

2. Егоренков П.М. и др. Соображения о повышении мощности реакторов ИРТ до 8 МВт: Препринт ИАЭ-1707, 1968.
3. Гончаров В.В., Архангельский Н.В., Егоренков П.М. Реконструкция реактора ВВР-С на основе использования ТВС типа ИРТ-М с повышением мощности с 2 до 10 МВт: Препринт ИАЭ-2373, 1974.
4. Гончаров В.В., Глухов А.М., Егоренков П.М. и др. Создание ТВС типа ИРТ-3М для бассейновых реакторов и опыт их использования. — В сб.: Сов. специалистов по обмену опытом реконструкции ИР в странах — членах СЭВ, 1984, с. 270—301.
5. Каталогное описание ТВС ИРТ-3М. ОАО НЗХК, 1998.
6. Yuldashev B.S., Ashrapov T.B., Karabaev Kh.Kh. e.a. The WWR-CM reactor conversion to use the IRT-3M type FA with 36% enriched uranium. — In: Intern. Symp. on Research Reactor Utilization, Safety and Management. Lisbon, Portugal, 6—10 Sept. 1999, p. № 46P.
7. Briesmeister J. MCNP — a General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C. LA-13709-M, 2000.
8. Ageron P., Fabrega S., Skok J. Hydraulique et thermique. — Bul. d'Inform. Sci. et Techn., 1963, № 78.
9. Емельянов М.К., Талиев А.В. Программа ASTRA для расчета теплового режима ТВС с трубчатыми коаксиальными твэлами: Препринт ИАЭ-4112/4, 1985.

Поступила 25.12.02

В окончательной редакции 29.04.05

УДК 621.039.58

ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НАСЕЛЕНИЕ И ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ВРЕМЕННЫХ ХРАНИЛИЩ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ НА ТЕРРИТОРИИ РНЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Новиков В.М. (Международный институт прикладного системного анализа, Австрия), Лагутов В.В. (Центральный европейский ун-т, Венгрия), Сазыкина Т.Г. (НПО «Тайфун»), Горлинский Ю.Е., Никольский О.А., Павленко В.И. (РНЦ «Курчатовский ин-т)

РНЦ «Курчатовский институт» — старейший и один из крупных ядерных центров в Московском регионе. На его территории находятся девять исследовательских реакторов, часть которых продолжает функционировать, 17 критических сборок, лаборатория радиационного материаловедения, хранилища отработавшего ядерного топлива и пункты временного хранения радиоактивных отходов траншейного типа с неизбежным загрязнением поверхностного слоя участка хранения. К моменту проведения описываемых в настоящей статье работ активность радионуклидов на участке временного хранения была аналитически оценена равной 0,1 МКи [1].

Население, проживающее в прилегающем районе, проявляет беспокойство по поводу возможных последствий такого близкого участка временного хранения отходов (рис. 1, 2). Территория между оградой участка временного хранения отходов и внешним забором института в настоящее время является городской стоянкой автомобилей, городская дорога вдоль территории института находится на расстоянии нескольких метров от забора, и в часы «пик» на этой дороге проходят до 3000 автомобилей в час.

В 2003 г. Международный институт прикладного системного анализа получил грант на проведение исследования воздействия хранилищ радиоактивных отходов,

расположенных на территории РНЦ «Курчатовский институт», по следующим направлениям:

сбор, анализ и сопоставление доступных данных, относящихся к описанию участка временного хранения отходов и характеристик окружающей среды;

моделирование миграции радионуклидов в результате эрозии почвы поверхностными водами при экстремальных метеорологических условиях;

анализ основных путей радиационного воздействия на критические группы населения и расчет дозовых нагрузок в результате миграции радионуклидов с территории участка временного хранения.

В настоящей статье обобщены результаты исследований, выполненных в рамках этой программы.

Базовая информация об участке временного хранения отходов и моделирование поверхностного переноса радионуклидов. Для площадок, которые формировались в течение нескольких десятилетий, информации, касающейся характеристик захоронений и самой территории, недостаточно. Поэтому недостающую информацию получили с помощью расчетно-аналитических методов. При этом рассматривали ситуацию на территории участка временного хранения, сложившуюся к 2001 г. до начала реабилитационных работ. При оценке радиационных характеристик загрязненной территории использовали известные данные и некоторые производственные документы, известные до 2002 г.

