Янин Е.П. Радионуклиды в осадках городских сточных вод (источники, распределение, посупление в водные системы) // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды, 2008, № 6, с. 81–122.

Введение

Осадки сточных вод (ОСВ), образующиеся на городских станциях очистки сточных вод (городских очистных сооружениях), содержат значительные количества разнообразных поллютантов, способных рассеиваться в окружающей среде при хранении, утилизации и использовании этих отходов [2, 13, 16, 26, 44]. Достаточно давно установлено, что ОСВ содержат природные и техногенные радионуклиды, поступающие на городские очистные сооружения с промышленнобытовыми сточными водами, а также в составе поверхностного стока, отводимого в канализационные системы городов [70, 115]. Эти радионуклиды при образовании, размещении, утилизации и практическом использовании ОСВ могут обусловливать дополнительную радиационную нагрузку на человека и природные экосистемы. Например, в 1960-х гг. ОСВ, загрязненные плутонием, поступавшим на очистные сооружения со стоками Лоуренской Ливерморской национальной лаборатории (США, шт. Калифорния), использовались в качестве мелиорантов садовых почв [75]. В 1994 г. был издан доклад Центрального контрольно-финансового управления США (US GAO), в котором описано 9 случаев загрязнения станций очистки сточных вод и прилегающих территорий, включая ОСВ и золу, образующуюся при их сжигании, различными радионуклидами, что в некоторых местах потребовало проведения дорогостоящих дезактивационных работ [78, 103]. В последующие годы в США было идентифицировано еще несколько случаев радиоактивного загрязнения муниципальных систем очистки сточных вод, ОСВ и их золы [78, 87]. В работе А. Пола и др. [104] приводятся результаты исследований применения ОСВ в качестве агромелиорантов, свидетельствующие о том, что внесение осадков в почву в 4-6 раз увеличивает радиоактивное загрязнение в районе их использования по сравнению с местным фоном. Вследствие инфильтрации растворимых радиоактивных соединений наблюдалось загрязнение всего почвенного профиля и даже грунтовых вод. В 2000 г. в Великобритании был опубликован доклад Агентства по охране окружающей среды, в котором анализируются источники и судьба радиоактивных материалов, используемых в неядерной индустрии и поступающих с отводимыми в городскую канализацию со сточными водами и поверхностным стоком [74]. Многие из этих радионуклидов имеют период полураспада, равный часам, дням или неделям, но, тем не менее, знание их распределения в ОСВ, как отмечается в указанном документе, представляет определенный интерес при использовании данных отходов в сельском хозяйстве, особенно при возможном поступлении поллютантов в сельскохозяйственные растения и в организм пастбищных животных. Изучение распределения радионуклидов в ОСВ также представляет научно-практический интерес с точки зрения установления барьерной роли городских очистных сооружений, возможного поступления поллютантов в поверхностные водные объекты и их накопления в донных отложениях, особенно в техногенных илах, формирующихся в зонах интенсивного техногенного загрязнения.

Источники поступления радионуклидов на городские очистные сооружения

В настоящее время основную часть облучения население земного шара получает от естественных источников радиации, которые в среднем обеспечивают более 5/6 годовой эффективной эквивалентной дозы [31]. Основные природные радионуклиды (радионуклиды природного проис-

хождения), встречающиеся в горных породах Земли, – это ⁴⁰K, ⁸⁷Rb и члены двух радиоактивных семейств, берущих начало соответственно от ²³⁸U и ²³²Th – долгоживущих изотопов, включившихся в состав Земли с самого ее рождения. Согласно определению МАГАТЭ [27], термин «радионуклиды природного происхождения» обычно используется для обозначения первичных радионуклидов 40 K, 235 U, 238 U и 232 Th (продукт распада первичного 236 U) и продуктов их радиоактивного распада, однако в их число могут также входить тритий (³H – естественный радиоактивный изотоп водорода) и углерод-14 (14С), низкие концентрации которых создаются естественными процессами активации.

Примерно 3/4 годовой индивидуальной эффективной эквивалентной дозы облучения, получаемой населением от земных источников, и примерно половину этой дозы от всех естественных источников радиации обеспечивают радон и его дочерние продукты радиоактивного распада. В некоторых регионах определенную роль играют источники радиации, созданные или усиленные человеком. Как правило, индивидуальные дозы, получаемые разными людьми от искусственных источников, сильно различаются, но в большинстве случаев эти дозы весьма невелики (табл. 1). Лишь в исключительных случаях облучение за счет техногенных источников оказывается значительно интенсивнее, чем за счет естественных. По данным [112], средние дозы радиации из различных источников в США составляют: внешний радиационный фон – 60 мкР/год, природный калий-40 (внутренние источники) -40, радон помещений -200, окружающий воздух -5, рентгенография – 10 мкР/сеанс, другие искусственные источники (медицина и пр.) – 60 мкР/год. Согласно [94], источником радиации, поставляющим 14% суммарного облучения, являются космические лучи и атмосферные выпадения, образующиеся после ядерных взрывов, 19% поставляется из почвы, 37% из радиоактивных газов воздуха и строительных материалов, 17% из животных и растений, 11,5% за счет рентгенологических исследований, 1,5% дает угольная и ядерная энергетика. По последним данным, среднемировое значение суммарной дозы от всех источников составляет около 3 мЗв/год, для России это значение оценивается примерно в 4 мЗв/год, причем наибольший вклад (85% и 70% соответственно) в эти дозы вносят природные источники ионизирующего излучения (табл. 2).

Таблица 1. Среднегодовые фоновые дозы радиации для населения, обусловленные природными и искусст-

венными источниками радиации, мкЗв/год [47, 72]

Источники радиации	Средняя экспозиция	Типичный интервал			
Природные					
Земные (почвы, породы, стройматериалы и пр.)	300	100-800			
Радон в воздухе помещений	2000	300-8200			
Космическая радиация (на уровне моря)	300	300-800			
Внутренние (ткань и кости организма)	400	200-2000			
Искусственные					
Медицинские	500	-			
Потребление продуктов	100	-			
Атмосферные выпадения (испытание оружия)	40	-			
Выбросы атомных станций	10	-			
Другие (включая профессиональные)	10	-			
Сумма	3660	900-10800			

Радиоактивные материалы поступают на городские очистные сооружения главным образом в составе бытовых и промышленных сточных вод. Если в городах используется комбинированная система водоотведения, то на очистные сооружения поступает также поверхностный (дождевой, талый, поливочно-моечный) сток с городской территории, в составе которого могут присутствовать природные и техногенные радионуклиды, выпавшие на подстилающие поверхности и(или) присутствующие в почвогрунтах.

Таблица 2. Средние годовые дозы облучения населения по данным Научного комитета ООН по действию

атомной радиации, мкЗв [18]

атомной радиации, мкЗв [18]		
Источники	Среднемировая доза	Типичный диапазон
	Природные	
Космическое излучение:		
Ионизирующая компонента	280	
Нейтронная компонента	100	
Космогенные радионуклиды (¹⁴ С и др.)	12	
Сумма	390	300-1000
Гамма-излучение	480	300-600
Ингаляция:		
²¹⁰ Pb, ²¹⁰ Po, ²³² Th и др.	6	
²²² Rh и дочерние продукты распада	1150	
²²⁰ Rn и дочерние продукты распада	100	
Сумма	1260	200-10000
Поступление с пищей и водой:		
40 K	170	
²¹⁰ Pb, ²¹⁰ Po, ²²⁸ Ra, ²²⁶ Ra и др.	120	
Сумма	290	200-800
Повышенное производственное облучение	2	
Итого	2400	1000-10000
	Искусственные	·
Медицинское облучение *	400	
Глобальные выпадения	5	
Профессиональное облучение	0,5	
Загрязнение территорий	2	
Текущие выбросы и сбросы	<0,2	
Итого	400	0-1200
Всего за счет всех источников	2800	1000-10000

^{*} Терапевтическое облучение обычно исключается из рассмотрения при оценке доз облучения населения.

Основными источниками природных радионуклидов являются горные породы с повышенным, но рассеянным содержанием радионуклидов — сланцы, бурые угли, известняки, песчаники, торфяники, железосиликатные породы, а также радиоактивные воды [5, 31, 33, 36, 39]. Как правило, основная часть природных радионуклидов (40 K, 87 Rb, 90 Sr, 137 Cs, 226 Ra, 228 Ra, 222 Th, 238 U и некоторые другие) поступает в канализацию с поверхностным стоком, из подземных вод, а также со сточными водами [78, 87, 106]. В поверхностный сток могут попадать первичные природные радионуклиды и продукты их распада, космогенные радионуклиды, а также радионуклиды, в свое время выброшенные в атмосферу при испытаниях ядерного оружия и техногенных авариях и затем выпавшие на различные подстилающие поверхности, накопившиеся в почвах и уличной пыли, поступившие в грунтовые воды и т. д. [29, 38, 40, 52, 56]. В г. Братиславе к наиболее важным радионуклидам, создающим радиоактивное загрязнение городской атмосферы, относятся ³H, ¹⁴C и ⁸⁵Kr [118]. В промышленных городах нередко отмечается загрязнение верхних горизонтов почв ураном, торием и некоторыми другими радионуклидами [16, 38], что не исключает их поступления в поверхностный сток и сточные воды.

В настоящее время радиоактивные материалы используются в основном в четырех специфических сферах: а) цикл ядерного топлива, б) промышленность, в) медицина и биология, г) другие научные исследования и применения [7, 8, 24, 28, 31, 35, 57]. Например, в г. Москве существует несколько предприятий и видов деятельности, связанных с получением и использованием радиоактивных материалов, в том числе эксплуатация (начало 1990-х гг.) девяти исследовательских ядерных реакторов [9].

Основными источниками поступления радионуклидов на очистные сооружения городов являются сточные воды медицинских и научно-исследовательских учреждений, а также промышленных предприятий, использующих в своей деятельности ионизирующее излучение и радиоактивные вещества [3, 7, 19, 28, 29, 31, 61, 85, 91]. Так, сточные воды медицинских учреждений и

бытовой сток города содержат радионуклиды, поступающие с выделениями стационарных и амбулаторных пациентов. Канализационный сток жилого сектора содержит радиоактивные материалы, первичными источниками которых являются пищевые продукты, особенно растительного происхождения, хозяйственно-бытовые, минеральные и питьевые воды (в том числе с повышенным содержанием радона), некоторые дезинфицирующие средства и т. д. [1, 6, 21, 52, 54, 60, 73, 86, 96].

В настоящее время радиоактивные материалы широко используются в различных отраслях промышленности, например, в промышленной радиографии, рентгеновской флюоресценции, при добыче полезных ископаемых, в сталелитейной, нефтеперерабатывающей, угледобывающей промышленности, в авиационно-космической технике; являются составной частью различных измерительных приборов (дефектоскопы, толщиномеры, плотномеры, детекторы влажности и др.). Радионуклиды используются в детекторах дыма, в электронно-захватных детекторах, являются источниками, используемыми в качестве эталонов в приборах; они применяются в люминесцентных датчиках, светящихся циферблатах, молниеотводах, ионизационных нитях накала, в приборах и инструментах, используемых в геологоразведке и горном деле, в сельском хозяйстве, строительстве, в светящихся (люминесцентных) красках и т. д. Потенциальными источниками образования радиоактивных отходов являются промышленные установки, производящие радиоизотопы и использующие облучательные и радиографические приборы, а также установки, производящие продукцию и изделия, составной частью которых являются радиоактивные материалы, исследовательские установки (например, ускорители частиц) и другие установки, связанные с ядерной промышленностью, фармацевтикой и медициной, а также химические установки для работы с рудами, содержащими значительные уровни природной радиоактивности, но не являющиеся рудами урана или тория. Источниками трития ³Н являются предприятия по производству тритиевых светильников, жидких кристаллов и люминесцентных красителей для часов.

Широкое развитие получило медицинское и биологическое использование радионуклидов, которые применяются для диагноза и лечения болезней (в медицинской радиологии, радиографии, радиотерапии, позитронно-эмиссионной томографии, в исследованиях легочной вентиляции, в денситометрии костных тканей, брахитерапии, телетерапии, для стерилизации хирургических инструментов и др.). Для диагноза особенно широко применяется ^{99m}Tc (период полураспада 6 час.), а для лечения заболеваний – ¹³¹I (период полураспада около 8 дней). В радиотерапии используются также ⁶⁰Co и ¹³⁷Cs, активность которых достаточно высока. Радионуклиды применяются при изготовлении различных радиофармпрепаратов. Одно из главных применений радионуклидов в научных исследованиях – установление стандартов для измерения альфа-, бета- и гамма-эмиссий радионуклидов; они также используются в качестве различных индикаторов в химических, медицинских, биологических, генетических, геологических и гидрологических исследованиях, в аналитической химии и радиоанализе, для радиационной стерилизации, в качестве анатомических маркеров и калибровочных источников, в молекулярной биологии. В табл. 3 приведены данные Научного комитета ООН по действию атомной радиации об уровнях производственного облучения, которые в определенной степени характеризуют основные техногенные источники поступления радионуклидов в среду обитания.

Таким образом, в городах существует значительное количество разнообразных источников поступления природных и техногенных радионуклидов в канализационные системы, что предопределяет вероятность накопления этих поллютантов в осадках сточных вод. Например, в США имеется более 22 тыс. пользователей радиоактивными материалами, деятельность которых регулируется соответствующими лицензиями, и около 9 тыс. пользователей, которые потенциально могут поставлять радионуклиды в канализацию [47, 78, 80] (табл. 4).

Таблица 3. Дозы производственного облучения в мире [18]

1 аолица 3. Дозы производственного оолучения в мире [18]									
Вид деятельности	Кол-во работников	Средняя, мЗв/год	Коллективная, чел.Зв/год						
	Ядерный топливн								
Добыча урана	69000	4,50	310						
Дробление сырья	6000	3,30	20						
Обогащение сырья	13000	0,12	1						
Производство топлива	21000	1,03	22						
Эксплуатация реакторов	530000	1,70	900						
Переработка топлива	45000	1,50	67						
Научные исследования	120000	0,78	90						
Всего	800000	1,75	1410						
M	Іедицинское использова	ние излучения							
Диагностика	950000	0,50	470						
Дентальная практика	265000	0,06	16						
Ядерная медицина	115000	0,79	90						
Радиотерапия	120000	0,55	65						
Другие виды	870000	0,14	120						
Всего	2320000	0,33	760						
Промышленное использование излучения									
Радиография	106000	1,58	170						
Производство радиоизотопов	24000	1,93	47						
Другие виды	570000	0,25	140						
Всего	700000	0,51	360						
Военное использование излучения									
Оружие	380000	0,19	75						
Суда и их обслуживание	40000	0,52	25						
Всего	420000	0,24	100						
Прочие виды использования									
Облучение	310000	0,11	33						
Ветеринария	45000	0,18	8						
Всего	360000	0,29	41						
Повышенное облучение природными источниками (Е – 0,5), мЗв/год									
Угольные шахты	3910000	0,7	2600						
Другие шахты	780000	2,7	2000						
Переработка минерального сырья	300000	1,0	300						
Надземные помещения	1250000	4,8	6000						
Экипажи самолетов	250000	3,0	800						

Таблица 4. Радионуклиды, обращение с которыми в США лицензируется Комиссией по атомному регулиро-

ванию (US NRC) и государственными (штатными) соглашениями

Научная дея-	Медицина,	Промышленност	ъ, размещение, транс-	Исследования	Прочее (обогати-
тельность	фармацевтика	портировка ради	оматериалов, включая	и разработки	тельные фабрики,
		спецпрачечные	и дезактивационные		заводы по обогаще-
		С	лужбы		нию урана и др.)
Углерод-14	Углеро-14	Америций-241	Стронций-89	Углерод-14	Плутоний-238
Кобальт-60	Хром-51	Сурьма-125	Стронций-90	Цезий-134	Плутоний-239
Цезий-137	Кобальт-57	Кобальт-60	Cepa-35	Водород-3	Плутоний-240
Водород-3	Галлий-67	Цезий-134	Уран-233	Йод-125	Радий-226
Йод-125	Индий-111	Цезий-137	Уран-234	Йод-131	Торий-228
Йод-131	Йод-125	Водород-3 Уран-235		Фосфор-32	Торий-232
Железо-59	Йод-131	Йод-125	Уран-238	Cepa-35	Уран-233
Марганец-54	Железо-59	Йод-131	Цирконий-95		Уран-234
Фосфор-32	Фосфор-32	Марганец-54			Уран-235
Фосфор-33	Фосфор-33	Ниобий-95			Уран-238
Cepa-35	Стронций-89	Фосфор-32			
	Стронций-90	Плутоний-238			
	Cepa-35	Плутоний-239			
	Технеций-99м	Плутоний-240			
	Таллий-201	Полоний-210			

Добыча, производство и использование фосфорных удобрений, цветных и редких металлов, редкоземельных элементов, стройматериалов, торфа, природных газов также сопровождаются эмиссией радионуклидов в среду обитания, их поступлением в поверхностный сток и сточные во-

ды [25, 29, 41, 45, 76, 97]. Высокими содержаниями урана и тория отличаются фторсодержащие руды, в которых эти элементы концентрируются во флюорите, криолите, топазе, апатите, слюдах и других минералах [17]. Радионуклиды присутствуют в каменном угле, накапливаются в шлаке и особенно в летучей золе, которая выбрасывается в атмосферу и в той или иной мере оседает на подстилающие поверхности (табл. 5, 6).

