. The important role of microparticles with a size of 0.1–0.2 microns and colloidal particles with a size of 0.01–0.1 microns in the mechanism of migration of radionuclides from the surface layers of the soil into the groundwater. The main environmental threat from the migration of actinides is associated with man-made colloidal particles.