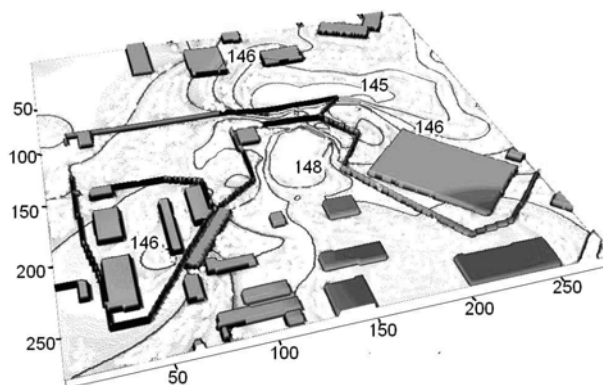
В настоящее время на этом участке проводятся реабилитационные работы, в том числе с изменением и рельефа. В процессе их проведения уточняются и фактические данные о характеристиках отходов и территории участка.

Участок временного хранения расположен на основной площадке института, огражден режимным забором. Его площадь около 1,1 га (рис. 3). Граница института проходит по внешнему забору. Территория между режимным и внешними заборами занята городской автостоянкой. Ближайшее жилое здание расположено в 100 м.

Цель моделирования поверхностного переноса состояла в исследовании эрозии поверхностного слоя на участке временного хранения отходов, перераспределения

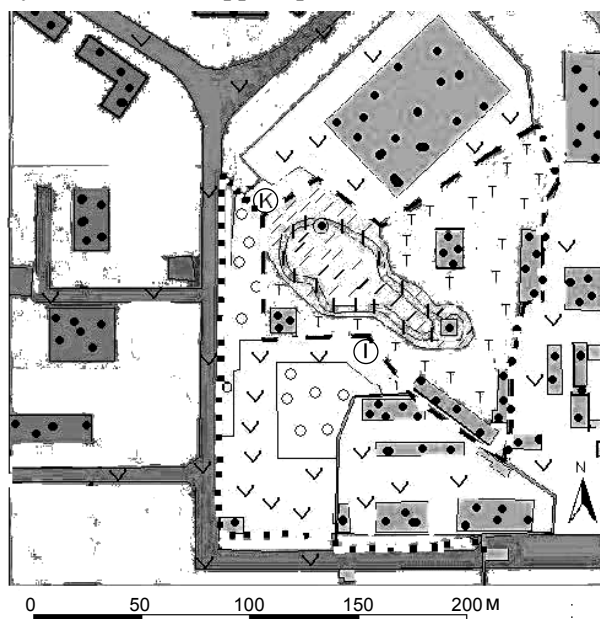


Р и с. 1. Расположение РНЦ «Курчатовский ин-т» и участка хранения радиоактивных отходов на его территории

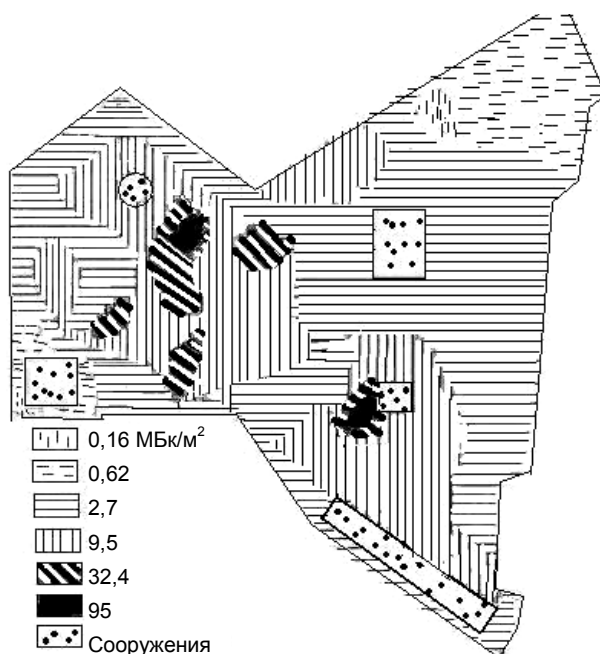


Р и с. 2. Участок временного хранения отходов

радиоактивного загрязнения внутри участка, возможных дождевых смылов радионуклидов с его территории.