Таблица 5. Удельная активность радионуклидов в углях, шлаке и золе, Бк/кг [29]

Изотоп	Уголь	Шлак	Летучая зола
²³⁸ U	9-31	56-185	70-370
^{234}U	19	92	160
²³² Th	9-19	59	81-174
²²⁸ Ra	6-20	18-78	63-130
²²⁸ Th	1-20	56-81	15-130
²²⁶ Ra	7-25	20-166	85-281
²¹⁰ Pb	10-26	21-185	52-1813
²¹⁰ Po	41	13-185	196-466
⁴⁰ K	26-130	230-962	233-740

Таблица 6. Радиоактивность уносов теплоэлектростанций, Бк/кг (Sear et al., 2003, цит. по [42]) *

Страна	Ряд урана		Ряд тория		
	среднее	интервал	среднее	интервал	
Германия	119	93-137	121	95-155	
Великобритания	89	72-105	68	3-94	
Австралия	90	7-160	150	7-290	
Польша	350	-	150	-	
Италия	170	130-210	140	100-190	
Дания	160	120-210	120	66-190	
Швеция	-	150-200	-	150-200	
Бельгия	181	112-316	150	88-277	
Испания	91	80-106	89	77-104	
Чехия	129	35-190	90	62-142	

^{*} Нормой удельной активности считается 200 Бк/кг.

Известны ископаемые угли, обогащенные радионуклидами [32, 42, 43]. По оценке американских специалистов, сжигание углей даже на старых теплоэлектростанциях не приводит к существенному изменению природного радиационного фона или к заметному увеличению дозовых нагрузок отдельных лиц рабочего персонала теплоэлектростанций (Beck, Miller, 1980, цит. по [42]). Тем не менее исследования, выполненные в окрестностях угольных теплоэлектростанций, показывают, что для всех радионуклидов, приведенных в табл. 5, концентрации оказываются примерно в 10 раз выше, чем «природные» уровни этих изотопов [29]. Согласно оценке [31], производство каждого гигаватт-года электроэнергии обходится человечеству в 2 чел.-Зв ожидаемой коллективной эффективной эквивалентной дозы облучения. Сжигание каменного угля и других видов ископаемого топлива является также источником поступления в окружающую среду ¹⁴C [28]. Источником поступления радионуклидов в окружающую среду, в том числе в поверхностный сток, являются не только выбросы летучей золы в атмосферу, но и места складирования золошлаковых и других отходов угольных теплоэлектростанций [38].

Выбросы ¹³⁷Cs в окружающую среду происходят в основном в результате испытаний ядерного оружия и аварий на предприятиях атомной энергетики [4]. Известны случаи загрязнения внешней среды в результате небрежного хранения источников радиоцезия для медицинских и технологический целей. Цезий легко мигрирует во внешней среде. Основным источником ¹³⁷Cs для населения России являются молочные и зерновые продукты (после аварии на ЧАЭС – молочные и мясные), в странах Европы и США ¹³⁷Cs поступает в организм человека в основном с молочными и мясными продуктами и меньше – с зерновыми и овощными. Источниками загрязнения окру-

жающей среды радионуклидами могут являться места захоронения радиоактивных отходов, что не исключает поступления поллютантов в канализационные системы. Например, в воде оз. Онтарио вблизи Порт-Грэнби, где размещены радиоактивных отходы, отмечались повышенные уровни ²²⁶Ra [62].

В некоторых городах источниками поступления радионуклидов на городские станции очистки сточных вод (главным образом в составе поверхностного стока) являются также предприятия ядерного цикла. Как известно, на всех этапах полного ядерного топливного цикла во внешнюю среду поступает определенное количество естественных и искусственных радионуклидов, которые рассеиваются на значительных площадях: 1) при добыче и гидрометаллургической переработке уранового сырья; 2) на заводах по изготовлению твэлов; 3) при работе атомных электростанций; 4) на стадиях радиохимической переработки облученного горючего; 5) на этапе хранения и захоронения отходов. Хотя при работе предприятий ядерного топливного цикла в окружающую среду поступает достаточно значительное число различных естественных и искусственных радионуклидов, но основную радиологическую роль играют радионуклиды ³H, ¹⁴C, ⁸⁵Kr, ¹²⁹I, тяжелые естественные радионуклиды, трансурановые радионуклиды, некоторые радиоактивные продукты деления и наведенные радионуклиды (⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs и др.) [28]. Осадки сточных вод рассматриваются как возможные индикаторы радионуклидов, поступающих в окружающую среду от атомных электростанций [77].

Радиоактивное загрязнение городских очистных сооружений может также формироваться в результате различных процессов очистки стоков, при случайном притоке поверхностных, грунтовых и подземных вод в систему канализации (табл. 7). Источниками поступления радионуклидов в поверхностный сток и сточные воды могут быть различные материалы, содержащие повышенные концентрации природных радионуклидов.

Таблица 7. Источники и пути поступления радионуклидов на городские очистные сооружения [47, 81]

Титьевая вода и ее остатки, содержащие природные радиоактивные вещества. Бытовые сточные воды и стоки медицинских учреждений. Сточные воды предприятий, имеющих лицензию на обращение с радиоактивными веществами. Сточные воды предприятий, перерабатывающих и(или) использующих материалы.	тионици т. пето ники и пути поетупления радис	опуклидов на городские о инстиви	е сооружения [17, 01]	
Питьевая вода и ее остатки, содержащие природные радиоактивные вещества. Бытовые сточные воды и стоки медицинских учреждений. Сточные воды предприятий, имеющих лицензию на обращение с радиоактивными веществами. Сточные воды предприятий, перерабатывающих и(или) использующих материалы.	Поступление на очистные сооружения в со-	Процессы обработки сточных	Приток воды в канализа-	
природные радиоактивные вещества. Бытовые сточные воды и стоки медицинских учреждений. Сточные воды предприятий, имеющих лицензию на обращение с радиоактивными веществами. Сточные воды предприятий, перерабатывающих и(или) использующих материалы,	ставе сточных вод	вод	цию и на сооружения	
содержащие природные радиоактивные вещества. Радиоактивные вещества, не требующие лицензирования. Стировании ОСБ. Процессы перемешивания и аэрирования стоков, высвобождающие радон (газ).	природные радиоактивные вещества. Бытовые сточные воды и стоки медицинских учреждений. Сточные воды предприятий, имеющих лицензию на обращение с радиоактивными веществами. Сточные воды предприятий, перерабатывающих и(или) использующих материалы, содержащие природные радиоактивные вещества. Радиоактивные вещества, не требующие ли-	пользованием материалов и веществ, содержащих радионуклиды (известняк, известь, летучая зола, древесная зола, рассолы). Древесные стружки, опилки или другие набухающие агенты, используемые при компостировании ОСВ. Процессы перемешивания и аэрирования стоков, высво-	ных вод, содержащих радиоактивные вещества, включая радон (газ). Поверхностный (дождевой, талый, поливочномоечный) сток, содержащий радиоактивные вещества (при наличии комбинированной кана-	

Особенности распределения радионуклидов в ОСВ

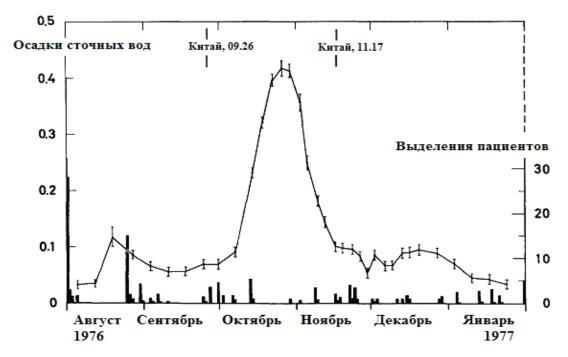
Своеобразие условий и процессов, свойственных станциям очистки городских сточных вод, способствует определенному концентрированию в ОСВ различных природных радионуклидов. Например, в работе [117] приводятся результаты изучения распределения в ОСВ космогенного ⁷Ве, активность которого составила 40 Бк/кг выше фона. Авторы цитируемой работы не исключают накопление этого радионуклида в компонентах окружающей среды при использовании ОСВ в сельском хозяйстве. В ОСВ в определенной степени накапливаются уран и торий. Так, среднее содержание общего урана в ОСВ г. Саранска составляет 4,2 мг/кг (при интервале от 3,3 до 5,1 мг/кг) [44], что заметно превышает кларк земной коры (=2,5 мг/кг, по А.П. Виноградову, 1962) и

среднее содержание урана в почвах России (=1,5 мг/кг, по Л.И. Болтневой и др., 1980). Среднее содержание тория в ОСВ г. Саранска достигает 3.9 мг/кг (при интервале от 3 до 5 мг/кг), что не превышает его кларк (=10 мг/кг) и фоновый уровень в почвах (=6,5 мг/кг). Как известно, природный уран состоит из трех радиоактивных изотопов – 238 U (его количество 99,2739%), 235 U (0,7024%) и 234 U (0,0057%) [35]. Изотопы 238 U и 235 U образуют ряды распада, начинающиеся с этих изотопов и заканчивающиеся устойчивыми нерадиоактивными изотопами ²⁰⁶Pb и ²⁰⁷Pb [37]. В биосфере уран находится в шестивалентном U (VI) и четырехвалентном U (IV) состояниях. Если уран (VI) отличается достаточно высокой подвижностью, то уран (IV) малоподвижен и плохо растворим [14, 53]. Изучение особенностей распределения U^{6+} в ОСВ из некоторых районов Курской области показало, что осадки являются активными сорбентами урана (Жукова, Носова, 2000). В ходе исследования были получены кривые зависимости осаждения уранил-ионов UO_2^{2+} от pH раствора, сравнение которых позволяет выбрать наиболее оптимальные условия захвата урана макроструктурой ОСВ. Известно, что сорбция является ключевым процессом в циклах урана и других радионуклидов, в результате которого отмечается их значительное накопление в отложениях, обогащенных органическим веществом и глинистой фракцией [14, 16, 38]. Например, финские исследователи установили интенсивное накопление урана в торфе (район Юлийоки), где он концентрируется в виде органометаллических комплексов [124]. Уран также накапливается и в более восстановительных условиях (под торфяными образованиями), где он адсорбируется на минеральных зернах в ледниковых отложений, глинистыми минералами и гидроксидами железа в сапролите. Очевидно, что в ходе очистки сточных вод содержащийся в них уран сорбируется твердой фазой, что обусловливает его накопление в ОСВ (отличающихся высокими содержаниями органических веществ и глинистых частиц). В лабораторных условиях исследовалась возможность восстановления U (VI) до U (IV) с использованием катионов Fe²⁺, зафиксированных на поверхности магнетита, гетита или гематита [53]. Установлено, что при исходной концентрации U (VI) 0,1 ммоль при рН 6,8 в присутствии 10 ммоль NaHCO₃ эффективность восстановления шестивалентного урана до четырехвалентного составляла более 95%. Не исключено, что подобное восстановление может происходить и в ОСВ, содержащих указанные минералы. В активных илах станций очистки сточных вод, расположенных в городах, сбрасываемых стоки в оз. Онтарио, обнаружены ⁷Be, ⁹⁵Zn, ⁹⁵Nb. ¹⁴¹Ce. ¹⁴⁴Ce. ²²⁸Ra. ²²⁸Th и другие радионуклилы [64].

Особое внимание уделяется изучению распределения в ОСВ радионуклидов, применяемых в медицине, которые являются в основном короткоживущими и поступают в канализацию с выделениями пациентов, моечными водами, отходами больниц и госпиталей. Например, в медицинских учреждениях США ежегодно выполняется около 750 тыс. диагностических тироидных сканирований (при этом на каждую процедуру используется от 0,01 до 0,1 мКи ¹³¹I) [95]. Кроме того, в стране ежегодно осуществляют 50 тыс. онкологических операций щитовидной железы и 10 тыс. обработок щитовидной железы (в ходе которых пациентами вводят радиойод). В последние годы во многих странах мира прослеживается тенденция увеличения применения для медицинских (диагностических и терапевтических) целей различных радионуклидов, особенно ^{99m}Tc [123]; в терапии нейроэндокринных опухолей начинает использоваться ¹⁷⁷Lu [58, 123]. Исследования, выполненные в США, Финляндии, Франции, Японии и других странах, свидетельствуют о том, что медицинские радионуклиды (⁶⁷Ga, ¹¹¹In, ¹²³I, ¹³¹I, ^{99m}Tc, ²⁰¹Tl и др.) довольно часто обнаруживаются в ОСВ в относительно повышенных концентрациях [46, 59, 92, 98, 107, 108, 119-121].

Шведскими специалистами было изучено распределение радионуклидов в ОСВ, образующихся на одной из станций очистки в г. Мальмё, где радионуклиды применяются в госпитале и почти все пациенты этого учреждения проживают в его окрестностях [69]. Образцы сброженного ила отбирались с июля 1976 г. по конец января 1977 г. один раз в неделю (с середины октября до середины декабря — два раза в неделю). Поставка радионуклидов в стоки осуществляется с отходами госпиталя и выделениями пациентов. В госпитале для радиотерапии применяли ¹³¹I, ³²P, ⁹⁰Y,

 198 Аи, для диагностики — 131 I, 85 Sr, 99 Tc, 133 Xe, 201 Tl. Йод-131 (используемый в наибольшем количестве) присутствовал во всех образцах осадков сточных вод, где его удельная активность изменялась от 0.03 ± 0.01 до 0.12 ± 0.02 нКи/кг. Отношение между содержанием (поступлением) йода-131 в ОСВ и его поставкой со сточными водами в систему очистки определено как (2.6 ± 0.6) х 10^{-3} , что эквивалентно отношению (2 ± 1) х 10^{-2} для стабильного йода. Иногда наблюдалась активность золота-198 и таллия-201. Например, удельная активность 198 Au в августе 1976 г. составила (0.069 ± 0.005) нКи/кг, в сентябре — (0.03 ± 0.004) нКи/кг; в январе 1977 г. в одном образце ОСВ удельная активность 201 Tl достигала 0.19 нКи/кг. Поскольку уровни радионуклидов в осадках сточных вод в целом низкие, то авторы приходят к выводу, что эти поллютанты не создают какихлибо серьезных проблем для отдельных людей. Примерно 26 октября в очистном иле был отмечен пик активности йода-131 (0.42 ± 0.01) нКи/кг), который, как полагают авторы, связан с ядерными испытаниями, проведенными 26 сентября 1976 г. в атмосфере в западной части Китая (рис. 1).



Puc. 1. Активность 131 I в ОСВ (левая ордината, нКи/кг) и ежедневная реализация 131 I пациентами (правая ордината, мКи) в течение августа 1976 г. – января 1977 г. [69].

Судя по всему, осадки городских сточных вод достаточно надежно отражают воздействие отдаленных источников радиоактивного загрязнения окружающей среды (например, ядерных испытаний или техногенных аварий). Так, после аварии на Чернобыльской АЭС (т. е. после 30 апреля 1986 г.) в г. Ульм (Германия) в осадках сточных вод, отобранных на муниципальных очистных сооружениях, и в золе сжигаемых осадков были отмечены повышенные уровни целого ряда радионуклидов [90]. Спустя несколько месяцев радиоактивность осадков сточных вод и их золы значительно снизилась (табл. 8). Повышенные уровни цезия-137, выпавшего на подстилающие поверхности в результате рассеяния аварийных выбросов Чернобыльской АЭС, наблюдались в дренажных и канализационных системах шведских городов Лунд и Евле [71]. Аналогичные исследования были выполнены в Австрии, где пробы осадков сточных вод отбирались на очистных сооружениях различных городов страны с июля по сентябрь 1986 г. [122] (табл. 9). Наивысшие концентрации ¹⁰³Ru, ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs обнаружены в июльских образцах ОСВ из городов Нижней Австрии (Шайбс, Цветль) и Штирии (Айзенэрц, Леобен). Согласно установленному правительством Австрии нормативу, удельная радиоактивность осадков сточных вод, применяемых в сельском хозяй-

стве в качестве агромелиорантов, не должна превышать 10 нКи/кг. Образцы осадков сточных вод, отобранные в июле 1986 г., характеризовались превышением указанного норматива. Накопление чернобыльских радионуклидов установлено также в осадках сточных вод некоторых городов Финляндии [109].

