

Е. К. Гаргер

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, Киев, 03028, Украина

СКОРОСТЬ СУХОГО ОСАЖДЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ЧЕРНОБЫЛЬСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ

В настоящем обзоре кратко рассмотрены данные полевых экспериментальных измерений скорости сухого осаждения v_d , оценки наблюдений v_d в период Чернобыльской аварии на различных удалениях от ЧАЭС, методы прогноза формирования гамма-полей загрязнения в мезо- и региональном масштабах при использовании различных значений v_d , рекомендаций значений скорости сухого осаждения для расчета осаждения радиоактивных аэрозолей. По данным экспериментальных измерений, проведенных в полевых диффузионных опытах, показано, что диапазон изменения скорости сухого осаждения аэрозольных частиц составлял более трех порядков величины. Авария на ЧАЭС характеризовалась выбросами радиоактивных веществ, состоящих из частиц диспергированного топлива, инертных газов и легколетучих нуклидов йода, цезия, теллура. Особенностью этой аварии были выбросы широкого спектра частиц по размерам с различными физико-химическими свойствами, загрязнивших огромные территории в течение большого периода времени при различных метеоусловиях, что резко осложнило получение оценок v_d , особенно в ближней сильно загрязненной зоне в острой фазе аварии. Из данных анализа следует, что неопределенность оценок величин скорости сухого осаждения велика и во многом зависит от учета характера аварийных выбросов, удаления точек наблюдений от источника выбросов, нестационарности метеорологических и ландшафтно-геохимических условий.

Ключевые слова: радиоактивный аэрозоль, спектр частиц по размерам, скорость осаждения.

Введение

Радиационные аварии с выбросом радиоактивных веществ в атмосферу, вторичный ветровой или техногенный подъем, перенос и осаждение радиоактивной пыли являются основными источниками радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности земли. Особенностью радиационных аварий является выброс широкого спектра частиц по размерам с различными физико-химическими свойствами. Например, авария на ЧАЭС характеризовалась большой длительностью выбросов радиоактивных веществ, состоящих из частиц диспергированного топлива, инертных газов и легколетучих нуклидов йода, цезия, теллура, загрязнивших огромные территории при различных метеоусловиях Чернобыля [Израэль, 1990; Израэль, Петров, Северов, 1987; Боровой, 2000]. Исследование последствий Чернобыльской аварии продолжают, так как их результаты уникальны и их учет необходим для работ по радиационной и радиозоологической безопасности.

Настоящая работа посвящена анализу накопленных после Чернобыльской аварии экспериментальных данных оценок скорости сухого осаждения v_d и их методов расчета. Данные анализируются для превентивных оценок радиационной безопасности при подготовке документов «Оценки воздействия на окружающую среду» (ОВОС) новых строящихся блоков АЭС или для продления сроков эксплуатирующихся АЭС. Выбор v_d при моделировании острой фазы аварии, а также фазы ее стабилизации необходим для корректного учета возможной радиационной обстановки, так как скорость сухого осаждения в основном определяет величины загрязнения радионуклидами поверхности земли. Ниже кратко рассмотрены теоретические основы расчета v_d , экспериментальные данные измерений и оперативных наблюдений скорости сухого осаждения в условиях острой фазы аварии на различных удалениях от ЧАЭС, в фазе стабилизации аварии, использования v_d в расчетах формирования гамма-полей загрязнения мезо- и региональной моделями переноса и рассеяния вещества.

Определение скорости сухого осаждения

В работе [Gregory, 1950] экспериментально установлено, что скорость осаждения на поверхность земли малых частиц может быть больше, чем скорость их гравитационного оседания. Анализируя выпадение спор в 1945 г., Грегори пришел к выводу, что скорость их осаждения пропорциональна приземной концентрации.

© Е. К. Гаргер, 2018

Согласно [Chamberlain, 1959] поток радиоактивного аэрозоля на поверхность земли p (Бк/м²с) равен

$$p = v_d \cdot q(x, y, 0), \quad (1)$$

где $q(x, y, 0)$ – средняя объемная активность, Бк/м³.

В рамках полуэмпирической теории турбулентной диффузии граничное условие распространения примеси было введено Монином и Колдером [Монин, 1962; Colder, 1961] в виде

$$K_z \frac{\partial q}{\partial z} + w_g q = v_d q \quad \text{при } z = z_0, \quad (2)$$

где K_z – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с; w_g – скорость гравитационного оседания, м/с; v_d – скорость осаждения, м/с, которая интегрально учитывает взаимодействие радиоактивных частиц аэрозоля с подстилающей поверхностью. Из уравнения (2) следует, что поток вещества на подстилающую поверхность состоит из турбулентного и гравитационного потоков. При полном поглощении частиц поверхностью $v_d = \infty$, при полном отражении $v_d = 0$. В случае частичного поглощения величина v_d зависит от характера примеси, подстилающей поверхности, скорости ветра, сил адгезии. Для очень тяжелых частиц вертикальный поток аэрозольной примеси полностью определяется гравитационной скоростью, т.е. $v_d = w_g$. В предельном случае для невесомой примеси в работе [Colder, 1961] было положено, что скорость сухого осаждения определяется формулой $v_d = bu_*$ с учетом турбулентной и молекулярной диффузий, а также сил адгезии, где u_* – скорость трения, а безразмерный коэффициент b определяется экспериментально. В промежуточной зоне значений v_d предполагается, что v_d равна сумме двух независимых частей: гравитационной скорости w_g и скорости осаждения v_d :

$$v_d = bu_* + w_g. \quad (3)$$

На практике в случае аварии, когда остро необходима оценка плотности выпадения радионуклидов на большой территории, скорость осаждения считается постоянной величиной для конкретного ландшафта и нередко даже для всей загрязненной территории. При этом за время действия источника T осадок P (Бк/м²) линейно зависит от величины скорости сухого осаждения и равен

$$P(x, y) = \int_0^T p(z, y, z, t) dt = v_d \int_0^T q(x, y, z, t) dt. \quad (4)$$

Это дает возможность определять v_d из измерений осадка P и средней объемной концентрации радиоактивности проб аэрозоля за период T для данной квазиоднородной территории, не прибегая к измерениям более сложной исследовательской техникой. В оперативных условиях обычно оценки скорости сухого осаждения проводятся по данным измерений объемной концентрации на уровне дыхания человека (1,5 м) и плотности осадка радиоактивных веществ на горизонтальный планшет на высоте 1,0 м в течение времени T , что позволяет оценить v_d в нескольких точках пространства и за различные интервалы времени. Обычно интервалы времени накопления примеси могут быть слишком велики по сравнению с временной изменчивостью метеоусловий, что может вносить трудности в интерпретацию и неопределенность оценок v_d . На практике необходимо учитывать осаждения частиц аэрозоля широкого диапазона по размерам, включая микронные и субмикронные. В условиях радиационной аварии следует учитывать полидисперсность выброшенного радиоактивного аэрозоля. Следовательно, в действительности скорость v_d в оперативных измерениях равна

$$v_d(t) = \sum_i v(d_i, t) q_i / \sum q_i, \quad (5)$$

где v_d – средневзвешенная скорость сухого осаждения за время наблюдения t i -фракции радиоактивных частиц аэрозоля.