Р и с. 3. Территория участка временного хранения отходов и прилегающая городская территория: // — трава; V — асфальт; Т — утрамбованный грунт; O — кирпичный бой; • — сооружения; - - - - режимный бетонный забор; - • - - режимный забор — сетка; ■ — внешний забор



Р и с. 4. Карта исходного загрязнения ^{137}Cs участка временного хранения отходов

нечно, такой статистики недостаточно, так как загрязнение площадки неоднородно:

Принимая во внимание размеры территории, сложный характер рельефа местности, а также наличие большого числа зданий, сооружений и заборов, создающих помехи поверхностному стоку, пространственный шаг для моделирования был принят равным 1×1 м. Для моделирования была использована программа LISEM, разработанная в Утрехтском университете (Нидерланды) в рамках европейского проекта «Spartacus» и основанная на учете физических закономерностей стока поверхностных вод и соответствующей эрозии почвы [2].

Основная информация о поверхностном загрязнении участка получена по результатам измерения мощности экспозиционной дозы γ -излучения. Измерения выполнены с шагом 10 м на расстоянии 1—1,5 м от поверхности (рис. 4) [3]. Поверхностное загрязнение ^{137}Cs получено пересчетом мощности экспозиционной дозы в предположении локальной однородности загрязнения поверхностного слоя грунта толщиной 15 см. Процедура перерасчета основана на удовлетворительном совпадении измеренной мощности в девяти точках территории с расчетной на основе измерения концентрации ^{137}Cs в этих же точках. Содержание ^{90}Sr в грунте определено по загрязнению ^{137}Cs и использованию усредненного соотношения между концентрацией ^{137}Cs и ^{90}Sr , измеренной в семи точках. Конечно, такой статистики недостаточно, так как загрязнение площадки неоднородно:

диапазон изменения мощности экспозиционной дозы составлял 30—3000 мкР/ч, в некоторых местах наблюдается существенное превышение этого уровня. Тем не менее было принято, что полученные значения могут быть использованы в качестве первой аппроксимации.

Другой параметр, неопределенность которого существенно влияет на результаты моделирования, — коэффициент инфильтрации осадков. Диапазон изменения этого параметра, измеренного в разное время и разными методами, велик. К сожалению, ограниченная информация о деталях экспериментальных исследований, выполненных в предшествующие годы, не позволила провести количественное сравнение результатов различных методик определения скорости инфильтрации. Для моделирования переноса были использованы инфильтрационные характеристики урбаноземов, которые в среднем удовлетворительно описывают участки временного хранения отходов с травяным покровом. Для этих участков, обозначенных на рис. 3 как трава, скорость инфильтрации поверхностных вод принята равной 40 мм/ч для сырой и 150 мм/ч для сухой почвы. Для остальной части участка, обозначенной как утрамбованный грунт, характерна повышенная производственная деятельность, что приводит к утрамбовыванию земли и снижению фильтрации. Фильтрация на этих участках принята равной 40 мм/ч, максимальная влагоемкость почвы 35%.

Сценарии переноса радионуклидов поверхностными водами выбраны на основе анализа интенсивности осадков, свойств поверхностного слоя на площадке и состояния режимной ограды участка временного хранения отходов, которая является инженерным барьером на пути возможного водостока. В качестве верхнего предела интенсивности осадков для сильного дождя или ливня принято 100 мм/ч. Согласно метеорологическим данным она соответствует максимуму для района Москвы за последние 37 лет. Интенсивность 35 мм/ч выбрана в качестве нижней границы моделирования осадков, что соответствует среднему за последние 37 лет максимуму часовых осадков.