Таблица 8. Удельная активность радионуклидов в ОСВ и их золе, Бк/кг [90]

Радиоизотоп	изотоп Очистной шлам, Очистн		Зола шлама,	Зола шлама,
	20 мая 1986	2 сентября 1986	20 мая 1986	2 сентября 1986
¹⁴⁰ Ba	1720	12	8748	< 70
¹⁴¹ Ce	220	4	1507	33
¹⁴⁴ Ce	440	20	3459	171
¹³⁴ Cs	1480	913	10098	4856
¹³⁶ Cs	200	< 8	1083	24
¹³⁷ Cs	2840	2146	19285	11020
^{131}I	800	-	335	-
^{132}I	960	-	1118	-
¹⁴⁰ La	880	-	6179	-
⁹⁹ Mo	280	-	1874	-
⁹⁵ Nb	100	24	638	133
¹⁰³ Ru	2800	240	29921	1459
¹³² Te	480	-	2110	-
⁹⁵ Zr	< 80	8	<260	46
Сумма	13200	3370	86355	17742

Таблица 9. Удельная активность радионуклидов в ОСВ городов Австрия, 1986 г., нКи/кг сухой массы [122]

Паолица 9. Удельная активн Место отбора проб	Дата	103 Ru	134Cs	137Cs
Вена	Июль	7,5	4,6	9,5
Bella	Август	1,3	2,9	4,8
	Сентябрь	0,8	2,8	6,1
Нижняя Австрия,	Июль	5,3	3,9	6,8
Брукк	Август	2,0	4,3	7,0
	Сентябрь	2,4	4,2	9,1
Нижняя Австрия,	Июль	4,6	6,5	11,7
Кремс, Россац	Август	2,7	4,7	9,9
_	Сентябрь	0,5	1,5	3,0
Нижняя Австрия,	Июль	15,2	16,7	32,8
Цветль	Август	2,4	8,8	18,4
	Сентябрь	0,1	2,5	3,7
Нижняя Австрия,	Июль	63,0	41,6	83,3
Шайбс	Август	14,5	13,8	26,8
	Сентябрь	8,5	15,7	27,7
Штирия,	Июль	3,2	2,7	3,0
Айзенэрц, Леобен	Август	8,7	21,3	40,4
	Сентябрь	0,7	5,0	9,0
Каринтия,	Июль	15,4	10,8	23,2
Санкт-Файт	Август	1,7	6,6	15,7
	Сентябрь	0,1	0,3	0,3
Зальцбург, Заальфельден		17,4	15,0	27,3

В Белоруссии на очистных сооружениях различных поселений, расположенных на территориях с плотностью радиоактивного загрязнения более 185 кБк/м² (последствия катастрофы на Чернобыльской АЭС), образуется свыше 30 тыс. м³ в год ОСВ, уровень загрязнения которых ¹³⁷Сѕ достигает 27-60 кБк/кг [10-12]. На полях фильтрации и в биологических прудах загрязненный радионуклидами активный ил изолирован слоем воды, активность которой не превышает фоновых значений. С точки зрения внешнего облучения эти участки в период эксплуатации не представляют опасности, однако иловые площадки могут быть опасны для обслуживающего персонала, т. е. должны находиться под постоянным контролем служб радиационной безопасности. Доля подвиж-

ных форм ¹³⁷Cs в ОСВ составляет 20-45%, что примерно на порядок выше, чем в почве, что может привести к вторичному загрязнению окружающей среды. Так, исследования, выполненные процессов в местах накопления ОСВ (иловые площадки, поля фильтрации, биопруды) показывают, что ¹³⁷Cs может достичь уровня грунтовых вод в концентрациях, превышающих допустимые уровни для питьевой воды. По оценкам, это может произойти на полях фильтрации с песчаным основанием через 14 лет, в биопрудах с толщиной защитного слоя грунтов в 6 м через 30 лет, а на иловых площадках с естественным основанием через 8 лет. В настоящее время хранение загрязненных радионуклидами ОСВ организуется в местах их образования с применением защитных барьеров на основе природного сырья и отходов производства, обладающих сорбционнокаталитическими свойствами (трепел, фосфогипс и др.). Специалистами МЖКХ Белоруссии совместно с учеными НАН для загрязненных регионов страны разработаны технологии очистки сточных вод и обработки ОСВ, исключающие вторичное загрязнение окружающей среды, однако из-за отсутствия средств их внедрение осуществляется медленно. Как известно, на Украине, в Белоруссии и Центральном экономическом районе РФ выпало более половины от общего количества радионуклидов, осевших на территории СНГ после аварии на Чернобыльской АЭС [4, 15]. В Российской Федерации наибольшему радиоактивному загрязнению подвергались Брянская, Калужская, Орловская, Тульская, Ленинградская, Рязанская, Смоленская, Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая, Тамбовская и некоторые другие области [22]. Судя по всему, ОСВ, образующиеся на очистных сооружениях городов этих регионов, будут отличаться повышенной радиоактивностью, что требует проведения специализированных исследований.

В работе [68] изучена связь между содержанием радионуклидов в ОСВ и в атмосферном воздухе (в атмосферной пыли). Авторы исходили из того, что в местах расположения ядерных реакторов небольшие количества радионуклидов постоянно эмитируют в воду и воздух, затем осаждаются на подстилающие поверхности и в составе поверхностного стока поступают на городские станции очистки сточных вод. Опробование ОСВ (биоосадка, т. е. ила после биологической очистки, и обезвоженного ила) выполнено на очистных сооружениях Боргеби, расположенных в 5,8 км восточнее АЭС Барсебек (западное побережье южной Швеции) и принимающих на очистку сточные воды и поверхностный сток с городской территории. В ОСВ установлено присутствие нескольких изотопов (табл. 10).

Таблица 10. Радионуклиды в биоосадке [68]

1981 г.		Активность радионуклидов, Бк/кг сухой массы							Атмосферные		
	¹⁴¹ Ce	¹⁴¹ Ce ¹⁰³ Ru ⁹⁵ Zr ⁷ Be ⁷⁵ Se ⁶⁵ Zn ⁶⁰ Co ⁵⁸ Co ⁵⁴ Mn		осадки, мм							
16 марта-2 ап-	9,9	18,1	53	61	4,0	< 1	0,6	< 0,6	0,9	15,5 (26-27 апре-	
реля										ля)	
2-9 апреля	6,5	12,4	41	50	4,2	2,4	56	20	5,2	0,9 (8-19 апреля)	
9-16 апреля	4,7	8,0	29	35	5,6	< 1	21	< 0,6	3,5	0,00	
16-23 апреля	5,85	8,6	31	36	4,3	< 1	18	< 0,6	2,9	5,9	
23-29 апреля*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,0 (29 апреля)	
29 апреля-4 мая	5,3	5,4	25	30	4,6	< 1	12	< 0,6	1,6	6,1	

^{*} Измерения отсутствуют.

Удельная активность ⁷⁵Se была практически постоянной и не зависела от атмосферных выпадений, что, как считают авторы [68], закономерно, поскольку данный изотоп используется в медицине и поступает в канализацию с выделениями пациентов и стоками больниц. Вариации удельной активности радионуклидов ¹⁴¹Ce, ¹⁰³Ru, ⁹⁵Zr имеют сходство, а их отношения с ⁷Be (космогенный нуклид) почти постоянны и близки к таковым в образцах воздуха из окрестностей очистных сооружений. Это свидетельствует о том, что эти нуклиды мигрируют в составе региональных потоков от удаленных источников и при выпадении из атмосферы относительно равномерно распределяются на большой площади, поступая затем в канализационную сеть с поверхностным

стоком. Установлено также, что вариации ⁶⁰Co, ⁵⁴Mn, ⁶⁵Zn и ⁵⁸Co существенно отличаются от вариаций глобально распределяемых радионуклидов, т. е. эти нуклиды, как предполагают авторы, происходят из местного источника эмиссии. В табл. 11 приведены концентрации нуклидов в биоосадке и обезвоженном осадке очистных сооружениях Боргеби, из которых следует, что в биоосадке концентрация глобальных поллютантов ¹⁴⁴Ce, ¹⁶⁶Ru, ¹⁰³Ru, ⁹⁵Zr, ⁷Be почти такая же, как в обезвоженном осадке, т. е. они активно захватываются осадочным материалом уже в начале процессов очистки стоков. Для ⁶⁰Co удельная активность в биоосадке примерно в 2,3 раза выше, чем в обезвоженном осадке. Таким образом, биоосадок является более надежным индикатором для оценки локальной реализации радионуклидов, чем обезвоженный осадок сточных вод.

Таблица 11. Удельная активность радионуклидов в сухом биоосадке и обезвоженном осадке, Бк/кг [68]

Нук-	Биоосадок,	Обезвоженный	Биоосадок, 10	Обезвоженный оса-	Среднее отношение
лид	25 марта-4	осадок, 1 апреля-	августа-24 сен-	док, 15 августа-25	биоосадок / обезво-
	мая	9 мая	тября	сентября	женный осадок
¹⁴⁴ Ce	15	10	=	=	1,5
¹⁴¹ Ce	6,5	4,3	-	-	1,5
¹⁰⁶ Ru	7,7	6,8	-	-	1,1
103 Ru	11	10	-	-	1,1
95 Zr	36	28	13	9,6	1,3
⁶⁰ Co	22	8,5	18	9,1	2,3
54 Mn	2,8	1,5	1,4	1,4	1,4
⁷ Be	42	37	60	55	1,1
$^{131}I*$	183	91	1750	1350	1,7
⁷⁵ Se*	4,6	4,0	-	-	1,2

^{*} Используются в медицинской практике.

В г. Лунде (Швеция) изучено распределение радионуклидов в дождевых осадках, выпадающих на городскую территорию, в сточных водах, поступающих на очистные сооружения города, в очищенных сточных водах и в сброженном иле [67]. Основными источниками поступления радионуклидов на очистные сооружения являются поверхностный (талый и дождевой) сток, который поступает (с площади в 6,2 км²) на очистку, и бытовые сточные воды (включая стоки крупного госпиталя). Среднее время пребывания сточной воды на очистных сооружениях, где применяются механические, биологические и химические методы очистки, составляет 1-2 дня, ОСВ – 3-4 недели. Объем поступающих стоков достигает 30±10 тыс. м³/сут.; количество образующегося осадка – 8 м³/сут. ОСВ накапливаются в контейнерах и затем используются в сельском хозяйстве. Исследованиями установлена корреляция между объемами поступающих на очистные сооружения сточных вод и активностью космогенного нуклида ⁷Ве, что закономерно, поскольку объем стоков зависит от интенсивности дождей (определяющих объем поверхностного стока, поступившего на очистные сооружения). Как правило, наиболее сильные дожди сопровождаются более интенсивным осаждением указанного радионуклида. Для ⁵¹Cr в период исследований отмечался медленный рост удельной активности, что в заметной степени обусловило увеличение общей активности сточных вод (табл. 12). Удельная активность ¹³¹І в течение 12-14 июля возросла почти в 30 раз, что было вызвано соответствующими процедурами, при которых используется этот радионуклид, в госпитале (около 4000 МБк на каждого пациента). Было установлено, что для 7 Be, 51 Cr, 134 Cs, 137 Cs до 37-56% уровня начальной активности (характерной для необработанных сточных вод) «остается» в ОСВ, для 106 Ru и 131 I – 6-14% (табл. 13-15). Последние два радионуклида (первый поступает в канализационную сеть со смывами, второй – в основном с мочой пациентов госпиталя) более растворимы и находятся в системе очистных сооружений преимущественно в водной фазе, причем характерные для них отношения «осадок / вода + осадок» сильно варьировали в период наблюдений. Установлено также, что концентрации ¹⁰⁶Ru и ¹³⁴Cs незакономерно изменялись в системе очистных сооружений г. Лунда. В свое время эти радионуклиды поступили в атмосферу при аварии

на Чернобыльской АЭС и сейчас обнаруживаются в почвах, растениях, на асфальте, зданиях и других конструкциях, из которых медленно выделяются. Полученные авторами данные указывают на то, что степень очистки сточных вод практически от всех радиоизотопов относительно невелика [67].

Таблица 12. Удельная активность и рассчитанная общая активность радионуклидов [67]

Июль-август 1984 г.	Объем сто-	Активно	сть ⁷ Ве	Активность ⁵¹ Сr		Активность ¹³¹ I	
	ков, м ³ /сут.	удельная,	общая,	удель-	общая,	удельная,	общая,
		Бк/л	МБк	ная, Бк/л	МБк	Бк/л *	МБк
июль, 8+9	41510	0,02	0,83	0,053	2,20	0,27	11,2
июль, 10+11	44800	< 0,01	< 0,50	0,059	2,64	0,48	21,5
июль, 12-14	63440	0,07	4,44	0,041	2,60	12,2	774
июль, 15+16	42270	0,02	0,85	0,035	1,48	4,38	185
июль, 17+18	45090	< 0,01	< 0,50	0,091	4,83	1,46	77,5
июль, 9-21	63960	0,046	2,94	0,043	2,75	0,69	44,1
июль, 22+23	66330	0,026	1,73	0,0227	1,79	0,32	21,2
июль, 24+25	48910	0,014	0,69	0,029	1,42	0,61	29,8
июль, 26-28	70300	0,067	4,71	0,045	3,16	0,23	16,2
июль, 29+30	56580	0,032	1,81	0,119	6,73	0,34	19,2
июль, 31+август, 1	46870	0,019	0,89	0,112	5,25	0,57	26,2
август, 2-4	75550	0,031	2,34	0,025	1,89	0,10	7,2
август, 5-6	53250	0,041	2,18	0,1066	5,64	0,72	38,3
август, 7+8	46450	0,010	0,47	0,136	6,32	0,87	40,4
август, 9-11	78400	0,032	2,51	0,107	9,39	0,20	15,7

^{*} С учетом радиоактивного распада за 1 день.

Таблица 13. Активность радионуклидов в сбрасываемых сточных водах и ОСВ [67]

1985 г.	Сточные воды, МБк			Осад	ок, МЕ	к *	Отношение «осадок / вода + осадок»		
	⁷ Be	⁵¹ Cr	^{131}I	⁷ Be	⁵¹ Cr	^{131}I	⁷ Be	⁵¹ Cr	¹³¹ I
июль, 8-14	5,72	7,44	796						
июль, 15-21	5,24	9,06	307						
июль, 22-28	7,13	6,37	67,2	2,86	4,05	7,64	0,33	0,35	0,010
июль, 29-август, 4	5,04	13,9	52,6	4,13	6,12	11,3	0,44	0,40	0,036
август, 5-11	5,16	20,4	94,4	4,04	8,01	6,91	0,36	0,56	0,093
август, 12-18				12,9	35,4	10,3	0,72	0,72	0,164
август, 19-25				6,54	16,0	2,62	0,56	0,44	0,027
Среднее							0,48	0,49	0,066
Общее	29,3	57,2	1317				0,52	0,55	0,029

^{*} С учетом радиоактивного распада.

Таблица 14. Активность радионуклидов в сбрасываемых сточных водах и ОСВ [67]

1987-1988 гг.		C	точные	воды, М					Осадо	ок, МБк	*	
	⁷ Be	⁵¹ Cr	^{131}I	¹⁰⁶ Ru	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	⁷ Be	⁵¹ Cr	^{131}I	¹⁰⁶ Ru	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
октябрь, 23-30	4,23	31,1	1853	4,2	0,91	1,58						
ноябрь, 30-6	4,52	12,1	378	-	0,55	2,88						
ноябрь, 6-13	8,37	30,3	133	1,88	1,06	2,94	8,79	23,4	256	0,54	0,58	1,86
ноябрь, 13-20	7,42	41,7	288	-	1,54	2,45	8,36	21,2	109	0,47	0,63	2,07
ноябрь, 20-27	11,3	48,8	932	-	1,33	1,16	8,61	18,5	48,8	0,16	0,85	2,89
ноябрь, 27 – де-	<4,0	30,2	159	10,8	0,97	2,03	6,30	11,5	27,3	0,51	0,77	2,30
кабрь, 4												
декабрь, 4-11	<4,0	17,4	509	18,1	1,53	3,01	11,9	26,1	36,7	0,64	0,87	3,05
декабрь, 11-18	<4,0	22,8	4952	8,2	2,21	5,36	10,2	29,0	53,1	0,39	0,82	2,78
декабрь, 18-25							9,75	25,0	77,5	0,63	0,76	2,63
декабрь, 25 -							9,28	21,0	102	0,88	0,70	2,49
январь, 1												
Среднее												
Общее	35,8	234	8194	43,1	10,1	21,4	73,2	176	710	2,60	5,98	20,1

^{*} С учетом радиоактивного распада.

Таблица 15. Соотношение между активностью ОСВ и активностью «выходящие стоки + осадок» [67]

1987-1988 гг.	Отношение «осадок / осадок + вода»						
	⁷ Be	⁵¹ Cr	^{131}I	¹⁰⁶ Ru	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	
октябрь, 23-30							
ноябрь, 30-6							
ноябрь, 6-13	0,68	0,43	0,12	0,114	0,39	0,54	
ноябрь, 13-20	0,65	0,64	0,22	-	0,53	0,42	
ноябрь, 20-27	0,51	0,38	0,27	0,082	0,45	0,50	
ноябрь, 27 – декабрь, 4	0,46	0,22	0,087	-	0,33	0,48	
декабрь, 4-11	0,51	0,35	0,028	-	0,35	0,40	
декабрь, 11-18	<0,7	0,49	0,25	0,035	0,46	0,58	
декабрь, 18-25	<0,7	0,59	0,13	0,034	0,33	0,47	
декабрь, 25 – январь, 1	<0,7	0,48	0,020	0,097	0,24	0,32	
Среднее	0,56	0,45	0,14	0,07	0,39	0,50	
Общее	0,55	0,43	0,08	0,06	0,37	0,48	

Авторами цитируемой работы [67] в период с 8 июля по 11 августа 1985 г. измерялась также удельная активность космогенного ⁷Ве в атмосферных осадках. Общее осаждение указанного радионуклида на территорию г. Лунда за эти 5 недель составило 728 МБк, однако на очистные сооружения поступило только 58,8 МБк (8,1%) (табл. 16), что объясняется различными факторами, в том числе, особенностями сбора, транспортировки и поступления вод поверхностного стока на городские очистные сооружения. Так, известно, что с поверхностным стоком даже с непроницаемых территорий выносится обычно лишь 34-83% общего количества дождевых осадков [65]. Наблюдаемый дефицит объясняется способностью различных поверхностей задерживать дождевые осадки, их потерями при просачивании через стыки, при разбрызгивании транспортными средствами, в результате прямой инфильтрации через поверхность. Кроме того, некоторые кровельные материалы обладают относительно высокой задерживающей способностью по отношению к радионуклидам [29].

Таблица 16. Активность дождевых осадков и поступление ⁷Ве на очистные сооружения в 1985 г. [67]

Tuomina To. Tikin	Tuosingu 10. Tikimbiootib goxgobbix oougkob ii nootijisieniie Be nu o metrible oopjykeniisi b 1705 1. [07]							
1985 г.	Дождь,	Поступление	е на очистные соор	ружения, МБк	Отношение			
	МБк	Вода	Осадок *	Общее	«дождь / общее»			
июль, 8-14	2,6	5,72	2,86	8,58	0,30			
июль, 15-21	117	5,24	4,13	9,37	12,5			
июль, 22-28	141	7,13	4,04	11,17	12,6			
август, 29-4	262	5,04	12,9	17,94	14,6			
август, 5-11	205	5,16	6,54	11,70	17,5			
Общее	728			58,8	12,4			

^{*} За две последние недели после дождя с учетом радиоактивного распада.