Данные полевых экспериментальных измерений v_d до чернобыльского периода

Одни из первых измерений скорости сухого осаждения ¹³¹I в полевых условиях и аэродинамической трубе приведены в работах [Chamberlain, 1957, Chamberlain and Chadwick, 1966]. Измерения

одновременно включали объемную концентрацию и выпадения аэрозоля на естественные и искусственные листья, траву и фильтровальную бумагу. Для аварии в Уиндскейле Чемберлен рассчитал среднюю скорость осаждения ^{131}I на траву, которая была равна 0,4 см/с. В работе [Chamberlain and Chadwick, 1966] был сделан вывод, что скорость сухого осаждения ^{131}I изменяется больше, чем на порядок величины и сильно зависит от характера подстилающей поверхности.

В работе [Sehmel, 1980] приведены скорости осаждения различных частиц аэрозоля для различных типов подстилающей поверхности и метеоусловий. Из данной обзорной работы выбраны результаты скорости сухого осаждения частиц ряда радионуклидов. В табл. 1 приведены данные v_d и главные определяющие факторы величины скорости сухого осаждения.

Таблица 1. Скорости сухого осаждения для ряда радионуклидов [Sehmel, 1980]

Вещество осаждения	Диаметр частиц, мкм	Скорость трения u_* , м/с	Подстилающая поверхность	Скорость осаждения v_d , см/с	Источник
Плутоний	0,3 MMD		кювета	7,3	Stewart, 1963
	16 – 29 MMD			3,2	
Плутоний	1 – 2 AMAD	0,4	площадь листа	$4 \cdot 10^{-3}$	Cataldo et al., 1976
				$8 \cdot 10^{-3}$	
$\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$	0,5 – 1,7	1	единичный бобовый лист	$2,6 \cdot 10^{-3}$	Craig et al., 1976
				$2,7 \cdot 10^{-2}$	
Pu (смесь)	0,8 – 1,8	1	растительный полог	$3,5 \cdot 10^{-3}$	
				$1,2 \cdot 10^{-2}$	
Полевые опыты					
^{137}Cs			вода	$0,09 \pm 0,06$	Convair, 1960
			почва	$0,04 \pm 0,05$	
			трава	$0,02 - 0,5$	
^{103}Ru			вода	$2,3 \pm 1,0$	
			почва	$0,1 \pm 0,2$	
				$< 0,6 \pm 0,4$	
$^{95}\text{Zr} - ^{95}\text{Nb}$			трава	$0,02 - 0,8$	
			вода	$5,7 \pm 3,4$	
			почва	$2,9 \pm 2,7$	
^{141}Ce			липкая бумага	$1,4 \pm 0,7$	
			липкая бумага	$0,7 \pm 0,6$	
			липкая бумага	$0,7 \pm 1,3$	
Смеси топлива			трава	$0,04 - 0,3$	Megow and Chadwick, 1956

Для частиц, содержащих плутоний, v_d изменяется в пределах четырех порядков величины. Данные экспериментальных измерений йода на траву, пастбища, пшеницу показали, что скорость осаждения молекулярного йода I_2 и метил йода CH_3I по данным работы [Sehmel, 1980] колебалась в пределах величин от 0,02 до 26,0 см/с и от 10^{-4} до 10^{-2} см/с соответственно. Интервал значений скорости сухого осаждения для этих веществ является на один порядок величины меньше, чем интервал скорости сухого осаждения аэрозольных частиц, равный 0,001 – 180 см/с.

В диффузионных экспериментах в приземном слое атмосферы [Simpson, 1961] было оценено истощение струи аэрозоля ZnS с точностью до 97 % при прохождении частиц над полем полыни до расстояний порядка 3200 м. В экспериментах с частицами уранина диаметром 0,7 мкм истощение (обеднение) струи в интервале расстояний между 45 и 91 м достигало 65 % [Sehmel and Hodgson, 1976]. В 6 опытах по распространению газового облака йода его истощение до расстояний порядка 300 – 380 м оценивалось до 0,7 – 3,0 % в зависимости от термической устойчивости, при скорости трения от 0,1 и до 0,6 м/с и скорости сухого осаждения 0,1 – 1,2 см/с [Zimbrick and Voileque, 1969].

В работе [Sehmel, 1980] отмечено, что в заборных устройствах не осаждаются частицы одного размера; полученные данные характеризуют изменение выпадений с расстоянием с подветренной стороны от источника, а не суммарное осаждение на естественные поверхности; минимальная скорость осаждения наблюдается для диаметров частиц диапазона 0,1 – 1,0 мкм, для частиц с диаметрами, большими 1 мкм, скорость осаждения увеличивается благодаря турбулентной диффузии и гравитации.

тационному оседанию. В течение переноса диспергированных веществ происходит процесс сепарации – разделение смеси взвешенных частиц в воздухе и их постепенное осаждение. В первую очередь оседают крупные частицы под действием силы тяжести. Вследствие этого величины сухого осаждения на расстоянии 10 – 30 км от источника могут формироваться в значительной мере грубодисперсным аэрозолем с аэродинамическим диаметром $d \geq 10 - 20$ мкм в зависимости от эффективной высоты источника, термической устойчивости и турбулентного перемешивания.

Данные измерений скорости сухого осаждения в острой фазе аварии на ЧАЭС

В отличие от экспериментальных измерений данные оперативных наблюдений скорости сухого осаждения в период острой фазы аварии на различных удаленностях от ЧАЭС, представленные в табл. 2, получены согласно формуле (1) по данным измерений объемной активности на высоте 1,5 м и плотности выпадений на планшет на высоте 1 м в различные дни мая 1986 г. Данные v_d приведены по измерениям в Украине [Израэль и др., 1990; Лось и др., 1991; Ткаченко, 1990], Беларуси [Израэль и др., 1990], Германии [Rosner, Hotzl and Winkler, 1990; Horn, Bonka and Maque, 1987], Гренландии [Davidson et al., 1986], Великобритании [Clark and Smith, 1988], Нидерландах [Lieuwe, 1986] и Японии [Aoyama and Hirose, 1991]. Наиболее полные данные получены по ^{131}I и ^{137}Cs . Оценки в Киеве по данным ВНЦ радиационной медицины в период 1 – 10 мая колебались от 0,8 и до 4,8 см/с. По данным [Ткаченко, 1990] скорость сухого осаждения 2–11 мая 1986 г в Киеве и ближайших к нему населенных пунктах для ^{131}I в среднем была равна $1,5 \pm 0,6$ см/с. Для ^{137}Cs , ^{103}Ru , ^{95}Zr в [Ткаченко, 1990] представлены данные в первые 40 – 50 сут после аварии: $(11,3 \pm 4,5)$ см/с, $(20,2 \pm 8,1)$ см/с и $(12,3 \pm 4,9)$ см/с соответственно; в период последующих 100 сут $(1,3 \pm 0,5)$ см/с, $(1,0 \pm 0,4)$ см/с и $(0,8 \pm 0,3)$ см/с соответственно. Отсюда видно, что, несмотря на большой разброс данных, близость к источнику выбросов полидисперсного аэрозоля определила величины больших значений плотности выпадений радиоактивности на подстилающую поверхность. Подтверждением этому служит работа [Петряев и др., 1993], где проведено детальное исследование суммарной гамма- и бета-активности ^{144}Ce , ^{104}Ru , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr , Pu и «горячих» частиц, связанных с размерами фракций < 100 мкм в реперных точках ландшафтно-геохимических полигонов, расположенных на расстояниях 40 – 250 км от ЧАЭС.