Рассмотрено несколько сценариев состояния бетонного режимного забора. В принципе он не является водонепроницаемым: щели размером 5—10 мм есть фактически на каждой двухметровой секции бетонной ограды. Восточный периметр забора (проволочная сетка) не является препятствием для дождевых вод. Для упрощения анализа поверхностного стока ливневой воды был рассмотрен сценарий, по которому одна из секций бетонного забора отсутствует в результате, например, проведения ремонтных работ или ее основание размывто из-за эрозионных процессов. Предварительный анализ направлений ливневых вод на участке временного хранения отходов и прилегающей к нему территории, выполненный на основе оцифрованной карты рельефа, позволил выявить несколько мест в заборе, которые могут быть подвержены повышенной водной эрозии и, следовательно, являются местами, где происходит эрозия грунта или возникает необходимость в ремонтных работах. Приведенные соображения составили основу 16 сценариев моделирования эрозии поверхностными водами, представленных в табл. 1:

сильный дождь или ливень (100 мм), типичный дождь (35 мм);

состояние почвы до дождя — сырая (вариант 40), сухая почва (вариант 150);

состояние ограды территории участка — бетонная часть является водонепроницаемой, ограда по всему периметру не препятствует смыву дождевых вод, бетонная часть ограды водонепроницаема всюду, кроме гипотетического проема ши-

риной 1 м вблизи мест наиболее вероятных промоин в соответствии с рельефом и картой стока дождевых вод (точки режимного забора I и К).

Т а б л и ц а 1. Результаты моделирования выноса радионуклидов с территории участка временного хранения отходов

Дождь, мм/ч	Состояние		Вынос ^{137}Cs			Вынос ^{90}Sr		
	почвы	ограды	на территории института, 10^5 Бк	на городскую авто- стоянку, 10^7 Бк	и осажде- ние на городской улице, 10^2 Бк/м ²	на территории института, 10^4 Бк	на городскую авто- стоянку, 10^7 Бк	и осажде- ние на городской улице, 10^2 Бк/м ²
100	Сырая	Без щелей	220	6,3	74	430	1,3	4,2
		Нет забора	0	7,8	—	0	1,5	—
		I	0	42	19	0	8,3	11
		K	0	50	16	0	10	9,1
	Сухая	Без щелей	0,63	0	1,4	0,91	0	0,8
		Нет забора	0	5,6	—	0	1,1	—
		I	0	11	8,9	0	2,1	5
		K	0	24	8,4	0	4,7	4,8
	35	Нет щелей	0	0	—	0	0	0
		Нет забора	0	2,7	—	0	0,54	—
		I	0	1,1	1,9	0	0,22	1,1
		K	0	8	1,9	0	1,6	1,1
	Сухая	Нет щелей	0	0	0	0	0	0
		Нет забора	0	2,7	—	0	0,54	—
		I	0	1,1	1,9	0	0,22	1,1
		K	0	8	1,9	0	1,6	1,1

Примечание. Прочерк соответствует переменным, которые невозможно получить как результат работы модели.

Оценки радиационного воздействия при смыве радионуклидов. Результаты моделирования показывают, что в случае экстремально сильного дождя могут происходить затопление участка временного хранения отходов дождевыми потоками и поверхностный смыв радионуклидов. Поток загрязненной воды достигнет режимного забора участка и распространится по территории между оградой участка временного хранения и внешнего забора института, где расположена парковка городского автотранспорта. Загрязнение стоянки автомашин, площадь которой составляет 6200 м², происходит главным образом вследствие седиментации радионуклидов, смытых в виде взвесей.

Кроме того, загрязненные воды частично просачиваются через технологическое отверстие во внешнем заборе и попадают на улицу, примыкающую к этому забору, стекают по ней и попадают в локальную зону затопления, образующуюся на

улице в дождливые периоды. Площадь затопления, рассчитанная с учетом пропускной способности водосборных коллекторов, составляет 3500 м^2 , объем вод в зоне затопления оценим равным $2500\text{—}2700 \text{ м}^3$. Загрязнение улицы, примыкающей к наружной ограде института, происходит главным образом за счет радионуклидов, смытых в растворимой форме. Это загрязнение было рассчитано в предположении, что загрязненные дождевые воды сохраняются на улице несколько часов, прежде чем завершится их спуск в дренажную систему, и радионуклиды за это время адсорбируются на дне зоны затопления.