Достаточно пристальное внимание изучению радионуклидов в осадках городских сточных вод уделяется в США. Определенный интерес к данной проблеме проявляют Комиссия по атомному регулированию (US NRC), Агентство по ООС (US EPA) и другие организации, а также Конгресс США. Так, в середине 1980-х гг. NRC US обязывает определять радионуклиды в канализационных системах, если они концентрируются в осадках сточных вод [78]. В 1986 г. US EPA издает обзор «Radioactivity of Municipal Sludge», в котором особенно детально рассматриваются четыре наиболее широко встречаемых в ОСВ радионуклида: йод-131, радий-226, америций-241, цезий-137. В 1991 г. NRC и EPA организуют ISCORS (Interagency Steering Committee on Radiation Standards – Межведомственный координирующий комитет по стандартам радиации), в состав которого вошли также представители других министерств и ведомств США. В структуре ISCORS существует специальный подкомитет по ОСВ (Sewage Sludge Subcommottee) [78, 84]. В 1994 г.US GAO, как отмечалось выше, публикует доклад, в котором сообщается о присутствии существенных количеств радиоактивных веществ в ОСВ девяти очистных сооружений (табл. 17). В докладе также

рассмотрены сценарии возможного воздействия радионуклидов, содержащихся в осадках сточных вод, на профессиональных рабочих (станций очистки, фермеров и т. д.) и основное населения, ставиться вопрос о необходимости контроля осадках сточных вод содержания радионуклидов [51, 78, 95, 103]. Несколько штатов страны идентифицировали ситуации, когда радий, содержащийся в питьевых водах, в конечном счете накапливался в осадках сточных вод. Все это позволило поставить вопрос о том, что ОСВ и зола, образующаяся при их сжигании, могут представлять определенную опасность для рабочих и населения с точки зрения возможного радиационного воздействия. К настоящему времени в стране разработаны федеральные и штатные нормативные акты, которые регулируют обращение с ОСВ и золой, содержащих радионуклиды, включая отбор проб, их анализ и пр. [84]. Известны относительно многочисленные исследования, посвященные изучению распределения радионуклидов в канализационных системах, в осадках сточных вод и их золе.

Таблица 17. Станции очистки сточных вод в США, на которых установлено радиоактивное загрязнение [103]

Место	Год	Радионуклиды	Примечание
Тонавандра, шт.	1983	²⁴¹ Am	Стоимость работ по ремедиации канализации и станции
Нью-Йорк			очистки составила 2,5 млн. долл. Стоимость рекульти-
			вации свалки оценивается в 7 млн. долл.
Гранд-Айленд,	1984	²⁴¹ Am, ³ H, ²¹⁰ Po	Очистка не требуется
шт. Нью-Йорк			
Ок-Ридж, шт.	1984	⁶⁰ Co, ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs,	Очистка не требуется
Теннесси		54 Mn	
Ройерсфорд, шт.	1985	⁵⁴ Mn, ⁵⁸ Co, ⁶⁰ Co,	Очистка не требуется
Пенсильвания		⁸⁹ Sr, ⁶⁵ Zn и др.	
Эрвин, шт. Тен-	1986	²⁴¹ Am, ²³⁹ Pu, ²³² Th,	Один из метантенков нуждается в очистке; стоимость
несси		U	работ – 250 тыс. долл.
Вашингтон, ок-	1986	¹⁴ C, ³ H, ³² P, ³³ P,	Очистка не требуется
руг Колумбия		²² Na, ³⁵ S и др.	
Портленд, шт.	1989	²³² Th	Стоимость ремедиации системы канализации и создания
Орегон			предварительной очистки составляет ~ 2 млн. долл.
Анн-Арбор, шт.	1991	⁶⁰ Co, ⁵⁴ Mn, ^{108m} Ag,	Очистка не требуется
Мичиган		Ag, Zn	
Кливленд, шт.	1991	⁶⁰ Co	Стоимость очистки территории составляет ~ 900 тыс.
Огайо			долл., изоляции от доступа населения ~ 120 тыс. долл.,
			обезвреживания загрязненного материала ~ 3 млрд.
			долл.

Так, изучение радиоактивности ОСВ, образующихся на 24 станциях очистки сточных вод общин центрального Нью-Йорка, показало, что гамма-излучение осадков (для его регистрации использовался сцинтилляционный гамма-спектрометр Паккарда, результаты измерений даются для образца массой 1 г в количествах импульсов в минуту выше фона, сртиг образца) составило в среднем 3,28 сртиг при интервале значений от 0,15 до 9,7 сртиг [100]. В другой работе этих же авторов [101] изучен состав ОСВ, образующихся на 32 станциях очистки стоков 25 городов США (гг. Балтимор, Бостон, Даллас, Денвер, Детройт, Хьюстон, Лос-Анджелес, Мемфис, Милуоки, Портленд, Сол-Лейк-Сити, Сан-Диего, Сан-Франциско, Сиэтл, Сиракузы, Толедо, Филадельфия, Феникс и др.). Гамма-излучение осадков сточных вод, образующихся на очистных сооружениях указанных городов, в среднем составила 4,09 сртиг при интервале значений от 0,9 до 7,2 сртиг. Гамма-активность осадков сточных вод, образующихся на очистных сооружениях 15 малых городов штата Нью-Йорк, принимающих в основном бытовые сточные воды, в среднем составляла 118,6 сртиг при размахе от 1 до 326 сртиг [99]. Радиоактивность жидких осадков сточных вод, образующихся на станции очистки стоков, принимающей сточные воды госпиталя, расположенного в г. Оук-Ридж, в среднем составляла 39 Бк/л, достигая максимальных значений в 157 Бк/л [92].

В ноябре 1991 г. Департамент здравоохранения (шт. Вашингтон, США) исследовал распределение радионуклидов в пробах осадков сточных вод, образующихся на очистных сооружениях г.

Сиэтла [51]. Определялись природные радионуклиды (⁷Be, ⁴⁰K), радионуклиды, используемые в медицине (¹³¹I, ²⁰¹Tl), а также ¹³⁷Cs (глобальные выпадения). Был сделан вывод о том, что какоголибо риска для здоровья рабочих очистных сооружений и основного населения эти радионуклиды не представляют. В 1994 г. исследования были продолжены, но уже на шести станциях очистки сточных вод, пять из которых обслуживают населенные центры (Бремертон, Сиэтл, Рентон, Ричленд, Такома), а шестая станция (Винатчи) принимает канализационный сток крупной медицинской клиники, обслуживающей население значительного сельскохозяйственного района (табл. 18). В ОСВ обследованных очистных сооружений были обнаружены 16 радионуклидов (табл. 19, 20).

Таблица 18. Характеристика очистных сооружений [51]

Показатель	Рентон	Бремертон	Сиэтл	Винатчи	Такома	Ричленд
Сточные воды, тыс. м ³ /день	189,3	18,9	378,5	12,1	90,8	23,5
Выход ОСВ, т/день	35	113,6 м ³ *	25	1,5	11	0,67
Влага, %	80	98	80	80	74	82
Размещение ОСВ	Агро	Леса	Агро	Агро	Компост	Свалка
Метод	Компост		Компост		Пастбище	

^{*} ОСВ размещаются в жидком виде.

Таблица 19. Радионуклиды в ОСВ, пКи/г \pm 2 σ (на сухую массу) [51]

Радионуклид	Рентон	Бремертон	Сиэтл	Винатчи	Такома	Ричленд
Бета-активность	$5,50 \pm 1,50$	$8,50 \pm 1,660$	$8,80 \pm 1,70$	$9,40 \pm 1,70$	$7,20 \pm 1,60$	$46,0 \pm 3,80$
Be-7	$1,10 \pm 0,30$	$4,70 \pm 0,40$	$3,50\pm0,30$	$6,10 \pm 0,50$	$1,20 \pm 0,30$	нпо
Co-57	0.05 ± 0.02	нпо	нпо	нпо	нпо	$0,04 \pm 0,02$
Co-58	нпо *	нпо	нпо	нпо	нпо	0.17 ± 0.09
Co-60	нпо	0.05 ± 0.01	нпо	нпо	нпо	$24,2 \pm 0,30$
Cs-137	0.04 ± 0.02	0.07 ± 0.02	$0,10 \pm 0,02$	0.05 ± 0.033	0.04 ± 0.022	$0,69 \pm 0,08$
I-131	$2,90 \pm 0,20$	$3,30 \pm 0,30$	$1,70 \pm 0,110$	$32,8 \pm 2,20$	$0,69 \pm 0,099$	$3,00 \pm 0,40$
K-40	$2,60 \pm 0,40$	$5,70 \pm 00,40$	$2,80 \pm 0,30$	$4,00 \pm 0,50$	$2,80 \pm 0,40$	$2,30 \pm 0,60$
Mn-54	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	$0,40 \pm 0,10$
Sr-89	0.78 ± 0.21	нпо	нпо	нпо	0.87 ± 0.144	нпо
Sr-90	0.08 ± 0.022	0.03 ± 0.01	0.08 ± 0.01	$0,055 \pm 0,01$	0.52 ± 0.11	нпо
Tc-99m	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	$44,0 \pm 4,0$
T1-201	нпо	$15,2 \pm 1,00$	нпо	нпо	нпо	нпо
Уран общий	-	-	-	-	-	$57,3 \pm 0,990$
U-234	-	-	-	-	-	$42,7 \pm 0,80$
U-235	-	-	-	-	-	$2,3 \pm 0,10$
U-238	-	-	-	-		$12,3 \pm 0,40$
Zn-65	-	-	-	-	-	$3,90 \pm 0,30$

^{*} Ниже предела обнаружения.

На основе полученных результатов была выполнена оценка различных сценариев использования ОСВ, которая показала, что радиоактивное воздействие на рабочих очистных сооружений в основном незначительно, хотя в отдельных случаях необходимо проведения дозиметрического контроля. Оценка возможного применения осадков сточных вод в сельском хозяйстве и при их размещении (захоронении) на свалках осуществлялась с помощью компьютерной программы RESRAD. При оценке возможного воздействия не учитывались изотопы с периодом полураспада менее 180 дней (⁷Be, ¹³¹I, ²⁰¹Tl, ⁵⁸Co, ⁸⁹Sr), а также природный ⁴⁰К. Установлено, что при использовании в сельском хозяйстве ОСВ, образующихся в г. Ричленде, максимальная доза облучения составляет 2 мР/год, в остальных пунктах – 0,002-0,006 мР/год, что значительно ниже местного среднегодового фона радиационной дозы (630 мР/год). При размещении осадков сточных вод на свалках максимальные дозы составляют 0,004-0,01 мР/год (непосредственно после размещения), 0,002-0,005 – после 30 лет, при размещении ОСВ г. Ричленда – 12 и 0,5 мР/год соответственно. Средний годовой фоновый уровень для шт. Вашингтон варьируется в пределах 200-700 мР.

Таблица 20. Радионуклиды в ОСВ [51]

Таолица 20. Радионукли		ı	I		
Изотоп	Период по-	Максималь-	Кол-во об-	Возможное происхож-	Тип распада
	лураспада	ный уро-	разцов выше	дение	
		вень, пКи/г	предела об-		
		сухой массы	наружения		
Общая β-активность	-	46	6	Природный	
Be-7	53,3 дня	6,1	5	Природный	γ
Co-57	270 дней	0,05	2	Медицина	γ
Co-58	70,9 день	0,17	1	Медицина	γ
Co-60	5,2 года	24,22	2	Промышленность	β, γ
Cs-137	30,2 года	0,69	6	Глобальные выпадения,	β, γ
				промышленность	
I-131	8 дней	32,8	6	Медицина	β, γ
K-40	1,28 x 10 ⁹ лет	5,7	6	Природный	
Mn-54	312 дней	0,4	6	Промышленность	β, γ
Sr-89	50,5 дня	0,87	1	Медицина	β
Sr-90	29 лет	0,52	2	Глобальные выпадения	β
Tc-99	213000 лет	44	6	Медицина, промышлен-	β
				ность	
Tl-201	3 дня	15,2	1	Медицина	γ
Уран общий	_	15,2 57,2	1	Природный, промыш-	,
				ленный	
U-234	2,4 x 10 ⁵ лет	42,7	1	Природный, промыш-	α, γ
				ленный	·
U-235	7,0 x 10 ⁸ лет	2,3	1	Природный, промыш-	α
				ленный	
U-238	4,5 x 10 ⁹ лет	12,3	1	Природный, промыш-	α, спонтан-
				ленный	ное деление
Zn-65	243,9 дней	3,9	1	Промышленный Е-захва	
					протонная

В 1996 г. на 7 станциях очистки сточных вод Большого Чикаго (США, шт. Иллинойс), где все организации и предприятия (медицинские центры и госпитали, заводы, исследовательские институты, образовательные учреждения и др.) в обязательном порядке получают лицензию на сброс радионуклидов в канализацию, было проведено исследование радиоактивности необработанных сточных вод, очищенных сточных вод, возвратного активного ила, анаэробно сброженного ила и биоосадка [87]. Пробы сырого осадка отбирались еженедельно, пробы очищенных сточных вод и биоосадка (из 8 иловых карт) — ежемесячно. Во всех пробах измерялись общая альфарадиоактивность и общая бета-радиоактивность, а в биоосадке, кроме того, гамма-активность. Результаты исследования приведены в табл. 21-23, из которых следует, что радиоактивность очищенных стоков ниже, нежели необработанных сточных вод, т. е. процессы очистки извлекают из сточных вод часть радионуклидов, которые связываются с осадками сточных вод и в определенной мере выводятся из дальнейшего миграционного потока. Кроме того, 8 проб биоосадка исследовались на содержание 24 специфических радионуклидов, из которых только три были определенны в значимых количествах — природные радионуклиды ⁴⁰К и ²²⁶Ra, а также ¹³⁷Cs (табл. 24).

Таблица 21. Средние значения общей альфа-радиоактивности [87]

тиолица 21. Средине эна тения общен извори радноихтивности [67]							
Станция	Неочищенные	Очищенные стоки,	Эффективность удаления	Осадок, пКи/г			
	стоки, пКи/л	пКи/л	радиоактивности (КПД), %	сухой массы			
Stickney	< 3,8	< 3,1	_ *	5,3			
Calumet	< 3,7	< 3,5	-	5,9			
North Side	< 3,3	< 3,1	-	3,5			
John E. Egan	< 3,6	< 3,2	-	5,6			
Hanover Park	< 3,4	< 3,1	-	4,7			
James C. Kirie	< 3,7	< 3,4	-	5,0			
Lemont	12,2	< 5,1	-	45,3			

^{*} Не рассчитано, т. к. ниже предела обнаружения.

Таблица 22. Средние значения общей бета-радиоактивности [87]

Станция	Неочищенные	Очищенные стоки,	Эффективность удаления	Осадок, пКи/г
	стоки, пКи/л	пКи/л	радиоактивности (КПД), % *	сухой массы
Stickney	12,0	6,0	50,0	22,8
Calumet	9,5	6,8	28,4	21,9
North Side	8,4	5,8	30,9	15,0
John E. Egan	10,8	7,00	35,2	20,4
Hanover Park	9,6	6,4	33,3	13,2
James C. Kirie	11,4	7,8	31,6	16,8
Lemont	26,3	12,2	53,6	50,3

^{* (}неочищенные стоки – очищенные стоки) х 100 / сырой осадок.

Таблица 23. Общая альфа-радиоактивность и общая бета-радиоактивность биоосадка, 1996 г. [87]

Иловые пло-	Кол-во	альфа	альфа, пКи/г сухой массы			бета, пКи/г сухой массы		
щадки	проб	Среднее	Минимум	Максимум	Среднее	Минимум	Максимум	
LASMA	6	7,1	5,8	9,8	23,00	21,5	25,3	
Calumet	5	6,7	6,4	7,5	22,7	20,66	27,3	
HASMA	5	5,7	5,3	6,4	23,8	21,3	29,4	
Marathon	1	6,6	6,6	6,6	27,5	27,5	27,5	
122 nd Stony	8	6,1	5,2	7,1	22,5	18,9	26,9	
Vulcan	7	5,1	3,9	6,3	22,4	20,3	25,9	
Ridgeland	1	5,6	5,6	5,6	24,2	24,2	24,2	

Таблица 24. Концентрации радионуклидов в биоосадке, 1996 г., пКи/г сухой массы [87]

Tuominga 21: Rondon pagnon yangga 8 onoocagae, 19901., intent cykon macca [07]								
Иловые площадки	Калий-40	Радий-226	Цезий-137					
Calumet East	7,4	4,5	0,2					
Calumet West	7,0	4,5	0,3					
Ridgeland	10,4	4,0	0,3					
Stony Island	8,6	3,66	0,6					
HASMA	9,6	4,1	0,4					
LASMA	9,0	4,3	0,4					
Marathon	9,7	3,99	0,4					
Vulcan	9,9	3,6	0,4					

Сточные воды госпиталя Мичиганского университета, содержащие радионуклиды, поступают на станцию очистки г. Анн-Арбор [95]. Образующиеся ОСВ сжигаются на специальной установке. Мичиганский университет имеет три источника поставки радионуклидов в канализацию: 1) выделения пациентов медицинского центра, 2) жидкости из танка исследовательского реактора, 3) радионуклиды, используемые в медицинском центре и лабораториях университета. Незначительное количество радионуклидов может поступать от госпиталя ветеранов и других организаций. В госпитале Мичиганского университета постоянно осуществляются различные операции и процедуры, в ходе которых в терапевтических целях используется ¹³¹I, большая часть которого в конечном счете поступает с экскрециями пациентов в канализацию. В медицинском центре ежегодно выполняются от 80 до 100 ампутаций щитовидной железы, для каждой из которых используется около 10 мКи ¹³¹I, от 40 до 60 пациентам проводят терапевтические обработки ¹³¹I в дозах от 150 до 350 мКи (или от 5,6 до 13 $\Gamma Бк), а также выполняется около <math>10000$ медицинских процедур, в которых используется около 1000 Ки 99mTc, большая часть которого выносится с экскрециями пациентов. Установлено, что лишь около 1,1% радиойода, вводимого пациентам, связывается с первичным илом. Судьба остальной части йода не установлена. Возможно, что определенное его количество обращается с вторичными и третичными продуктами, образующимися в ходе очистки сточных вод (а также, очевидно, выносится с очищенными сточными водами). Доза радиации от сжигания ОСВ оценивается в 0,048 мР. Расчеты показали, что эффективная эквивалентная доза для наиболее типичной экспозиции рабочих, обслуживающих фильтрующие системы и инсинераторы, составляет 0,066 мР (в течение 22-недельного периода сжигания ОСВ), что составляет менее 1% природного фона. Для населения эффективная эквивалентная доза оценивается в 0,003 мР для того же периода. Это воздействие на рабочих и население составляет очень небольшую долю от типичной среднегодовой дозы (около 100 мР, исключая радон, или 300 мР с учетом радона), формирующейся благодаря естественному радиационному фону. Авторы цитируемой работы приходят к выводу, что крупные медицинские центры являются источниками поступления радиоактивных веществ в муниципальные сточные системы. В свою очередь, сжигание осадков сточных вод в инсинераторах продуцирует золу и атмосферные выбросы, которые содержат радиоактивные вещества, в том или ином количестве поступающие в окружающую среду.