Таблица 2. Скорость сухого осаждения радионуклидов в период острой фазы на ЧАЭС, 1986 г.

Расстояние от ЧАЭС, источник данных	Дата	Скорость сухого осаждения v_d , см/с				
		^{131}I	^{137}Cs	$^{103,106}\text{Ru}$	$^{144,141}\text{Ce}$	^{95}Zr
Одесса (620 км), [Отчет НПО «Тайфун», 1987]	28.04.1986		1,04			
	29.04.1986		0,12			
	30.04.1986		0,15			
Вильнюс (630 км), [Отчет НПО «Тайфун», 1987]	28.04.1986	0,6	0,06			
	01.05.1986	14	0,15			
	06.05.1986	15,4	3,9			
	09.05.1986	3,3	0,17			
Ленинград (1140 км), [Отчет НПО «Тайфун», 1987]	28.04.1986	0,4	0,14			
Рига (920 км), [Отчет НПО «Тайфун», 1987]	29.04.1986	1,7	0,36			
	04.05.1986	3,5				
	09.05.1986	12	6,9			
Киев (93 км), [Лось и др., 1991]	01–10.05.1986	0,8–4,8				
Киев (93 км), [Ткаченко, 1990]	02–11.05.1986	$1,5 \pm 0,6$				
	40–50 сут после аварии		$11,3 \pm 0,5$	$20,2 \pm 8,1$	$5,6 \pm 0,6$	$12,3 \pm 4,9$
	100 сут после аварии		$1,3 \pm 0,5$	$1,0 \pm 0,4$		$0,8 \pm 0,3$
Барышевка, Киевская область (140 км), [Израэль и др., 1987]	май 1986	4,7	0,6	1,5	1,3	1,8
Минск (440 км), [Израэль и др., 1987]	май 1986	0,8	0,4	1,6	0,6	0,6

Продолжение табл. 2

Расстояние от ЧАЭС, источник данных	Дата	Скорость сухого осаждения v_d , см/с				
		^{131}I	^{137}Cs	$^{103,106}\text{Ru}$	$^{144,141}\text{Ce}$	^{95}Zr
Мюнхен (1300 км), [Rosner, Hotzl and Winkler, 1990]	03–06.05.1986	0,13±0,06	0,27±0,11	0,10±0,02		
Аахен, Германия (1900 км), [Horn, Bonka and Maque, 1987]	03–04.05.1986	0,15	0,03–0,15			
Гренландия (4700 км), [Davidson et al., 1987]	май 1986		0,05–0,10			
Великобритания (2400 км), [Clark and Smith, 1988]	первые 5 сут после аварии	0,3	0,05			

При оценке распространенности радиоактивных частиц на поверхности почвы исследуемых контрольных участков определяли количество частиц в приповерхностном слое толщиной 1 см. Полученные результаты свидетельствуют о том, что «горячими» частицами загрязнена практически вся исследуемая территория. Для расстояния от 40 до 250 км от ЧАЭС счетная концентрация «горячих» частиц меняется от 10^5 до 10^3 /м².

Для дальних расстояний, порядка нескольких тысяч километров, в табл. 2 представлены данные о скорости сухого осаждения 3, 4, 6 мая 1986 г. в Баварии (Германия) [Rosner, Hotzl and Winkler, 1990]. Для г. Аахен (Германия) [Horn, Bonka and Maque, 1987] приведены результаты измерений v_d ^{137}Cs и ^{131}I 3 и 4 мая 1986 г. над травой с помощью шестикаскадного импактора Sierra-236 в течение 12 ч и коллекторов выпадений. Это дало возможность оценить медианный аэродинамический диаметр частиц по активности, который был близок по величине 1 мкм. Интервал величин для ^{137}Cs составил 0,03 – 0,15 см/с при средней величине 0,07 см/с. Для ^{131}I средняя скорость сухого осаждения была равна 0,15 см/с. Скорость осаждения уменьшалась днем и росла ночью. Отметим также, что по измерениям влажных и сухих выпадений в Великобритании после Чернобыльской аварии было показано [Clark and Smith, 1988], что загрязнение травы ^{131}I имеет суточный ход, а именно увеличение загрязнения ночью и уменьшение после восхода солнца, что может быть объяснено абсорбцией и десорбцией йода, обусловленных процессами выпадения росы и испарением. В течение первых трех суток измерений количество частиц йода от общего его количества (газообразного и аэрозольного) составляло от 25 до 35 %. Для первых пяти суток скорости сухого осаждения ^{131}I и ^{137}Cs были равны $3 \cdot 10^{-1}$ см/с и $5 \cdot 10^{-2}$ см/с соответственно. По измерениям с помощью шестикаскадного импактора Sierra-236 размер частиц йода был несколько ниже 1 мкм. В работе [Clark and Smith, 1988] плотности осаждения на траву измерялись в течение 3 - 6 мая 1986 г. Для сухих районов отношение $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ с учетом суммы частиц и паров ^{131}I было в среднем по территории равно 18. Для территории, где наблюдались слабые дожди, это отношение составило 3,8. Для увлажненных территорий оно было равно 1,8.

Измерения величин скорости сухого осаждения на расстоянии порядка 8000 км были проведены в Японии [Aoyama and Hirose, 1991]. Дополнительно к обычным средствам измерений использовался пятикаскадный импактор с расходом 600 л/мин и семикаскадный импактор Андерсен с расходом 16 л/мин для определения распределений активности по размерам частиц аэрозоля для аэродинамических диаметров 0,35; 0,54; 0,88; 1,55; 2,7; 5,1; 10 и 20 мкм. В табл. 3 представлены данные только за периодов наблюдений в мае.