В городских условиях основные пути облучения населения при загрязнении локальных участков — внешнее γ -облучение от загрязненной поверхности земли и облучение от ингаляции радионуклидов, поступивших в воздух за счет ресуспензии. К критическим группам населения в рассматриваемых ситуациях отнесены жители ближайших к территории института домов, а также пользователи и работники стоянки автомашин. Расчет дозовых нагрузок был выполнен в соответствии с рекомендациями МКРЗ [4, 5].

Для сценариев сильного дождя или ливня получены следующие результаты:

на парковке дополнительная к фону мощность экспозиционной дозы γ -облучения водителей автомашин может составить $0,02\text{—}0,15 \text{ мкЗв/ч}$ в зависимости от сценария. Это фактически удвоение мощности экспозиционной дозы (среднее измеренное внешнее γ -излучение на территории института вблизи участка временного хранения отходов составляет около $13,7 \text{ мкР/ч}$ [1]), и оно может быть легко обнаружено дозиметрическим контролем;

на загрязненном участке улицы мощность экспозиционной дозы для критической группы населения мала (максимальная $0,017 \text{ мкЗв/ч}$) и вряд ли может быть замечена дозиметрическим контролем.

Для сценариев дождя средней интенсивности расчеты показали незначительное повышение внешнего облучения на стоянке автомашин (до $0,02 \text{ мкЗв/ч}$ в сценарии вблизи мест промыва) и незаметное повышение мощности экспозиционной дозы в пределах участка улицы, затопляемого в дождливую погоду.

Ингаляционный путь облучения связан с формированием локальных радиоактивных отложений, которые подвержены ресуспензии и легко поднимаются в воздух, формируя радиоактивные аэрозоли. Ингаляционная доза была рассчитана с использованием известных процедур [5—7]. Отличие состояло в том, что для начального коэффициента ресуспензии было принято более консервативное значение 10^{-6} м^{-1} , поскольку первоначальные отложения, содержащие радионуклиды, являются влажными и не могут сразу вовлекаться в пыление.

Рассчитанная мощность дозы от ингаляции ^{137}Cs и ^{90}Sr для автовладельцев и персонала, находящихся на стоянке машин, составляет $(5\text{—}44)10^{-11} \text{ Зв/ч}$ и $(7,8\text{—}69)10^{-11} \text{ Зв/ч}$ соответственно. В пределах загрязненного участка улицы максимальная ингаляционная доза для взрослого человека не превышает $3\cdot 10^{-12}\text{—}4\cdot 10^{-11} \text{ Зв/ч}$.

Гипотетическая годовая доза облучения локальной критической группы населения рассчитана исходя из пессимистического предположения, что начальные уровни облучения от смыва радионуклидов с территории участка сохраняются в течение всего последующего года. Предполагалось, что в течение года ежедневно автовладелец находится на автостоянке 1 ч в день, работник автостоянки проводит

там 4 ч рабочего времени, пешеходы 1 ч времени на загрязненном участке улицы (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Годовая доза облучения критических групп населения в результате смыва радионуклидов с участка временного хранения отходов дождевыми водами

Критическая группа населения	Внешнее облучение, 10^{-6} Зв/год	Внутреннее облучение, 10^{-7} Зв/год	Суммарная, 10^{-6} Зв/год	Доля годового предела дозы, %
Сценарии сильного дождя или ливня				
Автовладельцы на стоянке машин	7—55	0,46—4,1	7,1—54,4	0,7—5,4
Работники автостоянки	17,6—132	1,1—10	17,7—133	1,8—13,3
Пешеходы на загрязненном участке улицы	До 6,2	0,015—0,33	До 6,24	До 0,62
Сценарии дождя средней интенсивности				
Автовладельцы на стоянке машин	До 7,3	0,1—0,6	До 7,4	До 0,7
Работники автостоянки	До 17,6	0,23—1,6	До 17,8	До 1,7
Пешеходы на загрязненном участке улицы	0,164	0,02	0,17	0,017

Выводы. В целом анализ показал, что данных о территории участка временного хранения отходов недостаточно для детального моделирования поверхностного переноса. Этот факт является отражением реальной ситуации. Поэтому исходные данные в большей части были получены расчетно-аналитическим методом.