В 1998-2000 гг. ISCORS, US NRC и US EPA провели оценку распределения радионуклидов на 313 муниципальных (коммунальных) станциях очистки сточных вод, расположенных в разных районах США (Аляска – 2 станции, Аппалачи – 91, Атлантическая равнина – 58, Гавайи – 4. Внутренние возвышенности – 4. Внутренние равнины – 106, Межгорные плато – 18. Лаврентийская возвышенность – 2, Тихоокеанская горная система – 24, Скалистые горы – 4) [47, 78-81]. (Всего в США функционируют > 16 тыс. коммунальных станций очистки сточных вод) Многие (86%) из обследованных станций применяют вторичную очистку стоков; примерно 40% используют передовую технику очистки. Большинство из обследованных очистных сооружений характеризуются малой или средней мощностью (по объему перерабатываемых сточных вод). Так, примерно половина из них принимает на очистку порядка 10 млн. галлонов сточных вод в день или меньше (~ 28 тыс. м³). Только 14 станций из 313 указали, что они обрабатывают более 100 млн. галлонов стоков в день (более 278 тыс. м³). Около 90% станций сообщили, что производственные стоки составляют менее 50% общего объема перерабатываемых сточных вод. Примерно 30% очистных сооружений имеют комбинированную систему сбора сточных вод, т. е. принимают на очистку и поверхностный сток с урбанизированных территорий. После проведения опроса и необходимого опробования на широкий круг радионуклидов было исследовано 311 проб ОСВ и 35 проб золы (табл. 25).

Таблица 25. Радионуклиды, учитывающиеся ISCORS при проведении оценки дозы воздействия [81]

Нуклид	Тип распада	Период полураспада	Нуклид	Тип распада	Период полураспада
Ac-227	α, β, γ	22 года	Po-210	α	138 дней
Ac-228	β, γ	6 час	Pu-238	α	88 лет
Am-241	α, γ	432 года	Pu-239	α	24000 лет
Be-7	γ	53 дня	Ra-223	α, γ	11 дней
Bi-212	α, β, γ	61 мин	Ra-224	α, γ	4 дня
Bi-214	β, γ	20 мин	Ra-226	α, γ	1600 лет
C-14	β	5730 лет	Ra-228	β	6 лет
Ce-141	β, γ	33 дня	Rn-219	α, γ	4 сек
Co-57	γ	271 день	Sm-153	β, γ	47 час
C0-60	β, γ	5 лет	Sr-89	β	51 день
Cr-51	γ	28 дней	Sr-90	β	29 лет
Cs-134	β, γ	2 года	Th-227	α, γ	19 дней
Cs-137	β, γ	30 лет	Th-228	α, γ	2 года
Eu-154	β, γ	9 лет	Th-229	α, γ	7340 лет
Fe-59	β, γ	45 дней	Th-230	α	77000 лет
H-3	β	12 лет	Th-232	α	14 x 10 ⁹ лет
I-125	γ	60 дней	Th-234	β, γ	24 дня
I-131	β, γ	8 дней	T1-201	γ	3 дня
In-111	γ	3 дня	T1-202	γ	12 дней
K-40	β, γ	1,3 x10 ⁹ лет	T1-208	β, γ	3 мин
La-138	β, γ	135 х 109 лет	U-233	α	158500 лет
Np-237	α, γ	2,14 x 10 ⁶ лет	U-234	α	245000 лет
Pa-231	α, γ	32800 лет	U-235	α, γ	700 x 10 ⁶ лет
Pa-234m	β, γ	1 мин	U-238	α	4,5 x 10 ⁹ лет
Pb-210	β, γ	22 года	Xe-131m	γ	12 дней
Pb-212	β, γ	11 час	Zn-65	β, γ	244 дня
Pb-214	β, γ	27 мин			

Результаты исследований позволили подготовить три специальных документа: 1) «Результаты радиологической оценки и их анализ», который содержит результаты оценки распределения радионуклидов в осадках сточных вод и золе, образующейся при их сжигании, которые позволили установить источники поступления радиоактивных веществ на очистные сооружения и сформулировать критерии оценки уровней радиоактивности ИСВ и их золы [79]; 2) «Моделирование оценки радиационных доз», являющийся руководством по моделированию дозы, основанном на учете всех возможных для рабочих очистных сооружений и населения путей экспозиции [80]; 3) «Рекомендации по управлению радиоактивными веществам в ОСВ и их золе на муниципальных очистных сооружениях», содержащий рекомендации по управлению радиоактивностью ОСВ и образующейся при их сжигании золы [81]. В итоговых документах отмечается, что радиоактивные материала всегда присутствуют в окружающей природной среде или продуцируются в результате человеческой деятельности. Особо подчеркивается, что отсутствует федеральный акт, который ограничивал бы уровни радионуклидов в ОСВ и золе, образующейся после из сжигания, хотя соответствующие службы (Комиссия по атомному регулированию, Департамент энергетики и др.) утверждают, что регулируют сброс радиоактивных материалов в канализационные системы городов. Тем не менее некоторые радионуклиды (например, ¹³¹I, ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ⁸⁹Sr, ²⁰¹Tl) могут концентрироваться в ОСВ, образующихся на городских (муниципальных) очистных сооружениях, а также накапливаться в золе при сжигании осадков сточных вод на специальных установках (инсинераторах).

В табл. 26 представлены результаты исследования распределения в ОСВ и золе, образующейся после их сжигания, 45 радионуклидов. Шесть радионуклидов были определены только единожды — ¹⁴¹Ce, ¹³⁴Cs, ¹⁵⁴Eu, ⁵⁹Fe, ¹³⁸La, ¹⁵³Sm. Восемь радионуклидов были установлены более чем в 200 образцах (⁷Be, ²¹⁴Bi, ¹³¹I, ⁴⁰K, ²¹²Pb, ²¹⁴Pb, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra). Наиболее высокие концентрации наблюдались для ¹³¹I, ⁸⁹Sr, ²⁰¹Tl (медицинские радионуклиды с коротким периодом полураспада). Многие исследованные образцы ОСВ и их золы содержали радий и уран. Образцы из мест, где для питьевых целей используются подземные воды, отличались повышенными уровнями ²³⁸Ra, ²²⁸Th, ²¹⁴Pb, ²¹⁶Ra. Образцы из мест, где для водоснабжения используются поверхностные водоисточники, содержали повышенные концентрации ¹³⁷Cs, ⁷Be, ²³²Th. В тех поселениях, где применяется комбинированная система канализации, уровни многих радионуклидов были выше, чем на станциях очистки с раздельной системой сбора стоков.

Сравнение концентраций радионуклидов в осадках сточных вод и золе, образующейся при сжигании этих отходов, с уровнями содержания в других природных компонентах и материалах показывает, что некоторые нуклиды достаточно интенсивно накапливаются в ОСВ и особенно в их золе (табл. 27).

Результаты оценки радиоактивности осадков сточных вод, выполненной в 1998-2000 гг. ISCORS, NRC и EPA CIIIA, позволили рассмотреть 7 возможных сценариев размещения этих отходов и их золы, пути распространения радионуклидов в среде обитания и их возможное влияние на рабочих и основное население [47, 80] (табл. 28-31, рис. 2). Показано, что наиболее опасны ОСВ и зола, обогащенные радоном. В основном же уровни радиоактивных веществ в осадках сточных вод и в их золе преимущественно низкие, а связанная с этим радиационная доза (нагрузка) на рабочих и основное население невелика и практически во всех случаях не представляет серьезной опасности. Расчет доз радиации, потенциально воздействующих на отдельного человека, обычно ниже значений установленных норм. Лишь в некоторых случаях рабочие очистных сооружений, а также жители районов размещения ОСВ и(или) их золы могут испытывать повышенные дозы радиации, обусловленные этими отходами. Как правило, рассчитанные дозы редко достигали значений в 100 мР/год.

Таблица 26. Радионуклиды в ОСВ и их золе, пКи/г сухой массы (1 пКи = 0,037 Бк) [47, 79]

Таблица 26. Радионуклиды в ОСВ и их золе, пКи/г сухой массы (1 пКи = 0,037 Бк) [47, 79]									
Радионуклид	Мини		Меди		Максимум				
	OCB	Зола	OCB	Зола	OCB	Зола			
Альфа-радиоактивность	- *	5	7	27	137	178			
Бета-радиоактивность	1,7	15	13	43	93	140			
Am-241	-	-	-	-	2,5	0,21			
Be-7	-	-	1,2	4,3	22	30			
Bi-212	-	-	_	1,2	13	15,7			
Bi-214	-	-	0,3	2,4	16	16			
C-14 **	-	-	_	_	3	1			
Ce-141	_	_	-	-	0,016	-			
Co-57	_	_	-	-	0,26	0,17			
Co-60	-	_	-	-	5,1	3,46			
Cr-51	_	_	_	_	3,5	35			
Cs-134	-	_	-	-	0,04	-			
Cs-137	_	_	_	0,07	3,6	0,37			
Eu-154	_	_	_	-	21	-			
Fe-59	_	_	_	_	0,4	-			
H-3 **	_	_	0,3	_	8	8			
I-125	_	_	-	_	40	1			
I-131	_	_	1,8	0,22	840	81			
In-111	_	_	-	-	3,6	-			
K-40	_	7,4	4	14,22	26	22,4			
La-138	_	-	-	- 1,22	0,07	-			
Pa-234m	_	_	_	3	27	77			
Pb-210	_	_	_	-	13	12,3			
Pb-212	_	0,36	0,44	1,5	15	15			
Pb-214	_	0,61	0,31	2,9	17	16,4			
Pu-238	_	-	0,01	0,015	0,19	0,1			
Pu-239	_	_	0,003	0,01	0,12	0,17			
Ra-223	_	_	-	-	0,09	0,8			
Ra-224	_	_	_	_	12	4,9			
Ra-226	_	_	2	3	47	22			
Ra-228	_	0,65	0,82	2,5	38	30			
Rn-219	_	-	-	-	-	0,4			
Sm-153	_	_	_	_	27	-			
Sr-89	_	_	0,335	1	70	300			
Sr-90	_	_	0,1	0,2	9,4	6			
Th-227	_	_	-	-	0,5	1,1			
Th-228	0,07	_	0,695	1,6	9	14			
Th-230	0,09	_	0,34	0,75	1,7	2,6			
Th-232	0,022	_	0,2	0,505	1,6	1,7			
Th-234	-	_	0,6	3,6	23	80			
Tl-201	_	_	-	0,62	241	105			
Tl-202	_	_	_	-	1,16	1,53			
Tl-208	_	_	0,07	0,66	4,8	13,5			
U—234	0,18	1,2	1,95	5,55	44	91			
U-235			- 1,75	0,15	3,1	3,4			
U-238	0,18	0,8	1,44	3,3	26	74			
Zn-65	-	-	-	-	0,06	0,06			
Z11-0J	_	-	-	_	0,00	0,00			

^{*} Не определено или ниже чувствительности. ** В пКи/г сырой массы.

Таблица 27. Радионуклиды в ОСВ, их золе, почвах*, удобрениях* и стройматериалах*, пКи/г сухой массы [47, 79]

Радионуклид	Почва	Фосфатные удобрения	Стройматериалы	OCB	Зола
Bi-212	0,1-3,5	0,1-4,6	0,1-3,7	0-13	0-16
Bi-214	0,1-3,8	4,0-140	2,5-5,0	0-16	0-16
Cs-137	0,1-0,2	Нет данных	Нет данных	0-3,66	0-0,37
K-40	2,7-19	32-160	0,8-30	0-26	7,4-22
Pa-234m**	0,1-3,8	4,00-140	0,2-5,0	0-27	0-77
Pb-212**	0,1-3,5	0,1-4,6	0,1-3,7	0-15	0,36-15
Pb-214**	0,1-3,8	4,0-140	0,2-5,0	0-17	0,61-16
Ra-223**	<0,1-0,2	0,2-6,6	0,1-0,2	0-0,09	0,1-0,8
Ra-224**	0,1-3,5	0,1-4,6	0,1-3,7	0-12	0-4,9
Ra-226**	0,1-3,88	0,1-24	0,1-3,5	0-47	0-22
Ra-228**	0,1-3,5	0,1-4,6	0,1-3,7	0-38	0,65-30
Th-227**	<0,1-0,2	0,2-6,6	0,1-0,2	0-0,5	0-1,1
Th-228**	0,1-3,5	0,1-4,66	0,1-3,7	0,07-9	0-14
Th-230**	0,1-3,8	4,0-140	0,2-5,0	0,09-1,7	0-2,6
Th-2328	0,1-3,5	0,1-4,6	0,1-3,7	0,022-1,6	0-1,7
Th-234**	0,1-3,8	4,0-140	0,2-5,0	0-23	0-80
T1-208**	0,1-3,5	0,1-4,6	0,1-3,7	0-4,8	0-14
U-234**	0,1-3,8	4,0-140	0,2-5,0	0,18-44	1,2-91
U-235**	<0,1-0,22	0,2-6,6	0,1-0,2	0-3,1	0-3,4
U-238**	0,1-3,8	4,0-140	0,2-5,0	0,18-26	0,8-74

^{*} Приведены типичные фоновые значения для США. ** Природный радионуклид.

Таблица 28. Типичные сценарии воздействия ОСВ на рабочих и население [80]

No	Сценарий воздействия							
	Воздействие на месте							
1	Жители домов, построенных на сельскохозяйственных землях, где размещались ОСВ							
2	Посетители парков, где ОСВ применялись для мелиорации земель							
	Воздействие соседних мест							
3	Жители городов, в окрестностях которых имеются территории с размещенными ОСВ							
4	Жители поселений, в окрестностях которых на свалках размещены ОСВ или зола							
5	Жители поселений, в окрестностях которых расположены инсинераторы							
	Профессиональное воздействие							
6	Сельскохозяйственные рабочие, размещающие ОСВ на полях							
7	Рабочие очистных сооружений							

Таблица 29. Расчетная максимальная доза с учетом и без учета вклада радона, мР/год [80]

№ сценария (см. табл.	Подсценарий	95% of	бразцов	Преобладающий	
28)		С радоном	Без радона	радионуклид (пути)	
1 – местные резиденты	1 год применения ОСВ	3	1	Ra-226 (комнатный)	
	5	14	4,9		
	20	55	16		
	50*	130	37		
	100*	260	69		
2 – рекреационное использование	Не типичный	0,22	-	Ra-226 (внешний)	
3 – вблизи города	1 год применения ОСВ	3,2 x 10 ⁻³	-	Ra-226 (вне поме-	
-	5	0,014	-	щений)	
	20	0,045	-		
	50 *	0,094	-		
	100 *	0,17	-		
4 – свалка	ТБО ** – ОСВ	0,027	0,01	Ra-226 (комнатный)	
	ТБО ** – Зола	0,041	0,014		
	Гидрозолоотвал	1,2	0,36		
5 – инсинератор	Не типичный	7,7	-	Разные (разные)	
6 – рабочие, разме-	1 год применения	0,15	-	Ra-226 (внешний)	
щающие ОСВ	5	0,77	-		
	20	3	-		
	50*	7,4	-		
	100*	15	-		
7 – рабочие очистных	Опробование (мР/образец)	4,9 x 10 ⁻⁷	-	Ra-226 (внешний)	
сооружений	Транспорт, мР/час	1,9 x 10 ⁻⁴	5,6 x 10 ⁻⁵	Th-228 (комнатный, внешний)	
	Погрузка	17-70	13	Ra-226, Th-228	

^{*} В стране имеется несколько мест, где ОСВ применялись ежегодно более чем 20 лет.