Таблица 3. Скорость сухого осаждения [Aoyama and Hirose, 1991]

Период	Скорость сухого осаждения v_d , см/с					
	^{131}I	^{137}Cs	^{134}Cs	^{103}Re	^{90}Sr	Pu
07 – 11.05.1986	0,023	0,038	0,042	0,035	0,15	0,36
12 – 14.05.1986	0,095	0,46	0,51	0,28	0,60	2,00
17 – 19.05.1986	–	0,58	0,37	0,34	0,14	0,98
22 – 29.05.1986	0,033	0,077	0,052	0,046	0,12	0,23

Авторы отмечают, что зафиксированы две группы данных измерений: за периоды 7–11 мая, 22–29 мая и за период 12–19 мая. Величина v_d во второй группе наблюдений за 12–19 мая выше, чем в первой практически на порядок величины. По-видимому, это связано с различными выбросами радиоактивных веществ в течение мая 1986 г. Следует также отметить, что полученная авторами зави-

симось скорости сухого осаждения от аэродинамического диаметра для этих двух групп также отличались почти на порядок величины. При этом данные группы меньших величин v_d в интервале от 1,5 до 10 мкм лучше совпали со скоростями гравитационного оседания.

В целом расчет корреляции величин скорости сухого выпадения с удалением от ЧАЭС по данным табл. 2 показал, что коэффициенты корреляции для ^{131}I и ^{137}Cs соответственно равны 0,59 и 0,64. При этом следует учесть, что большая продолжительность нестационарного действия источника выбросов, изменчивость направления переноса газов и частиц, а также различные периоды наблюдений не могли не сказаться на величине связи представленных данных.

Данных наблюдений скорости сухого осаждения радиоактивного аэрозоля в фазе стабилизации аварии на ЧАЭС

В табл. 4 приведены измерения скорости сухого осаждения в сентябре 1986 г. после окончания острой фазы Чернобыльской аварии в пунктах наблюдения НПО «Тайфун», охвативших южную и юго-западную части 30-км зоны, а также в г. Припять в районе пляжа, отведенного под строительство шестого микрорайона города [Гаргер, 2008]. Из данных измерений видно, что в течение трех суток значения v_d для ^{137}Cs менялись от 0,02 до 0,5 см/с, аналогично изменчивость по пространству для остальных радионуклидов была в пределах одного порядка. Максимальные абсолютные значения v_d отмечались в пунктах Припять, Копачи, Лелев, Заполье, где в это время наблюдалось повышенное движение транспорта или различного рода техногенная деятельность.

Таблица 4. Скорость сухого осаждения радионуклидов в южной части 30-км зоны ЧАЭС в фазе стабилизации. Данные за 11 – 14.09.1986 г. [Гаргер, 2008]

Пункт	Расстояние от ЧАЭС, км	Скорость сухого осаждения v_d , см/с						
		^{144}Ce	^{141}Ce	^{103}Ru	^{106}Ru	^{137}Cs	^{134}Cs	^{95}Zr
Корогод	14	0,03	–	0,015	–	0,02	0,03	0,02
Заполье	14	0,10	0,23	0,06	0,03	0,15	0,10	0,13
Залесье	16	0,04	0,04	–	0,01	0,07	0,06	0,42
Копачи	4	0,26	0,24	0,26	0,30	0,15	0,14	0,11
Лелев	10	0,16	0,23	0,16	0,42	0,19	0,15	0,17
Припять	4	0,28	0,27	0,17	0,29	0,50	0,13	0,20
Ямполь	21	0,13	0,14	0,16	0,04	0,08	0,04	0,17

В табл. 5 представлены данные скорости сухого осаждения ^{137}Cs в г. Припять за 1990 – 1991 гг. и в г. Киев за 1991 г. В г. Припять сохранялись значительные величины сухого осаждения в связи с техногенной деятельностью в 30-км зоне и с дезактивацией ряда районов города.

Таблица 5. Среднемесячная скорость сухого осаждения радионуклидов [Гаргер, 2008]

Пункт	Период	Скорость сухого осаждения v_d , см/с
Припять	сентябрь 1990 г.	3,3
Припять	сентябрь 1991 г.	2,9
Киев (центр)	декабрь 1991 г.	0,5
Киев (Багринова гора)	декабрь 1991 г.	0,24

В период физического моделирования радиоактивного загрязнения окружающей среды различными видами сельскохозяйственных работ (боронование, вспашка, автомобильное движения на непокрытых дорогах) за счет подъема радиоактивной пыли были проведены измерения сухого осаждения вблизи с. Заполье в 30-км зоне ЧАЭС [Гаргер, 2008]. Величины потока осаждения аэрозолей в течение естественного ветрового подъема были равны 1,9 – 2,3 мкБк/(м²·с). Средняя скорость осаждения по 13 экспериментам в период техногенного подъема с 11 по 25 мая 1993 г. была равна (2,6 ± 1,6) см/с. По данным измерений многокаскадным импактором средние аэродинамические диаметры частиц находились в интервале 5,5 – 8,7 мкм со средним значением 7,1 мкм. Данные измерений скорости трения u_* были в интервале 30 – 60 см/с. С использованием формулы (3) полученные оценки b находились в интервале 0,04 – 0,07. При оценках возможной объемной активности при техногенном подъеме в приземном слое атмосферы при умеренной скорости ветра и близких к ней-

тральным условиях частицы диапазона 5 – 9 мкм осаждаются в основном за счет гравитационного оседания.

Методы расчета скорости сухого осаждения

В настоящее время существует несколько методов оценок v_d . Эмпирическая формула (3) удобна на практике, но значение коэффициента b известно достаточно надежно по данным экспериментальных работ [Бызова, 1974] только в интервале размеров частиц, больших 20 мкм, когда величина $b \leq 0,01$. В интервале размеров частиц, меньших 20 мкм, но больших 1 мкм, эмпирических оценок b еще недостаточно. На осаждение частиц с размерами от 0,1 до 1,0 мкм влияние гравитационной скорости оседания пренебрежимо мало и зависит согласно [Chamberlain and Chadwick, 1966] от процессов броуновской диффузии, соударения, перехвата и отскока частиц. Примеры параметризации этих процессов можно найти в работах [Chamberlain and Chadwick, 1966; Slinn and Slinn, 1980]. В качестве примера кратко рассмотрим работу работе [Zhang, Cong, Padro and Barrie, 2001], где при моделировании сухого осаждения частиц используется параметризация для всех процессов осаждения без учета роста размеров частиц при высокой влажности согласно работе [Slinn and Slinn, 1980]. Следуя [Slinn and Slinn, 1980], скорость сухого осаждения v_d можно выразить как

$$v_d = w_g + (1 / (R_a + R_s)), \quad (6)$$

где w_g – скорость гравитационного оседания; R_a – аэродинамическое сопротивление над пологом растительности; R_s – сопротивление подстилающей поверхности земли.

Гравитационное оседание вычисляется как

$$w_g = (\rho d_p^2 g C) / 18 \eta, \quad (7)$$

где ρ – плотность частицы; d_p – ее диаметр; g – скорость гравитационного ускорения; C – поправочный множитель; η – коэффициент вязкости воздуха. Поправочный множитель вычисляется как

$$C = 1 + \left[2\lambda (1,257 + 0,4 e^{-0,55 d_p / \lambda}) / d_p \right], \quad (8)$$

где λ – средняя доля свободных молекул, вычисляемая как функция температуры, давления и кинематической вязкости воздуха.