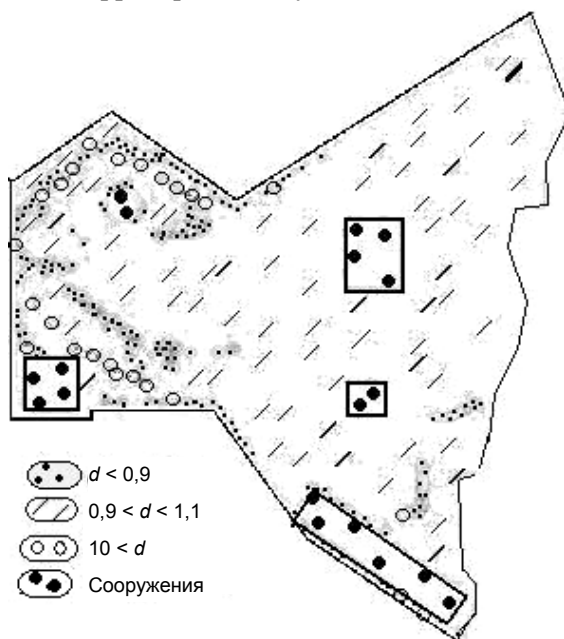
Анализ показал:

топография участка временного хранения отходов, прилегающей к нему городской территории и отсутствие специальной дренажной системы не исключают вы-

ход ливневых вод за пределы участка. Поверхностное загрязнение вне территории участка может составить при неблагоприятных метеорологических условиях десятки $\text{кБк}/\text{м}^2$;

перераспределение поверхностного загрязнения внутри территории участка может быть заметным (до 100 м^2 поверхности может быть загрязнено в 2 раза больше после ливня, рис. 5);

дополнительные дозовые нагрузки на критические группы населения не превышают 13% предела годовой дозы. Однако само по себе повышение уровня радиационного фона может действовать как психологический фактор, беспокоящий население.



Р и с. 5. Перераспределение радионуклидов на территории участка временного хранения отходов для сценария I — сырая почва, сильный дождь, соотношение между полученным и исходным загрязнением ^{137}Cs (d)

В то же время проводимая в настоящее время реабилитация территории участка (вывоз содержимого хранилищ и загрязненного грунта) может значительно улучшить радиационную обстановку. Для полной оценки влияния радиационного загрязнения на прилегающую территорию исследования целесообразно дополнить данными о миграции радионуклидов в грунтовых водах. Особенно это важно с учетом возможной деградации временных хранилищ. Именно такие комплексные исследования должны служить основой проводимой реабилитации участка временно-го хранения отходов.

Авторы выражают благодарность Н.Н. Пономареву-Степному за инициирование проекта, Ф. Паркеру за участие в формулировании целей проекта и обсуждение его результатов, Е.П. Рязанцеву за его вклад на этапе становления проекта, Р.С. Чураеву за подготовку цифровых ГИС-материалов, В.М. Кутепову за помощь в подготовке исходных геофизических данных, компьютерной службе ИАЭА за техническую поддержку и К.П. Новиковой за помощь при составлении отчетов по проекту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ryazantsev E., Kolyadin V., Bylkin B. e.a.** On the Problems of Safety of Nuclear Installations in Big Cities: Preprint RRC-KI 6184/7, 2000.
2. **Spatial** Redistribution of Radionuclides within Catchments: Development of GIS-Based Models for Decision Support Systems. Spartacus Project. Final Report Utrecht University, 2000.
3. **Ponomarev-Stepnoy N., Volkov V., Khukharkin N. e.a.** Rehabilitation of radioactively contaminated objects at the territory of RRC KI. — In: Proc. of 28th Intern. Symp. on Radwaste Management WM'02. Tucson, Arizona, USA, February 24—28, 2002, p. 68—79.
4. **Conversion** Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation. ICRP Publication 74. Ann ICRP 26 (3/4). Oxford: Pergamon Press, 1996.
5. **International** Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series № 115. Vienna: IAEA, 1996.
6. **Руководство** по установлению допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферу ДВ-98. Т. 1. Обязательная часть. М., Госкомэкология России, Минатом РФ, 1999.
7. **Nickholson K.** A review of particle resuspension. — Atmos. Environ., 1988, v. 22, p. 2639—2651.

Поступила в Редакцию 5.11.04