Таблица 30. Сценарии и пути распространения радионуклидов [47]

Пути р	распространения	1	2	3	4	5	6	7
Внешняя ра,	диация	X	X	X	X	X	X	X
Ингаляция	Пыль	X	X	X	X	X	X	X
	Радон помещений	X						X
	Радон внешний	X	X	X	X	X	X	
Глотание	Подземные воды	X	X		X			
	Растения	X		X	X	X		
	Мясо и молоко	X	X	X	X	X		
	Рыба	X	X	X	X			
	Почва	X	X	X	X	X		

^{1 –} размещение в местах проживания, 2 – в рекреациях, 3 – вблизи городов, 4 – около свалок, 5 – около инсинераторов, 6 – рабочие, использующие ОСВ в сельском хозяйстве, 7 – рабочие станций очистки стоков.

^{**} Твердые (муниципальные) отходы.

Таблица 31. Гипотетические максимальные дозы радиации, связанные с операциями на станциях очистки

стоков и при использовании (размещении) ОСВ [80]

стоков и при использовани	и (размещении) ось [оо]		
Индивидуум	Источник экспозиции	Путь первичной экспозиции	Максимальная
			доза, мР/год
Оператор очистных	Осадок в перерабаты-	Внешний	360
сооружений	вающем оборудовании		
Оператор инсинератора	Зола инсинератора	Вдыхание (ингаляция) золы	340
Оператор тяжелого	Осадок или зола в ма-	Внешний	210
оборудования	шинах		
Фермер, сельскохозяй-	Место размещения	Внешний, использование в пищу	17
ственный рабочий	осадка	местных агропродуктов	
Оператор тяжелого	Зола, размещаемая на	Внешний	64
оборудования на свалке	свалке		
Постоянный житель на	Зола, оставшаяся на	Ингаляция при ресуспензии пыли,	170
месте бывшей свалки	месте бывшей свалке	поглощение при использовании в	
		пищу овощей	



Рис. 2. Потенциальные пути воздействия радионуклидов, содержащихся в сточных водах и ОСВ, на человека [80, с дополнениями].

В США лимит альфа-радиоактивности сточных вод (включая радий-226, но исключая радон и уран), установленный US EPA, составляет 15 пКи/л, бета-радиоактивности – 50 пКи/л [87]. В Австралии в качестве профессионального лимита эффективной дозы рекомендовано 20 мЗв (среднее за 5 последовательных лет), эффективной дозы за 1 год – 50 мЗв; лимит среднегодовой эффективной дозы для населения – 1 мЗв [72]. Средневзвешенная по продолжительности жизни предельная годовая доза для человека из всех контролируемых источников, рекомендованной Международной комиссией по радиологической защите, составляет 1 мЗв (100 мР), предельная дополнительная доза за один год – 5 мЗв [111]. Согласно «Основным нормам безопасности», разработанным совместно МАГАТЭ и другими международными организациями, профессиональное облучение любого работника контролируется так, чтобы не превышались следующие пределы: 1) эффективная доза 20 мЗв в год, усредненная за пять последовательных лет; 2) эффективная доза 50 мЗв в любой отдельный год; 3) эквивалентная доза на хрусталик глаза 150 мЗв в год; 4) эквивалентная доза на конечности (кисти рук и стопы ног) или на кожу 500 мЗв в год [20, 30]. Дозовые пределы для представителей населения составляют: 1) эффективная доза – 1 мЗв в год; в особых условиях до 5 мЗв в отдельный год при условии, что средняя доза за пять следующих друг за другом лет не превысит 1 м3в в год; 2) эквивалент дозы на хрусталик глаза – 15 м3в в год; 3) эквивалент дозы на кожу -50 м3в в год, усредненной по 1 см² участка кожи, подвергшегося наибольшему облучению [31]. В России установлены две категории облучаемых лиц: 1) персонал, 2) все население, включая лиц из персонала, вне сферы и условий их производственной деятельности (табл. 32).

Таблица 32. Основные дозовые пределы, Российская Федерация [23]

Нормируемые величины	Дозовые пределы			
	Лица из персонала (группа А)*	Лица из населения		
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые	1 мЗв в год в среднем за любые		
	последовательные 5 лет, но не	последовательные 5 лет, но не		
	более 50 мЗв в год	более 5 мЗв в год		

^{*} Дозы облучения персонала группы \bar{B} не должны превышать $\frac{1}{4}$ значений для персонала группы \bar{A} . (Группа \bar{A} – лица, работающие с техногенными источниками, группа \bar{B} – лица, находящиеся по условиям работы в сфере воздействия техногенных источников.)

В работе английских исследователей [74] особое внимание уделяется выявлению степени разделения радионуклидов между твердой и жидкой фазами, происходящего в ходе очистки сточных вод. Отмечается, что период нахождения ОСВ на очистных сооружения составляет от 1,5 до 48 суток, большая часть которого приходится на период стабилизации осадка. Согласно существующим требованиям, перед использованием ОСВ на пастбищах или на кормовых культурах требуется выдержка осадка (например, на иловых площадках) в течение трех недель, перед использованием на посадках фруктов и овощей – 10 месяцев. Концентрации радионуклидов в ОСВ г. Бектона были следующими (Бк/кг): ${}^{14}\text{C} - 100$, ${}^{3}\text{H} - 140$, ${}^{35}\text{S} - 50$, ${}^{32}\text{P} - 155$, ${}^{51}\text{Cr} - 10$, ${}^{125}\text{I} - 0.33$, ${}^{131}\text{I} - 0.33$ 420. Авторы, обобщив литературные сведения, пришли к выводу, что при очистке сточных вод в ОСВ переходят следующее относительное (от поступившего на станции очистки) количество радионуклидов: ${}^{3}\text{H} - 15\%$, ${}^{14}\text{C} - 15\%$, ${}^{125}\text{I}$ и ${}^{131}\text{I} - 20\%$, ${}^{22}\text{Na} - 10\%$, ${}^{35}\text{S} - 10\%$, ${}^{36}\text{Cl} - 10\%$, ${}^{54}\text{Mn} - 50\%$, 51 Cr -90%, 59 Fe -90%, 57 Co μ 58 Co -80%, 75 Se -50%, 84 Rb -10%, 89 Sr -10%, 103 Ru -10%, 210 Pb -90%. По данным [62, 107], в ходе очистки сточных вод на очистных сооружениях с ОСВ связывается порядка 22-23% йода-125 и йода-131. Согласно более поздним исследованиям, в ОСВ переходит 3-5% йода-125 и йода-131 [50] или даже 2% йода-125 и йода-131 [59], а по данным [95], как отмечалось выше, лишь около 1% йода-131. По [49], в ОСВ поступает 10% ¹²⁵I и ¹³¹I, 7-13% ²²Na, 77-84% ³²Р и ³³Р, 80% ⁵⁷Со и ⁵⁸Со. Эксперименты с цезием-134, кобальтом-57 и стронцией-85, выполненные [89], показывают, что процессы, происходящие в активном иле, не способны удалять радионуклиды из жидких органических отходов.

Таким образом, приводимые выше данные свидетельствуют о том, что степень очистки сточных вод от радионуклидов в большинстве случаев невелика. Считается, что радионуклиды могут перераспределяться среди вторичных и третичных продуктов, образующихся при очистке сточных вод. Не исключено также, что определенная часть их в составе сбрасываемых сточных вод поступает в реки и водоемы.

Техногенные радионуклиды в водных системах

Техногенные радионуклиды установлены в сточных водах, сбрасываемых в прибрежную часть Ирландского моря [113], в илах прибрежной зоны оз. Онтарио, куда поступают очищенные сточные воды Гамильтона, Торонто, Барлингтона и Аякса [64]. В донных отложениях Желтого моря присутствуют ¹³⁷Сѕ и ^{239,240}Ри, причем заметная часть последнего поступает со стоком р. Янцзы [102]. Техногенные радионуклиды обнаружены в различных компонентах р. Колумбии (в том числе, в значительных количествах в донных отложениях), источниками которых являются не только глобальные выпадения, но и предприятия атомной промышленности, расположенные в г. Ханфорде (пригород Ричленда, шт. Вашингтон, США) [48, 55, 66, 114]. В 1970-х гг. в водах р.

Рейн уровни трития, в значительной мере поступающего из техногенных источников, составляли $18\text{-}25~\text{кБк/м}^3$ (природный фон этого радионуклида в поверхностных водах находится в пределах $0.2\text{-}0.9~\text{кБк/м}^3$) [28]. Радионуклиды, поступающие в водные системы, достаточно активно концентрируются водорослями [116].

В 1987 г. и в 1991 г. в донных отложениях р. Москвы, р. Яузы и устьевых зон некоторых впадающих в них малых московских рек обнаружены чернобыльские ¹³⁷Сѕ и ¹³⁴Сѕ [9]. На участках рек Москвы и Яузы до входа в город донные отложения в 1987 г. содержали небольшое количество ¹³⁷Сѕ чернобыльского происхождения (10-20 Бк/кг). Удельная активность донных отложений водотоков в пределах г. Москвы изменялась от 8 до 80 Бк/кг (на сухую массу пробы). Наибольшие значения удельной активности отложений отмечены в пределах г. Москвы в местах интенсивного заиления речных русел, а также на выходе р. Москвы из города (табл. 33) и в устьевой зоне р. Яузы (табл. 34). Установленные уровни содержания искусственных радионуклидов примерно на порядок ниже концентраций природных нуклидов — ⁴⁰К (от 214 до 650 Бк/кг) и дочерних продуктов распада U и Th (в 1987 г. и 1991 г. удельная активность донных отложений по радионуклидам техногенного происхождения составляла не более 10% от природной, определяемой в основном ⁴⁰К). Рост содержания техногенных и природных радионуклидов в донных отложениях рек в пределах города явно обусловлен их дополнительной поставкой техногенными источниками загрязнения.

Таблица 33. Удельнная активность донных отложений р. Москвы в 1987 г., Бк/кг [9]

					r. a	
Участок	¹³⁷ Cs	¹³⁴ Cs	⁴⁰ K	²²⁸ Th	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra
До входа в город	12,4	<1,7	230	9,4	7,5	7,5
Мост МКАД	23,0	8,9	650	40,0	34,3	28,9
Серебряный Бор	52,2	18,3	543	35,2	30,3	35,8
Карамышевская плотина	77,0	18,8	442	26,0	25,2	27,2
Устье р. Таракановки	33,0	10,8	468	20,0	23,8	20,0
Устье р. Нищенки	28,7	16,7	320	22,7	39,4	22,7

Таблица 34. Удельнная активность донных отложений р. Яузы в 1987 г., Бк/кг [9]

Участок	¹³⁷ Cs	¹³⁴ Cs	⁴⁰ K	²²⁸ Th	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra
До входа в город	<1,2	< 1,7	442	21,2	16,5	24,0
Устье р. Чермянки	19,7	7,8	520	28,6	29,4	30,6
8,9 км ниже	42,6	19,8	613	41,1	42,1	38,3
7,9 км ниже	45,2	23,5	595	39,5	42,6	37,6
6,8 км от устья Яузы	43,7	16,6	495	31,4	39,6	30,4
5,8 км от устья Яузы	41,2	17,0	467	36,0	43,7	30,9
3.3 км от устья Яузы	17,3	<4,8	490	29,5	45,2	30,0
2,5 км от устья Яузы	47,0	25,0	448	27,0	30,0	30,0

Малые реки, протекающие в пределах г. Люблина (Польша), принимают бытовые и сточные воды, а также поверхностный сток с городской территории, что приводит к определенному накоплению в донных отложениях ²²⁶Ra, ²³⁴Th, ²²⁴Ra, ²²⁸Ac, ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, а также изотопов плутония [88]. Присутствие изотопов плутония в почвах и речных отложениях Люблинского района обусловлено их глобальными выпадениями (ядерные испытания в 1945-1980-х гг., авария на ЧАЭС). Авторы цитируемой статьи отмечают, что наличие изотопов плутония в речных отложениях является результатом прямого выпадения из атмосферы и их последующего поступления со сточными водами, сбрасываемыми в водотоки. Средние концентрации ^{239,240}Pu в отложениях составляли 0,050±0,034 Бк/кг сухой массы, ²³⁸Pu 0,005±0,005 Бк/кг, что примерно в 4 раза ниже, чем в почвах Люблинской агломерации. Доля «чернобыльской» фракции ^{239,240}Pu в отложениях изменялась от 0 до 35%. В донных отложениях верховьев р. Вислы установлено накопление ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, источниками которых являются сточные воды (обогащенные угольной пылью) угольных разработок, расположенных в Верхней Силезии [82] (табл. 35). Установлена положительная корреляция между содержанием в речных отложениях глинистых частиц и ⁴⁰K (коэффициент корреляции 0,94).

Таблица 35. Радионуклиды (Бк/кг) и содержание (в %) глинистых частиц (фракция $\leq 0,02$ мм) в донных от-

ложениях р. Вислы [82]

Место	⁴⁰ K	²²⁸ Ra	²²⁶ Ra	Глина
Река Пржемжа (приток Вислы)	230	45	45	11,0
Верховья Вислы (выше углеразработок)	480	40	70	59,0
В зоне влияния углеразработок	360	610	415	31,0
В зоне влияния углеразработок	310	280	205	50,5
Ниже углеразработок	185	130	80	8,5
Ниже углеразработок	270	75	55	19,0
Верхняя граница г. Кракова	440	40	65	48,5
Ниже г. Кракова	595	60	55	84,5
Каменный уголь, Силезия	0-758	0-105	0-121	-
Земная кора	370	25	25	

Техногенные (⁴⁶Sc, ⁵⁴Mn, ⁶⁰Co, ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ¹⁴⁴Ce) и природные (⁷Be, ²¹⁰Pb, ²²⁶Ra, ²²⁸Th, ²³⁸U) радионуклиды обнаружены в воде и взвешенном веществе р. Оттавы [83]. Источниками техногенных радионуклидов являются глобальные выпадения (результат испытаний атомного оружия), реализация из оборудования Чок-Риверской ядерной лаборатории (с 1947 г. охлаждающие воды из реактора сбрасывались в реку) и ядерного реактора (работал до 1987 г.) первой канадской атомной электростанции, расположенной в 25 км от Лаборатории. Радионуклиды достаточно интенсивно накапливаются и в донных отложениях р. Оттавы [93]. Так, вблизи коллектора сточных вод максимальная общая бета-радиоактивность достигала 480 Бк/г, главным образом в верхнем 15-см слое отложений. Наиболее распространенными радионуклидами являются 137 Cs, 60 Co и 90 Sr, в небольших количествах присутствуют ¹⁵²Eu, ¹⁵⁴Eu и ²⁴¹Am. Радиоактивность отложений, отобранных выше коллектора, находится в пределах фоновой (1-1,3 Бк/г). Исследования, выполненные в 1999-2000 гг., показали, что в воде р. Оттавы практически все радионуклиды (228 Ac, 212 Pb, 208 Tl, 214 Bi, ²¹⁴Pb, ²²⁶Ra, ⁷Be, ⁴⁰K, ²³⁵U, ¹⁴⁰Ba, ¹⁴¹Ce, ¹⁴⁴Ce, ¹³⁷Cs, ¹³¹I, ⁹⁵Nb, ¹⁰³Ru, ¹⁰⁶Ru, ⁹⁵Z, ¹²⁴Sb, ¹²⁵Sb, ⁶⁰Co, ⁵⁹Fe, ⁵⁴Mn, ⁹⁴Nb, ⁴⁶Sc, ⁶⁵Zn, ³H, ⁹⁰Sr) находились ниже предела обнаружения [117]. Исключение составлял тритий, концентрации которого в некоторых пробах достигали 10,9 Бк/л. Аналогичная ситуация наблюдалась в 2005 г., когда значимые концентрации определялись только для трития на участках реки в зоне влияния Лаборатории (до 14,5 Бк/л) и ниже Лаборатории (от 5 до 13 Бк/л). Из всех радионуклидов в 1999-2000 гг. и в 2005 г. в рыбах в значимых концентрациях были обнаружены только ⁴⁰К, ¹³⁷Сs и ³²Р (до 6,8 Бк/кг сырой массы в 1999-2000 гг.). Уровни ⁴⁰К в 1999-2000 гг. составляли 130-140 Бк/кг, в 2005 г. – 120-160 Бк/кг, уровни ¹³⁷Cs в 1999-2000 гг. составляли 19,1-28,2 Бк/кг, в 2005 г. – 7,1-14,3 Бк/кг сырой массы. Результаты определения радионуклидов в донных отложениях р. Оттавы приведены в табл. 36.

В 1974-1976 гг. было изучено распределение различных поллютантов в р. Перияр (шт. Керала, Индия) [104]. Нижнее течение реки проходит через крупный промышленный район, в котором расположены заводы по производству фосфорных удобрений, по переработке монацитов (обогащенных торием), производству хлора и каустической соды и по переработке цинковой руды, сбрасывающие в речные воды большие объемы загрязненных сточных вод, содержащих кислоты, щелочи, фосфаты, металлы, а также различные радиоактивные вещества, включая торий и уран. За исключением периода муссонных дождей скорость течения в реке незначительна, поэтому поступающие в реку сточные воды перемещаются отдельными струями на сравнительно большие расстояния. В результате ламинарного характера течения лишь 0,0001 общего стока участвует в разбавлении сточных вод на расстоянии 100 м от места сброса сточных вод. Величины рН речной воды варьируются в пределах 4,5-8,9 в зависимости от особенностей сточных вод, поступающих на отдельных участках реки. Концентрации ²²⁸Rа достигают вблизи промышленной зоны 5-45 пКи/л, ртути — 0,35-0,46 мкг/л, причем минимальные уровни характерны для периода после муссонных дождей. Отношение ²²⁸Ra/²²⁶Ra в речной воде изменяется от 2 до 9,2 (табл. 37). Это является следствием того, что ²²⁸Ra поступает со стоками предприятия по переработке монацитовых руд, со-

держащих торий, а 226 Rа поступает со стоками завода по производству фосфатных удобрений (переработка фосфатов, содержащих уран). Содержание 226 Rа в речной воде в период исследований составляло от 14 до 22% максимально допустимой величины (фоновый вклад 6%), концентрация 228 Rа – от 16 до 64% максимально допустимой величины (фоновый вклад ~ 10%). В речных отложениях обнаружены радионуклиды ториевого ряда — 232 Th, 228 Th, 238 Ra, 228Ac, 212 Pb, 208 Tl, во многом обусловленные деятельностью завода по переработке монацитов. Радионуклиды ряда урана, обнаруженные в осадке стоков, представлены 238 U, 234 Pa, 210 Tl, поступающими от завода по производству удобрений. Например, перерабатываемые фосфатные породы имеют общую бетарадиоактивность в 248 пКи/г, концентрации 226 Ra составляют 37 пКи/г. В твердом осадке СаСО₃(SO₄), образующегося в ходе производства удобрений, активность 226 Ra составляла 70 пКи/г.