Аэродинамическое сопротивление вычисляется по формуле

$$R_a = [\ln(z_R / z_0) - \psi_H] / \kappa u_* , \quad (9)$$

где z_R – высота, на которой оценивается скорость сухого осаждения v_d ; z_0 – параметр шероховатости; ψ_H – функция термической устойчивости; κ – константа Кармана; u_* – скорость трения.

В случае высокой растительности следует использовать формулу

$$R_a = [\ln(z_{ref} - d / z_0) - \psi_H] / \kappa u_* , \quad (10)$$

где z_{ref} – высота полога растительности; d – высота вытеснения.

R_s зависит от эффективности поглощения частиц на поверхности и определяется различными процессами осаждения, размерами осаждающихся частиц, свойствами поверхности и атмосферными условиями. Здесь R_s представлено как

$$R_s = 1 / [\varepsilon_0 u_* (E_B + E_{IM} + E_{IN}) R_I], \quad (11)$$

где E_B , E_{IM} , E_{IN} – эффективности накопления на поверхности частиц за счет броуновской диффузии, импакции и перехвата соответственно; R_I – корректирующий коэффициент, отражающий долю частиц, удержанных поверхностью; ε_0 – эмпирическая константа, равная 3, см. Приложение (категории природопользования (Land use categories – LUC)), где приведены формулы расчета R_s и сведения о категориях природопользования, параметрах сезонных категорий (SC) и константы аэрозольных моделей для различных типов подстилающей поверхности согласно работе [Zhang, Cong, Padro and Barrie, 2001].

Использование v_d для прогностических оценок загрязненных территорий в период острой фазы Чернобыльской аварии

В период Чернобыльской аварии одной из важнейших первоочередных задач была оценка масштаба загрязненной территории. Учитывая продолжительность выброса радиоактивных материалов в окружающую среду, сделать это в сжатые сроки было возможно с помощью математического моделирования. Для этого потребовалось большое количество данных об источнике выбросов, метеоусловиях, оценки скорости сухого осаждения с учетом изменения характера радиоактивных веществ и подстилающей поверхности с удалением от источника выбросов. В работах [Чернобыль под ред. Израэль, 1990; Боровой, 2000] отмечено, что в процессе выброса в атмосферу поступали радиоактивные аэрозоли с различными физическими характеристиками. Процесс образования дисперсного состава аэрозолей носил сложный характер, связанный с выносом «горячих» частиц, коагуляцией, конденсацией, а радиационный состав аэрозоля определялся накопленными в ТВЭЛ продуктами деления, а также фракционированием радионуклидов при выносе в атмосферу и формированием самих аэрозольных частиц. В ближней зоне (порядка 10 – 30 км) высокая плотность загрязнения подстилающей поверхности в основном была обусловлена топливными частицами, что подтверждается данными работ [Бобовникова и др., 1991; Савенков и др. 2009; Петряев и др., 1993]. В работах [Израэль, Петров, Северов, 1987 и 1989] с учетом периода и мощности выброса из аварийного блока отмечены пространственные масштабы выпадений порядка 10 км (локальные выпадения), порядка сотен километров (мезомасштабные выпадения) и тысячи километров (региональные выпадения). В работе [Израэль, Петров, Северов, 1987] приведены карты распределения уровней радиации на ближнем следе от ЧАЭС на 29 мая 1986 г., полученные с учетом расчетов по модели для ближней зоны с параметрами распределения по логнормальному закону гамма-активных частиц с медианным диаметром 50 мкм и стандартным отклонением 0,25. При этом учтены характеристики источника выброса радиоактивности и метеоусловий. Скорости осаждения частиц рассчитывались с помощью аппроксимации зависимостей для $d \geq 44$ мкм v_d порядка 15 – 20 см/с; для $d < 44$ мкм v_d порядка 5 – 10 см/с. Данные расчета практически совпали с экспериментальными измерениями.

Результаты модельных вычислений с помощью региональной модели [Израэль, Петров, Северов, 1987 и 1989] и их сравнение с данными измерений уровней радиации использовались для оценок параметров логнормального распределения активности по размерам частиц. Для территорий, примыкающих к зоне ЧАЭС с масштабом порядка 100 км, параметры логнормального распределения составили $d = 20$ мкм, $\sigma = 0,4$ мкм. Для регионального масштаба при высоте слоя перемешивания 2 км расчет параметров логнормального распределения дал результат: $d = 5$ мкм, $\sigma = 0,25$ мкм и $v_d = 0,2$ см/с. В статье [Borzilov and Klepikova, 1993], посвященной влиянию метеорологических условий и композиции радиоактивных аэрозолей, газов в выбросах Чернобыльской аварии на осаждение радионуклидов, также была учтена трансформация характеристик выброса с расстоянием. Авторы использовали две диффузионные модели: модель «Мезо» для описания переноса и осаждения ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{139+140}\text{Pu}$ до 200 км от источника выброса и модель «Регион» для описания выпадений ^{131}I , ^{137}Cs и ^{90}Sr для расстояний, превышающих 200 км. При этом считалось, что плутоний переносился в основном в топливных частицах, имеющих в среднем скорость седиментации около 10 см/с; стронций также переносился в основном в топливных частицах того же размера. Цезий выбрасывался в атмосферу в виде грубодисперсных частиц со скоростями седиментации от 5 и до 10 см/с, а также в газообразной форме и затем конденсировался в виде тонкодисперсного аэрозоля со скоростями осаждения от 0,5 до 1 см/с.

В работе [Mück et al., 2002] выполнено детальное сравнение данных радионуклидного состава топлива четвертого аварийного блока и данных измерений воздушных фильтров и плотности выпадений. Соотношения различных радионуклидов с изотопом ^{137}Cs изменялись как с направлением выброса, так и с увеличением расстояния от ЧАЭС. Большие расхождения соотношений радионуклидов, определенных в Украине, России, с теми, что были измерены в Центральной и Северной Европе объясняются тем, что отношения ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{140}Ba и ^{144}Ce к ^{137}Cs вблизи реактора оказались гораздо более высокими, чем на расстоянии 1000 км. Они были связаны в среднем с размерами частиц 8 мкм и осаждаются быстрее, чем летучие формы (йод, цезий, теллур), которые прикреплялись к аэрозольным частицам окружающего аэрозоля с размерами частиц порядка 1 мкм. Анализ данных позволил получить физико-химические характеристики радионуклидов, представленные в табл. 6.

Таблица 6. Физико-химические характеристики радионуклидов [Mück et al., 2002]

Радионуклид	Период полураспада	Медиана, мкм	Скорость сухого осаждения v_d , см/с
^{90}Sr	28,5 y	5	1,0
^{95}Zr	64,0 d	8	2,0
^{95}Nb	35,15 d	8	2,0
^{103}Ru	39,35 d	1	0,1
^{106}Ru	368 d	1	0,1
^{131}I	8,02 d	1	0,2
^{134}Cs	2,06 y	1	0,1
^{137}Cs	30,1 y	1	0,1
^{141}Ce	32,51d	8	2,0
^{144}Ce	284,8 d	8	2,0
^{239}Pu	$2,4 \cdot 10^4$ y	16	15,0

В табл. 7 приводится список организаций, вместе с главным исследователем, значениями v_d для ^{131}I , ^{137}Cs и номером модели. Величины скоростей осаждения для ^{131}I и ^{137}Cs , использованные в оценках осаждения над Европой, взяты из отчета проекта ATMES [ATMES Report, 1992]. Были представлены региональные модели из различных учреждений, таких как университеты, центры ядерной безопасности и метеорологические службы из 13 стран. Значения v_d для радиоцезия лежали в интервале от 0,05 до 0,2 см/с. Из 20 моделей 11 выбрали значение скорости осаждения для цезия 0,1 см/с. Из данных табл. 7 видно, что средние значения v_d для радиойода выбирались в пределах двух порядков величины: 0,02 – 2,0 см/с.

Таблица 7. Величины скорости сухого осаждения, используемые в моделях [ATMES Report, 1992]

Страна	Организация	Главный исследователь	Средняя скорость осаждения v_d , см/с		Номер модели
			^{131}I	^{137}Cs	
Канада	Environment Canada	J. Pudykiewicz	0,1	0,1	12
Словакия	Slovak Hydromet. Inst.	S. Skulec	2,0	0,1	22
Финляндия	Finnish Met. Inst.	I. Valkama	0,1	0,1	14
Франция	CEA, IPSN	B. Crabol	0,5	0,1	16
Франция	Meteo. Nationale	F. Bompay	0,1	0,1	7
Франция	EDF	A. Albergel	0,5	0,15	17
Германия	Un. zu Koeln	A. Ebel	0,02	0,1	2
Израиль	Inst. for Biological Res.	D. Kaplan	0,23	0,05	3
Италия	ENEA-PAS	M. Sciortino	0,2	0,15	10
Италия	ENEA-DISP	F. Desiato	0,3	0,1	5
Япония	JAERI	S. Moriuchi	0,3	0,1	8
Япония	Met. Agency	S. Yamada	–	–	11
Япония	Met. Research Inst.	T. Yashikawa	0,1	0,05	9
Нидерланды	KNMI	G. Verver	0,15	0,1	15
ЮАР	Atomic Energy Co.	L. W. Burger	0,3	0,1	21
Великобритания	Met. Office	R. H. Maryon	0,5	0,05	20
США	Savannah River Lab.	M. Pendergast	0,2	0,1	13
США	Lawrence Liv. Lab.	R. Lange	0,3	0,1	4
СССР	MSC-E	M. I. Pekar	0,45	0,15	19
СССР	Inst. for Applied Geoph.	V. N. Petrov	0,2	0,2	18

Обсуждение и выводы

Из приведенных выше данных экспериментальных измерений и наблюдений после Чернобыльской аварии следует, что оперативные оценки v_d крайне изменчивы. Неопределенность оценок v_d обусловлена характером аварийных выбросов, физико-химическими характеристиками частиц, неоднородностью подстилающей поверхности, метеорологическими условиями. Для превентивных расчетов оценки v_d могут быть проведены как с помощью различных современных кодов, в которых рекомендованы величины v_d для трех форм йода и ^{137}Cs , так и с учетом накопленных эксперимен-

тальных данных для различных условий окружающей среды. В табл. 8 приведены величины v_d аэрозольного йода в нескольких кодах по расчету v_d , которые могут отличаться в 8 раз при использовании кодов RODOS – RECASS NT. Разброс между рекомендованными данными газообразных форм ^{131}I несколько меньший, но различие достаточно большое с экспериментальными оценками [Sehmel, 1980] особенно по элементарному йоду. Величины органических соединений йода в приведенных кодах взяты по верхней границе изменчивости измеренных величин этого соединения, т.е. оценки в них достаточно консервативны, учитывая токсичность CH_3I .

Таблица 8. Величина скорости сухого осаждения радионуклидов в кодах

Код	Автор	Скорость сухого осаждения v_d , см/с		
		^{131}I (аэрозоль)	$^{131}\text{I}_2$	CH_3I
MACCS2	[Report Department of Energy Washington, 2009]	0,1 – 0,3		
RODOS	[Müller and Pröhl, 1993]	0,1	0,8	0.01
RIMPUFF	[Baklanov and Sorensen, 2001]	0,1	1,0	0.05
RECASS NT	[Методика РД52.18.717, Обнинск, 2009]	0,8	2,0	0.01

В работе [Baklanov and Sorensen, 2001] приведены характеристики дозообразующих радионуклидов, включая величины скорости сухого осаждения, AMAD, период полураспада, полученные в основном по публикациям, посвященным Чернобыльской аварии. Как можно видеть из табл. 9, различные радионуклиды могут находиться в атмосфере в форме газов или аэрозолей с широким диапазоном размеров. Например, аварийные выбросы АЭС могут иметь размеры частиц в пределах 0,01 – 60 мкм до расстояний в сотни километров от источника. Из таблицы также видно, что скорость сухого осаждения для йода в 6 раз выше, чем цезия при почти тех же AMAD и больших значениях среднеквадратичных отклонений. Типичные скорости сухого осаждения для большинства нуклидов даны для травяной поверхности. Отмечено, что в течение первой недели доминирует газообразная форма (элементарный и органический ^{131}I); скорость осаждения скорректирована (повторно вычислена) для 70 % газообразных форм ^{131}I ; скорость сухого осаждения для частиц ^{131}I приблизительно равна скорости сухого осаждения для SO_4 .

Таблица 9. Физико-химические характеристики дозообразующих радионуклидов [Baklanov and Sorensen, 2001]

Радионуклид	Период полураспада, ч	AMAD, мкм	Скорость сухого осаждения	
			рекомендуемое значение v_d^* , см/с	геометрическое стандартное отклонение, σ_g
^{137}Cs	$2,628 \cdot 10^5$	0,68	0,1	1,8 – 2,5
^{134}Cs	$1,805 \cdot 10^4$	0,59	0,12	2 – 2,5
^{131}I	$1,93 \cdot 10^2$	gas/0,48**	0,6**	3 – 4
^{132}Te	$7,82 \cdot 10^1$	0,81	0,3	1,5 – 2,5
^{133}I	$2,08 \cdot 10^1$	gas/0,6	0,7	
^{140}Ba	$3,048 \cdot 10^2$	0,45	0,9	
^{90}Sr	$2,549 \cdot 10^5$	2,5	2(?)	
^{103}Ru	$9,459 \cdot 10^2$	0,65	0,5	2
^{238}Pu	$7,683 \cdot 10^5$	4,3	2(?)	2,1
^{239}Pu	$2,111 \cdot 10^8$	4,3	2(?)	2 – 2,5
^{89}Sr	$1,212 \cdot 10^0$	2,5	2(?)	

* Типичные v_d для большинства нуклидов даны для травяной поверхности.