Таблица 36. Радионуклиды в отложениях р. Оттавы в районе Чок-Риверской ядерной лаборатории. Бк/кг [117]

Радионуклид	Энергия, Кэв	жениях р. Оттавы в раи	2005 г.		1999-2000		
-	_	Выше Лаборатории	Лаборатория	Ниже Лаборатории	ГГ.		
	Природные						
Ac-228	911,1	13	8	12-22	5-21		
Pb-212	238,6	11-12	7	12-18	7-25		
T1-208	583,1	4	3	11-22	3-20		
Bi-214	609,3	13-14	11	13-22	8-22		
Bi-214	1120,3	18-20	11	13-27	7-25		
Pb-214	352,0	14-17	13	13-25	7-25		
Ra-226	186,0	10-14	7	13-20	6-31		
Be-7	477,6	нпо *	нпо	нпо	нпо-11		
K-40	1460,8	755-768	685	664-868	458-619		
U-235	185,7	0,5-0,7	0,3	0,6-0,9	0,3-1,5		
		Продукты	деления				
Ba-140	537,4	НПО	нпо	нпо	нпо		
Ce-141	145,5	нпо	нпо	нпо	нпо		
Ce-144	133,5	нпо	нпо	нпо	нпо		
Cs-137	661,6	6,2-9,2	52,3	12,1-60,9	1,1-22,4		
I-131	364,5	нпо	нпо	нпо	нпо		
Nb-95	765,8	нпо	нпо	нпо	нпо		
Ru-103	497,1	нпо	нпо	нпо	нпо		
Ru-106	621,9	НПО	нпо	НПО	нпо		
Zr-95	724,2	нпо	нпо	нпо	нпо		
Zr-95	756,7	НПО	нпо	НПО	нпо		
·	•	Продукты а	ктивации	i i			
Sb-124	1691,0	нпо	нпо	нпо	нпо		
Sb-125	636,2	нпо	нпо	нпо	нпо		
Co-60	1173,2	нпо	18,7	нпо-4,8	1,0-7,1		
Co-60	1332,5	нпо	19,5	нпо-4,9	0,7-6,8		
Fe-59	1099,2	нпо	нпо	нпо	нпо		
Mn-54	834,8	нпо	нпо	нпо	нпо		
Nb-94	702,6	нпо	нпо	нпо	нпо		
Sc-46	889,3	нпо	нпо	нпо	нпо		
Zn-65	1115,5	НПО	нпо	нпо	нпо		

^{*} Ниже предела обнаружения.

Таблица 37. ²²⁸Ra и ²²⁶Ra в воде р. Перияр, 1976 г. (до периода муссонных дождей) [104]

1 аолица 37. Така и така в воде р. Перияр, 1976 г. (до периода муссонных дождеи) [104]						
Местоположение относительно сброса стоков	²²⁸ Ra, пКи/л	²²⁶ Ra, пКи/л	²²⁸ Ra/ ²²⁶ Ra			
28 км выше места сброса сточных вод, фон	2,0	0,7	3,0			
5 км выше места сброса сточных вод	4,5	2,2	2,0			
2 км выше места сброса сточных вод	8,6	2,0	4,3			
Место сброса сточных вод	8,6	2,0	4,3			
2 км ниже сброса сточных вод	17,5	1,9	9,2			
5 км ниже сброса сточных вод	15,3	1,8	8,5			

Большая часть поступающих в реку радионуклидов осаждается на дно, образуя нерастворимые соединения с кальцием и фосфором (табл. 38). Ртуть и кадмий также преимущественно концентрируются в донных отложениях, цинк, медь и марганец активно мигрируют в растворенном состоянии. Судя по всему, существенная часть поллютантов поступает в реку в составе взвешенных веществ, что предопределяет их активное гидравлическое осаждение, особенно в условиях слабого течения, свойственного реке в относительно сухие периоды.

Таблица 38. Поллютанты в донных отложениях р. Перияр, 1974-1975 г., мг/кг [104]

Местоположение относительно	Общая	в бета-	228	Ra,	Z	'n	C	d	Н	[g
сброса стоков	радиоакт	ивность,	пКи/г		ı					
	πК	и/г								
	1 *	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Местный фон	63	50	0,5	0,2	25	0,02	<0,002	<0,002	<0,03	<0,03
5 км выше места сброса стоков	156	90	1,5	2,0	12	275	0,75	2,5	-	0,07
2 км выше места сброса стоков	146	119	1,2	0,9	24	350	0,75	2,5	0,86	0,45
Место сброса стоков	1716	1237	556	516	3500	5500	17,5	5,0	110	4
2 км ниже сброса стоков	346	254	20	15,6	-	1450	-	10	-	4,65
5 км ниже сброса стоков	96	122	1	1,2	27	400	0,75	2,5	0,03	1,15

^{* 1 –} до сезона муссонов, 2 – после сезона муссонов.

В целом интенсивность концентрирования многих поллютантов в воде и донных отложениях относительно фоновых значений достаточно велика (табл. 39). Концентрации 228 Rа в различных видах речных рыб варьировались в пределах 0,05-2,20 пКи/г, ртути — от 0,1 до 0,2 мкг/г. Бурные паводки в периоды муссонных дождей не только разбавляют сбрасываемые в реку сточные воды, но и промывают русло, смывая загрязненные отложения с поверхности дна.

Таблица 39. Интенсивность концентрирования поллютантов в воде и отложениях р. Перияр (коэффициенты

концентрации относительного местного фона) [104]

Поллютанты	Коэффициенты концентрации		
	Вода	Донные отложения	
²²⁸ Ra	15	500	
PO_4	46	43	
Медь	6	1	
Цинк	> 3750	220	
Кадмий	> 400	> 8750	
Марганец	180	4	
Ртуть	> 23	> 3600	

Имеющиеся данные указывают на то, что основная масса поступающих со сточными водами в водные системы радионуклидов накапливается в донных отложениях. Например, исследования периодических выбросов плутония в р. Грейт-Майами из Маунд-Лэборатори в Майамисберге (шт. Огайо, США) показали, что при типичных для летнего периода расходах реки примерно 60% выброшенного вещества удаляется из воды за счет седиментации в пределах 10 км от места сброса [29]. Переотложение этого материала в промежутках между выбросами создает высокий «вторичный» поток ²³⁸Ри в реке. Остальные 40% вещества выбросов уносятся вниз по течению. Более 95% всего количества ¹³⁷Сѕ и ^{239,240}Ри, поступившего в южную часть озера Мичиган, находятся ныне в донных отложениях [29]. Это показывает, что эффективность улавливания их отложениями очень велика. Накоплению радионуклидов, безусловно, способствует значительная обогащенность речных отложений в зонах техногенного загрязнения органическим веществом и гидроксидами железа.

Заключение

Основными источниками поступления радионуклидов в городскую канализацию являются сточные воды медицинских и научно-исследовательских организаций, а также производственные стоки предприятий, применяющих в своей деятельности ионизирующее излучение и радиоактивные материалы. При использовании в городах комбинированной системы водоотведения источником поставки радиоактивных материалов на очистные сооружения является также поверхностный сток с помышленно-урбанизированных территорий. Радиоактивное загрязнение городских канализационных сетей и очистных сооружений может формироваться в результате различных процессов очистки стоков, при случайном притоке поверхностных, грунтовых и подземных вод в систему канализации, при использовании некоторых материалов и продуктов в технологическом цикле станций очистки. Все это определяет вероятность накопления в осадках сточных вод природных и техногенных радионуклидов.

Концентрации радионуклидов в ОСВ, как правило, относительно невелики, а обусловленная ими радиационная нагрузка на профессиональных рабочих и основное население незначительна и практически во всех случаях не представляет серьезной угрозы для их здоровья. Лишь в некоторых случаях рабочие очистных сооружений, сельскохозяйственные работники и жители районов размещения (использования) ОСВ и их золы могут испытывать повышенные дозы радиации, обусловленные этими отходами, однако рассчитанные (оценочные) максимальные дозы радиации редко достигают значений в 100 мР/год. Тем не менее в мировой практике известны случаи достаточно интенсивного радиоактивного загрязнения канализационных систем, очистных сооружений и ОСВ. Высокими уровнями радионуклидов отличаются ОСВ, образующиеся на территориях, подвергшихся влиянию аварийных выбросов Чернобыльской АЭС. В любом случае при выборе направлений утилизации и практического использования ОСВ и их золы необходимо проводить оценку уровня их радиоактивного загрязнения.

С осадками сточных вод связывается незначительная часть радионуклидов, поступающих на очистные сооружения, что свидетельствует о незначительной степени очистки сточных вод от этих поллютантов. Предполагается, что радионуклиды могут перераспределяться среди вторичных и третичных продуктов, образующихся при очистке сточных вод. Определенная часть радионуклидов в составе сбрасываемых с очистных сооружений сточных вод поступает в реки и водоемы, где они в существенной степени накапливаются в донных отложениях водных объектов. Можно предположить, что активно формирующиеся в настоящее время в реках в зонах загрязнения техногенные илы будут характеризоваться повышенными концентрациями природных и техногенных радионуклидов, источниками поступления которых являются городские станции очистки сточных вод. Протекающие в водотоках постседиментационные процессы обусловливают перераспределение радионуклидов в пространстве и их разделение между жидкой и твердой фазами донных отложениях, способствуя тем самым миграции поллютантов вниз по руслу и их включению в биогеохимические циклы. Это определяет необходимость дальнейшего изучения особенностей поведения радионуклидов в водных системах, их накопления и перераспределения в донных отложениях, особенно в техногенных илах, своеобразным геохимическим аналогом которых являются осадки сточных вод, образующиеся на городских очистных сооружениях.

Литература

- 1. *Архипов Н.П.*, *Февралева Л.Т.*, *Бобрикова Е.Т.*, *Федорова Е.А*. Накопление тяжелых естественных радионуклидов огурцами в условиях закрытого и открытого грунта // Агрохимия, 1986, № 3, с. 93-97.
- 2. *Ачкасов А.И.* Геохимические особенности осадков сточных вод (на примере городов Московской области) // Прикладная геохимия. Вып. 6: Экологическая геохимия Москвы и Подмосковья. М.: ИМГРЭ, 2004, с. 160-176.

- 3. *Булатов В.И.* 200 ядерных полигонов СССР: География радиационных катастроф и загрязнений. Новосибирск: ЦЭРИСС, 1993. 88 с.
 - 4. Василенко И.Я. Радиоактивный цезий-137 // Природа, 1999, № 3, с. 70-76.
 - 5. Вовк И.Ф. Радиолиз подземных вод и его геохимическая роль. М.: Недра, 1979. 231 с.
- 6. Воронов А.Н. Радон в подземных водах: экологические аспекты // Экологические проблемы гидрогеологии: 8 Толстихинские чтения. Санкт-Петербург. 16-17 ноября, 1999: Мат-лы научн.-методич. конф. СПб.: Изд-во СПбГГИ, 1999, с. 148-151.
- 7. Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества: Справ. изд. Л.: Химия, 1990. 464 с.
- 8. Вывод из эксплуатации медицинских, промышленных и исследовательских установок. Руководство по безопасности. Серия норм безопасности, № WS-G-2.2. — Вена: МАГАТЭ, 2005 // http://www.iaea.org.
- 9. Гришин Н.Н., Гритченко З.Г., Степанов А.В. Содержание чернобыльских и природных радионуклидов в донных отложениях московских рек // Экологические исследования в г. Москве и Московской области. Состояние водных систем. М.:ИНИОН РАН, 1992, с. 180-184.
- 10. Деятельность МЖКХ Беларуси по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС // http://www.nestor.minsk.by/sn/2005/05/sn50506.html.
 - 11. Дезактивационные работы // http://expo2000.bsu.by/main_docoment.idc?nd=23&ps=2.
- 12. Дезактивация. Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС // http://www.chernobyl.gov.by/index.php?option=com_content&task=view&id=151&Itermid=114.
- 13. Евилевич А.З., Евилевич М.А. Утилизация осадков сточных вод. Л.: Стройиздат, 1988. 248 с.
- 14. Евсеева Л.С., Перельман А.И., Иванов К.Е. Геохимия урана в зоне гипергенеза. М.: Атомиздат, 1975. 280 с.
- 15. *Израэль Ю.А., Квасникова Е.В., Назаров И.М. и др.* Атлас радиоактивного загрязнения европейской части России, Белоруссии и Украины итог радиационного мониторинга после аварии на Чернобыльской АЭС // Метеорология и гидрология, 1999, № 9, с. 5-16.
- 16. *Кабата-Пендиас А.*, *Пендиас X*. Микроэлементы в почвах и растениях: Пер. с англ. М.: Мир, 1989.-439 с.
- 17. Корытов Ф.Я. Наногеохимия урана и тория во фторсодержащих рудах // Геохимия и рудообразование радиоактивных, благородных и редких металлов в эндогенных и экзогенных процессах: Мат-лы Всерос. конф. с иностранным участием, посв. 50-летию СО РАН и 80-летию чл.-корр. РАН Ф.П. Кренделева, Улан-Удэ, 16-18 апр., 2007. Ч. 1. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2007, с. 99.
 - 18. Крисюк Э.М. Уровни и последствия облучения населения // АНРИ, 2002, № 1, с. 4-13.
- 19. *Марей А.Н.* Санитарная охрана водоемов от загрязнений радиоактивными веществами. М.: Атомиздат, 1976. 224 с.
- 20. Международные основные нормы безопасности для защиты от ионизирующих излучений и безопасного обращения с источниками излучения. Серия изданий по безопасности, № 115. Вена: МАГАТЭ, 1997 // http://www.iaea.org.
 - 21. Москалев Ю.И. Минеральный обмен. М.: Медицина, 1985. 288 с.
- 22. *Мухамедшин К.Д., Чилипов А.И., Безуглов В.К., Сныткин Г.В.* Состояние загрязнения радионуклидами лесов России // Научн. труды Московск. гос. ун-та леса, 1997, № 286, с. 65-70.
 - 23. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). СП 2.6.1.758-99. Минздрав России. 1999.
- 24. Обращение с радиоактивными отходами, образующимися в результате использования радиоактивных материалов в медицине, сельском хозяйстве, исследованиях и образовании. Руко-

- водство по безопасности. Серия норм безопасности, № WS-G-2.7. Вена: МАГАТЭ, 2006 // http://www.iaea.org.
- 25. Платонов А.П. Строительные материалы и экология // Автомобильные дороги, 1992, № 3, с. 16-17.
- 26. *Покровская С.Ф., Касатиков В.А.* Использование осадка городских сточных вод в сельском хозяйстве. М.: ВНИИТЭИагропром, 1987. 59 с.
- 27. Применение концепций исключения, изъятия и освобождения от контроля. Руководство по безопасности. Серия норм безопасности, № RS-G-1.7. Вена: МАГАТЭ, 2006 // http://www.iaea.org.
- 28. Проблемы радиоэкологии // Итоги науки и техники. Радиационная биология. Т. 4. М.: ВИНИТИ, 1983. 144 с.
- 29. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиоэкология после Чернобыля: Пер. с англ. М.: Мир, 1999. 512 с.
- 30. Радиационная защита при профессиональном облучении. Руководство по безопасности. Серия норм безопасности, № RS-G-1.1. Вена: МАГАТЭ, 1999 // http://www.iaea.org.
 - 31. Радиация. Дозы, эффекты, риск: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 79 с.
- 32. Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Мат-лы II Междунар. конф., г. Томск, 18-22 октября 2004 г. Томск: Изд-во Тандем-Арт», 2004. 772 с.
 - 33. Ранкама К. Изотопы в геологии: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. 464 с.
- 34. Регулирующий контроль радиоактивных сбросов в окружающую среду. Руководство по безопасности. Серия изданий по безопасности, № WS-G-2.3. Вена: МАГАТЭ, 2005 // http://www.iaea.org.
 - 35. Свойства элементов: Справ. изд. В 2-х кн. Кн. 2. М.: Металлургия, 1997. 448 с.
 - 36. *Смыслов А.А.* Уран и торий в земной коре. Л.: Недра, 1975. 231 с.
 - 37. Справочник по изотопной геохимии. М.: Энергоиздат, 1982. 240 с.
 - 38. Титаева Н.А. Ядерная геохимия. М.: Изд-во МГУ, 2000. 336 с.
 - 39. Токарев А.Н., Щербаков А.В. Радиогидрогеология. М.: Госгеолтехиздат, 1956. 263 с.
- 40. *Тюрюканова Э.Б.* Радионуклиды новые вещества в биосфере // Биогеохимический круговорот веществ в биосфере. М.: Наука, 1987, с. 124-129.
- 41. *Чумаченко А.М., Ананьев А.И., Голубкова И.Ф., Фомин И.А.* О радиоактивной загрязненности атмосферы рудников по добыче руд цветных и редких металлов // Цветная металлургия, 1992. № 2 с. 66-70.
- 42. Юдович Я.Э., Волостнов А.В., Кетрис М.П., Рихванов Л.П. Торий в углях. Томск: ИД «Тандем-Арт», 2004.-44 с.
 - 43. *Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Уран в углях. Сыктывкар, 2001. 80 с.
- 44. Янин Е.П. Геохимические особенности осадков сточных вод промышленного города (на примере Саранска). М.: ИМГРЭ, 1996. 41 с.
- 45. *Arthur W.J.*, *Markham O.D.* Polonium-210 in the environment around a radioactive waste disposal area and phosphate ore processing plant // Health Rhys., 1984, 46, № 4, p. 793-799.
- 46. *Ault M.R.* Gamma emitting isotopes of medical origin detected in sanitary waste samples // Radiation Protection Management, 1989, v. 6, p. 48-52.
- 47. *Bastian R.K.*, *Bachmaier J.T.*, *Schmidt D.W. et al.* Radioactive materials in biosolids: national survey, dose modeling, and publicly owned treatment works (POTW) guidance // J. Environ. Qual., 2005, v. 34, p. 64-74.
- 48. *Beasley T.M.*, *Ball L.A*. ^{243,244}Cm in Columbia River sediment // Nature, 1980. 287, № 5783, p. 624-625,
- 49. *Belcher E.H.* Experimental studies on the fate of radioactive materials in sewage treatment // J. Inst. of Sewage Purification, 1951, v. 3, p. 248-359.