** Скорость сухого осаждения i -фракции радиоактивных частиц аэрозоля.

В табл. 10 представлены величины v_d , рекомендованные для использования в работах ECOSYS-87 [Müller and Pröhl, 1993; Baklanov and Sorensen, 2001], с учетом землепользования в системе RODOS [Päsler-Sauer, 2003; Thykier-Nielsen et al., 1999], где даны значения v_d для почвы и максимальные значения скорости сухого осаждения на полностью развитые пологи растительности. При этом предполагается, что максимальные значения распределений частиц по размерам лежат в пределах 0,1 – 1,0 мкм. Различия величины v_d в зависимости от характера подстилающей поверхности могут также достигать одного порядка величины.

Таблица 10. Скорость сухого осаждения ^{131}I на различные поверхности [Müller and Pröhl, 1993]

Поверхность	Скорость сухого осаждения v_d , см/с		
	^{131}I (аэрозоль)	$^{131}\text{I}_2$	CH_3I
Почва	0,05	0,3	0,005
Трава	1,05	0,15	0,015
Деревья	0,5	5	0,05
Другая растительность	0,2	2	0,02

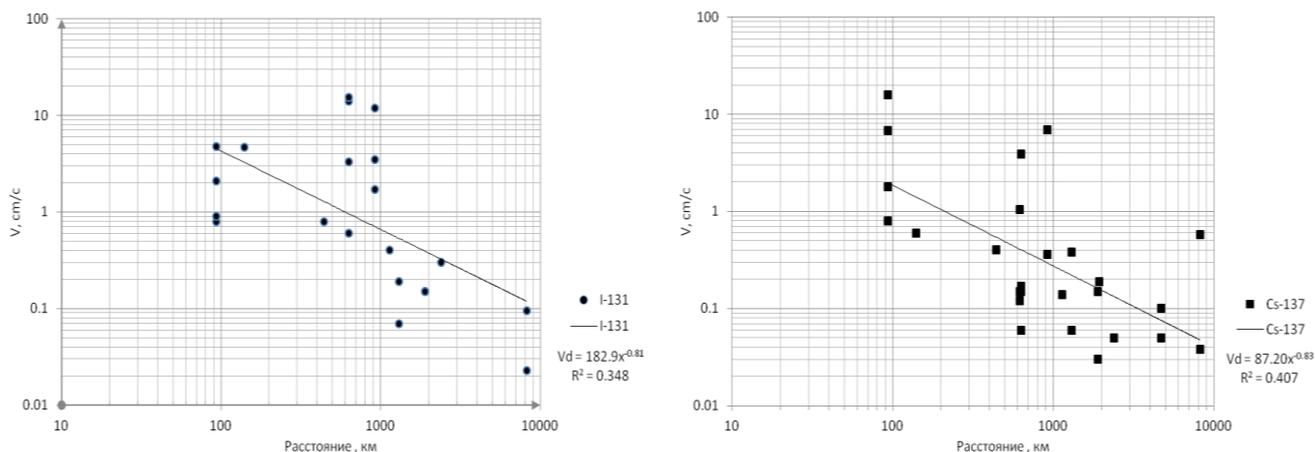
В табл. 11 приведены величины скорости сухого осаждения частиц йода, газообразного йода и его органического соединения для четырех типов подстилающих поверхностей и ^{137}Cs как главных дозобразующих радионуклидов Чернобыльского происхождения. В первой части таблицы представлен ряд данных экспериментальных исследований, а во второй - данные, полученные после Чернобыльской аварии в Западной Европе и Японии, т.е. измерения на большом удалении от ЧАЭС. Из табл. 11 видно, что разброс данных по данным рекомендаций (по кодам, см. табл. 10) по йоду может отличаться на порядок величины от 0,05 до 1,05 см/с в зависимости от подстилающей поверхности, по полевым экспериментальным данным от 0,023 до 0,15 см/с, по данным после аварии на ЧАЭС – 0,2 – 0,4 см/с для пунктов, удаленных до 1000 км и более. Для ^{137}Cs представленные в табл. 11 рекомендованные значения v_d равны величине 0,1 см/с, в то время как по экспериментальным данным интервал значений v_d равен 0,04 – 0,31 см/с и по чернобыльским данным для удаленных пунктов измерений интервал v_d составил 0,03 – 0,58 см/с.

Таблица 11. Скорость сухого осаждения ^{131}I и ^{137}Cs на различные поверхности

Автор	Поверхность	Скорость сухого осаждения v_d , см/с			
		^{131}I (аэрозоль)	$^{131}\text{I}_2$	CH_3I	^{137}Cs
Экспериментальные данные до Чернобыльской аварии					
[Chamberlain, 1959]	трава	0,4			
[Sehmel, 1980]			0,02 – 26	$10^{-4} - 10^{-2}$	
	вода				$0,09 \pm 0,06$
	почва				$0,04 \pm 0,05$
	трава				$0,2 \pm 0,5$
[Slinn and Slinn, 1980]					0,31
[Islitzer, 1962]	попынь (зима)	0,2			
[Hanna et al., 1991]			0,3		0,1
Измерения после Чернобыльской аварии при удалениях на >1000 км					
[Rosner et al., 1990]		0,13	0,03		0,27
[Horn et al., 1987]		0,15			0,03 – 0,15
[Aoyama and Hirose, 1991] 2001		0,023 – 0,095			0,037 – 0,58
[Clark and Smith, 1988]		0,1			0,05
[Davidson et al., 1987]					0,05 – 0,10
[Garland and Cambray, 1988]	трава	0,11– 0 – 0,33			0,44
[Nicholson 1989]	трава				0,04

На рисунке представлены данные табл. 2. Хорошо видно, что если даже убрать точки со значением йода и цезия выше 10 см/с, то рекомендованные значения v_d для этих радионуклидов будут иметь значительно меньшие величины, чем измеренные до расстояний порядка 500 км и более.

Таким образом, в течение переноса диспергированных веществ происходит процесс сепарации смеси взвешенных частиц в воздухе и их постепенное осаждение, что и происходило в период аварии на ЧАЭС. Вследствие этого величины сухого осаждения в пределах 10 – 30 км и более от источника могут формироваться в значительной мере грубодисперсным аэрозолем ($d \geq 10-20$ мкм, где d – аэродинамический диаметр) в зависимости от эффективной высоты источника, термической устойчивости пограничного слоя атмосферы и турбулентного перемешивания. Данные измерений объемной активности и плотности выпадений в период острой фазы аварии на ЧАЭС проводились на различных удалениях от ЧАЭС в различные даты и с различной частотой наблюдений. Это ослож-



Изменение v_d , см/с с расстоянием от ЧАЭС для ^{131}I и ^{137}Cs .