- 50. *Billings C.H.* Radionuclide removal in wastewater treatment // Public works, 1994, v. 125, p. 78-179.
- 51. *Brennan M.J.* The presence of radionuclides in sewage sludge and their effect on human health. Environmental Radiation Program. WDOH/320-013. Washington State Department of Health. Environmental Health Programs. December, 1997.
- 52. Bünger T., Obrikat D., Rühle H., Viertel H. Materialienband 1997 zur Radioaltivität in Trink Wasser, Grundwasser, Abwasser, Klärschlamm, Reststoffen und Abfällen // BfS-AS Ber., 2000, № 1, s. 1-249.
- 53. Byong-Hum J., Dempsey B.A., Burgos W.D. et al. Chemical reduction of U(VI) by Fe(II) at the solid water interface using natural and synthetic Fe(III) oxides // Environ. Sci. and Technol., 2005, 39, № 15, p. 5642-5649.
- 54. *Choudhury S., Goswami T.D.* Estimation of uranium contents in different parts of plants and soils // Indian/ J. Phys. A., 1990, 64, № 5, p. 399-404.
- 55. Citizens monitoring of Columbia River radionuclides. Hanford, WA. May 2005 // http://www.clarku.edu/mtafund/prodib/gap/final_report.pdf.
- 56. Cizdziel J.V., Hodge V.F., Faller S.H. Plutonium anomalies in attic dust and soils at locations surrounding the Nevada test site // Chemosphere, 1998, 37, № 6, p. 1157-1168.
- 57. Combating illicit trafficking in nuclear and other radioactive materials. Reference manual. IAEA Nuclear Security Series No. 6. Technical Guidance. Vienna: IAEA, 2007 // http://www.iaea.org.
- 58. Comparative evolution of therapeutic radiopharmaceutical. Technical Reports Series. No 258. Vienna: IAEA, 2007 // http://www.iaea.org.
- 59. Dalmasso J., Barci-Funel G., Barci V., Ardisson G. Study of transfer of the medically used radionuclides in sewage systems // Radiochimica Acta, 1997, v. 78, p. 167-171.
- 60. *Dang H.S.*, *Pullat V.R.*, *Jaiswal D.D. et al.* Daily intake of uranium by urban indian population // J. Radioanal. and Nucl. Chem. Art., 1988, 138, № 1, p. 67-72.
 - 61. Dorner W.G. Radioaktivität der Gewässer // Chem. Rdsch., 1984, 37, № 31-32, s. 5-6.
- 62. *Durham R.W., Joshi S.R.* Radionuclide concentrations in two sewage treatment plants on western lake Ontario, Canada // J. Radioanalytical Chem., 1979, v. 54, p. 367-370.
- 63. *Durham R.W., Joshi S.R.* Investigation of Lake Ontario water quality near Port Granby radioactive waste management site // Water, Air, and Soil Pollut., 1980, 13, № 1, p. 17-26.
- 64. *Durham R.W., Joshi S.R.* Concentrations of radionuclides in Lake Ontario water from measurements on water treatment plant sludges // Water. Res., 1981, 15, № 1, p. 83-86.
- 65. *Ellis J.B.*, *Revitt D.M.*, *Harrop D.O. et al.* The contribution of highway surface to urban stormwater sediments and metal loadings // Sci. Total Environm., 1987, v. 59, p. 339-349.
- 66. Environmental radiological surveillance report on Oregon surface waters, 1961-1993. Vol. 1. Portland, Oregon Health Division, December 1994 // http://www.oregon.gov.
- 67. *Erlandsson B., Bjurman B., Mattsson S.* Calculation of radionuclide ground deposition by means of measurements on sewage sludge // Water, Air, and Soil Pollut., 1989, v. 45, p. 329-344.
- 68. *Erlandsson B., Ingemansson T.* Comparative studies of radionuclides from global fallout and local sources in ground level air and sewage sludge // Water, Air, and Soil Pollut., 1983, v. 20, p. 331-346.
- 69. *Erlandsson B., Mattsson S.* Medically used radionuclides in sewage sludge // Water, Air, and Soil Pollut., 1978, v. 9, p. 199-206.
- 70. Folsom T.R., Mohanrao J.N., Betz J.M., Gardner W.F. A study of certain radioactive isotopes in selected wastewater treatment plants // J. Water Pollut. Control, 1963, v. 35, p. 304-333.
- 71. *Gallego E.* MUD: A model to investigate the migration of ¹³⁷Cs in the urban environment and drainage and sewage treatment systems // NKS Conference on Radioactive Contamination in Urban Areas, May 7-9, 2003 // J. of Environmental Radioactivity, 2006, 85, № 2-3, p. 247-264.

- 72. Guidelines for naturally occurring radioactive materials. Australian Petroleum Production & Exploration Association Limited (APPEA). March 2002 // http://www.appea.com.au.
- 73. *Hanlon E.A.* Naturally occurring radionuclides in agricultural products: An overview // J. Environ. Qual., 1994, 23, № 4, p. 630-632.
- 74. *Ham G.J.*, *Shaw S.*, *Crockett G.M.*, *Wilkins B.T.* Partitioning of radionuclides with sewage sludge and transfer along terrestrial foodchain pathways from sludge-amended land A review of data. National Radiological Protection Board. NRPB-W32. Chilton, 2003 (ISBN 0 85951 504 4) // http://www.hpa.org.uk.
 - 75. Health risks from plutonium-contaminated sewage sludge // www.acphd.org.
- 76. *Ichikawa Sadao* // Когай кэнкю. Res. Environ. Disrupt. Inderdiscipl. Coop., 1985, 15, № 1, p. 62-66.
- 77. Ingemansson T., Mattsson S., Erlandsson B. Sewage sludge a possible indicator for radionuclides released to the atmosphere from nuclear power plants // Health Phys., 1981, 41, N_2 6, p. 815-822.
- 78. Interagency Steering Committee on Radiation Standards. Sewage Sludge Subcommittee. US EPA. US NRC. Guidance on Radioactive Materials in Sewage Sludge and Ash at Publicly Owned Treatment Works, Revised Draft, June 2000.
- 79. Interagency Steering Committee on Radiation Standards. Final Report. ISCORS Assessment of Radioactivity in Sewage Sludge: Radiological Survey Results and Analysis. NUREG-1775. EPA 832-R-03-002. DOE/EH-0669. ISCORS Technical Report 2003-02. Date Publicsed: November 2003 (http://www.iscors.org).
- 80. Interagency Steering Committee on Radiation Standards. Final Report. ISCORS Assessment of Radioactivity in Sewage Sludge: Modelling to Assess Radiation Doses. NUREG-1783. EPA 832-R-03-002A. DOE/EH-0670. ISCORS Technical Report 2004-03. Date Publicsed: February 2005 (http://www.iscors.org).
- 81. Interagency Steering Committee on Radiation Standards. Final Report. ISCORS Assessment of Radioactivity in Sewage Sludge: Recommendations on Management of Radioactive Materials in Sewage Sludge and Ash at Publicly Owned Treatment Works. DOE/EH-0668. EPA 832-R-03-002B. ISCORS Technical Report 2004-04. Date Publicsed: February 2005 (http://www.iscors.org).
- 82. *Jasińska M., Mietelski J.W., Pociask-Karteczka J.* Radionuclide content in the upper Vistula River sediments in a coal mining region in Poland (East-Central Europe) // Water, Air, and Soil Pollut., 1998, v. 102, p. 355-360.
- 83. *Joshi S.R., McCrea R.C.* Sources and behavior of anthropogenic radionuclides in the Ottawa River waters // Water, Air, and Soil Pollut., 1992, v. 62, p. 167-184.
- 84. Joint NRC/EPA Sewage Sludge Radiological Survey: Survey Design & Test Site Results. EPA 832-R-99-900. March 1999.
- 85. *Joshi S.R.*, *McCrea R.C.* Sources and behaviour of anthropogenic radionuclides in the Ottawa River waters // Water, Air, and Soil Pollut., 1992, 62, № 1-2, p. 167-184.
- 86. *Kendall G*. Health risk of radon in drinking water in the USA // Radiol. Prot. Bull., 2000, № 220, p. 7-8.
- 87. *Khalique A., Augustine W., Sawyer B. et al.* Radiological monitoring of the raw sewage, final effluent, sludge and biosolids of the metropolitan water reclamation district of Greater Chicago // http://www.lanl.gov/BAER-Conference/BAERCon-44p055.pdf.
- 88. *Komosa A*. River sediment contamination with plutonium isotope and heavy metals in Lublin agglomeration (Poland) // Polish J. of Environ. Studies, 1999, 8, № 3, p. 155-160.
- 89. *Koyama A., Nichimaky K.* Feasibility study of the applicability of the activated sludge process to treatment of radioactive organic liquid waste // Waste Management, 1997, v. 17, № 1, p. 47-52.

- 90. Krivan V., Egger K.P., Hausbeck R., Schmid W. Belastung der Luft und anderer durch Niederschlag kontaminierter Umweltproben des Ulmer Raumes mit radioaktiven Spaltprodukten nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl // Fresenius Z. Anal. Chem., 1986, v. 325, s. 597-602.
- 91. *Lal N., Sharma P.K., Sharma Y.P., Nagpaul K.K.* Determination of uranium in fertilisers using fission track method // Fertil. Res., 1985, 6, № 1, p. 85-89.
- 92. Larsen I.L., Stetar E.A., Glass K.D. In-house screening for radioactive sludge at a municipal wastewater treatment plant // Radiat. Protection Management, 1995, v. 12, p. 29-38.
- 93. *Lee D.R.*, *Hartwig D.S.* Analysis of riverbed sediments near the Chalk River Laboratories // 2nd International Symposium on Contaminated Sediments //http://www.aecl.ca/ Publications/Report/EER-Report-Jan05.pdf.
 - 94. Marshall L. Nuclear waste and nimby // Atom, 1986, № 356, p. 2-9.
- 95. *Martin J.E., Fenner F.D.* Radioactivity in municipal sewage and sludge // Public Health Reports, 1997, 112, July/August, p. 308-316.
 - 96. *Mayer S*. The radon threat // Water Technol., 1986, 9, № 4, p. 32-35.
- 97. *Mollan A.S.*, *Ahmed G.U.*, *Husain S.R.*, *Rahman M.M.* The natural radioactivity of some building materials used in Bangladesh // Health Phys., 1986, 50, № 6, p. 849-851.
- 98. *Moss C.E.* Control of radioisotope releases to the environment from diagnostic isotope procedures // Health Phys., 1973, v. 25, p. 197-198.
- 99. *Mumma R.O.*, *Rashid K.A.*, *Raupach D.C. et al.* Mutagenic, toxicants, and other constituents in small city sludges in New York State // Arch. Environ. Contam. Toxicol., 1988, v. 17, p. 657-663.
- 100. Mumma R.O., Raupach D.R., Waldman J.P. et al. Analytical survey of elements and other contituents in Central New York state sewage sludge // Arch. Environ. Contam. Toxicol., 1983, v. 12, p. 581-587.
- 101. *Mumma R.O.*, *Raupach D.C.*, *Waldman J.P. et al.* National survey of elements and other constituents in municipal sewage sludges // Arch. Environ. Contam. Toxicol., 1984, v. 13, p. 75-83.
- 102. *Nagaya Y., Nakamura K.* ^{239,240}Pu and ¹³⁷Cs in the East China and the Yellow Seas // J. of Oceanography, 1992, v. 48, p. 23-35.
- 103. Nuclear regulation. Action need to control radioactive contamination at sewage treatment plants. US GAO. Report to congressional requesters. GAO/RCED-94-133. May 1994.
- 104. *Paul A.C.*, *Pillai K.C.* Pollution profile of a river // Water, Air, and Soil Pollut., 1978, 10, № 2, p. 133-146.
- 105. *Paul A.C.*, *Pillai P.M.B.*, *Komalan N.S.*, *Pillai K.C.* Studies on the leaching of radium and the emanation of radon from fertilizer process sludge // J. Environ. Radioact., 1984, 1, № 1, p. 50-65.
- 106. Potential impacts on drinking water and wastewater systems from radiological dispersal events // www.EVS.anl.gov.
- 107. *Prichard H.M.*, *Gesell T.F.*, *Davis E.* Iodine-131 levels in sludge and treated municipal wastewaters near a large medical complex // American J. of Public Health, 1981, v. 71, p. 47-52.
- 108. *Puhakainen M*. Detection of radionuclides in sewage water // Radiochemistry, 1998. 40, № 6, p. 529-533.
- 109. *Puhakainen M., Yläranta T.* Uptake of radionuclides by spring wheat and barley from cultivated soils supplemented by contaminated sewage sludge // Agricultural Science in Finland, 1992, v. 1, p. 27-36.
- 110. Radiological Environmental Survey outside the Chalk River Laboratories Site. Laboratoire de Radioécologie, LRUL, 2006-1, February 2006
 - 111. Radiation dose limits // Int. Environ. and Safety, 1986, 4, № 2, p. 5.
- 112. Radiation, Radioactivity & Environmental Surveillance at Pottstown Landfill/ A Report to the Pottstown Landfill Closure Committee. Pennsylvania Department of Environmental Protection/ Bureau of Radiation Protection. Harrisburg, Pennsylvania, September, 2005 //

- $http://www.dep.state.pa.us/dep/deputate/fieldops/se/PLCCfiles/Pottstown_LF_Closure_Com_Report_Radiation_20050909.pdf.$
- 113. *Riley I.P*. The occurrence of technetium in the Irish Sea // Mar. Pollut. Bull., 1986, 17, № 5, p. 229.
- 114. *Robertson D.E.*, *Fix J.J.* Association of Hanford origin radionuclides with Columbia River sediment. Battele Pacific Northwest Laboratories. BNWL-2305/UC-41, August 1977 //http://www.osti.gov.
- 115. Ruchhoft C.C., Feitelberg S. Estimates of the concentrations of radiodine in sewage and sludge from hospital wastes // Nucleinics, 1951, v. 9 (6), p. 29-34.
- 116. Saiki D., Koyama A., Fukutani S., Nishimaki K. An experimental study on translation of cobalt and cesium to Ulvaceaee // KURRI Progress Report, 2003. Osaka, 2004, p. 107.
- 117. *Salih F.M.*, *Pillay A.E.*, *Jayasekera K.* ⁷Be Levels in Sewage Sludge: A Baseline Study // Instrumentation Science and Technology, 2004, 32, № 4, p. 433-444.
- 118. Šivo A., Grgula M., Cechová A., Povinec P. Radioactive gases in the Bratislava atmosphere // Acta fac. Rerum natur. Univ. Comenianae, Formatio et prot. natur., 1998 (1991), 14, p. 115-124.
- 119. *Sodd V.J.*, *Velten R.J.*, *Saenger E.L.* Concentrations of the medically useful radionuclides, technetium-99m and iodine-131 at a large metropolitan waste water treatment plant // Health Phys., 1975, v. 28, p. 355-359.
- 120. Stetar E.A., Boston H.L., Larsen I.L., Mobley M.H. The removal of radioactive cobalt, cesium, and iodine in a conventional municipal wastewater treatment plant // Water Environ. Res., 1993, v. 65, p. 630-639.
- 121. *Suzuki T., Okano Y., Sugiura S., Inokoshi Y.* Concentration of medically used radionuclides in activated sludge at the megalopolis waste water treatment plants and estimation for the effective dose // Hoken Butsuri=J. of Japan Health Physics Soc., 1998, 33, № 2, p. 163-170.
- 122. *Teherani D.K.* Radionuclide concentration in sewage sludge at several location in Austria after the Chernobyl accident // J. Radioanal. Nucl. Chem., Letters, 1987, v. 118(6), p. 421-426.
- 123. Trends in radiopharmaceuticals (ISTR-2005). Proc. of International symposium organized by the International Atomic Energy Agency and Held in Vienna, 14-18 November 2005/ In two volumes. Vol. I. Vienna: IAEA, 2007. 426 p. // http://www.iaea.org.
- 124. *Vesa P., Risro A.J.* Uraanin dispersio maaperässä: esimerkki pohjois-suomesta // Geol. tutkimuskeskus, 1991, № 105, p. 31-46.