няет обобщение оценок v_d , учитывая изменчивость выброса радиоактивных веществ, нестационарность скорости и направления ветра в течение всего периода выбросов и переноса радионуклидов. Тем не менее данные табл. 2, полученные согласно формуле (1) по измерениям объемной активности в различные дни мая 1986 г., подтверждают вывод о сепарации облака частиц с ростом расстояния от источника и дают оценки скорости сухого осаждения по данным радиационного мониторинга, а результаты работ [Израэль, Петров, Северов, 1989; Borzilov and Klerikova, 1993] подтвердили важность учета данных физико-химического состава выброса, подобного чернобыльскому, для оперативной оценки радиационного загрязнения больших территорий и применения диффузионных моделей мезо- и регионального масштабов. Употребляющиеся в радиационном мониторинге измерения объемной активности на высоте 1,5 м и выпадений на планшет на 1,0 м дают оценку v_d за счет силы тяжести и турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы. Эти измерения на практике ограничиваются, как правило, одним-двумя пунктами наблюдений. Поэтому необходимы расчетные оценки по пространству и во времени. Для этого можно использовать оценки v_d по формуле (5), используя формулы (6) и (7) для каждой фракции радиоактивных частиц аэрозоля. Эти расчеты не учитывают влияние броуновской диффузии в ламинарном подслое и сил адгезии, что важно при оценке загрязнения растительного покрова. Тем не менее они достаточны в первом приближении оценок потока осаждения для оперативных расчетов радиационной безопасности загрязненных территорий. Для превентивных оценок радиационной безопасности при проектировании АЭС следует учитывать все эффекты взаимодействия газоаэрозольного потока с подстилающей поверхностью с учетом ландшафтных особенностей подстилающей поверхности земли и влажного осаждения

Из приведенных выше данных следует, что неопределенность прогнозирования загрязнения подстилающей поверхности земли при радиационных авариях велика и во многом зависит от оценок величин скорости сухого выпадения в условиях различных геофизических ландшафтах и нестационарных погодных условий. Необходимо создать методику расчета v_d , учитывающую все определяющие процессы ее формирования для широкого интервала аэрозольных частиц по размерам, для широкого круга метеорологических и ландшафтно-геохимических условий с учетом характера аварийных выбросов (вида, высоты и продолжительности).

Приложение

Для броуновской диффузии E_B есть функция числа Шмидта Sc :

$$E_B = Sc^{-\gamma}. \tag{12}$$

Число Шмидта Sc – это отношение кинематической вязкости к броуновской диффузии частиц D ($Sc = \nu/D$) обычно лежит между 1/2 и 2/3 при больших значениях для более грубых поверхностей. Например, [Slinn and Slinn, 1980] предложили γ значение 1/2 для водных поверхностей и γ значение 2/3 для растительных поверхностей. В настоящей работе уравнение (12) используется для расчета эффективности оценкой броуновской диффузией со значениями γ , меняющимися по категориям землепользования (см. перечень категорий 1, 2).

Перечень категорий землепользования (LUC):

1. Хвойные деревья.
2. Вечнозеленые широколиственные деревья.
3. Лиственные и хвойные деревья.
4. Лиственные широколиственные деревья.
5. Смешанные широколиственные и хвойные деревья.
6. Трава.
7. Сельскохозяйственные культуры, смешанное сельское хозяйство.
8. Пустыня.
9. Тундра.
10. Кустарники и островки леса.
11. Влажные земли с растениями.
12. Ледяная шапка и ледник.
13. Внутренние воды.
14. Океан.
15. Городская застройка.

Перечень сезонных категорий (SC):

1. Середина лета с пышной растительностью.
2. Осень, земли с собранным урожаем.
3. Поздняя осень после мороза, снега.
4. Зима, снег на земле и замерзание.
5. Переходный весенний период с частично низкой зеленой травой.

Параметром, определяющим процесс осаждения, является число Стокса St , которое имеет вид $St = V_g u_* / gA$ для поверхностей растительности [Slinn, 1982] и $St = V_g u_*^2 / \nu$ для гладких поверхностей или поверхностей с грубыми элементами шероховатости [Giorgi, 198], где A – характеристический радиус коллекторов.

Слин [Slinn, 1980] использовал полуэмпирическую подгонку для гладких поверхностей, для которых эффективность сбора при соударении

$$E_{IM} = 10^{-3/St} . \quad (13)$$

Затем Слин [Slinn, 1982] предложил другую форму для растительных пологих, для которых эффективность сбора аэрозоля путем импакции равна

$$E_{IM} = \frac{St^2}{1 + St^2} . \quad (14)$$

Петерс и Эйден [Peters and Eiden, 1992] используют форму для эффективности импакции над еловым лесом

$$E_{IM} = \left(\frac{St^2}{\alpha + St} \right)^\beta , \quad (15)$$

где α и β – константы. Используя 0,8 для α и 2 для β соответственно, Петерс и Эйден получили наилучшие результаты по данным, собранные Белотом и Готье [Belot and Gauthier, 1976].

Георги [Giorgi, 1986] предложил две формулы эффективности импакции: одну для гладких поверхностей и поверхностей с грубыми элементами шероховатости

$$E_{IM} = \frac{St^2}{400 + St^2} , \quad (16)$$

а другую для растительных поверхностей

$$E_{IM} = \left(\frac{St}{0,6 + St} \right)^{3,2} . \quad (17)$$

Эта формула такая же, как формула, использованная Петерсом и Эйденем [1992], но с использованием различных постоянных α и β .

Дэвидсон, Миллер и Плесков [Davidson, Miller and Pleskow, 1982] применили следующую формулу для пастбищ:

$$E_{IM} = \frac{St^3}{St^3 + 0,753St^2 + 2,796St - 0.202}. \quad (18)$$

В настоящем исследовании уравнение (15) используется α с изменяющимися LUC и β , выбранными равными 2.

Эффективность осаждения путем перехвата частиц также существует, если частица проходит препятствие на расстоянии меньшем, чем его физические размеры. Это особенно важно для крупных частиц над волосатыми листьями.

Фукс [1964] предложил различные формулы E_{IN} для вязкой и потенциальной жидкости над сферой и цилиндром. Все формулы E_{IN} являются функцией диаметра частиц и характеристического «радиуса» коллекторов (препятствий). Слин [Slinn, 1980] параметризует E_{IN} , komponуя малые и большие коллекторы. Георги [Giorgi, 1988] использует тот же подход, который использовал Слин [Slinn, 1980]. Очень сложно получить данные о доле больших и малых препятствий. Поэтому для расчета эффективности осаждения путем перехвата используется простая формула

$$E_{IN} = \frac{1}{2} \left(\frac{d_p}{A} \right)^2, \quad (19)$$

где A – характеристический радиус, дан для различных типов природопользования и сезонов.

Частицы размером более 5 мкм могут отскочить после удара от поверхности. Этот процесс может быть учтен путем изменения общей эффективности осаждения путем коэффициента R_I , который представляет собой долю частиц, прилипших к поверхностям, как это сделано в уравнении (11). Слин [1980] предложил следующую форму для R_I :

$$R_I = \exp(-St^{1/2}). \quad (20)$$

Георги [1988] также использовал эту формулу. Ограниченность знаний об отскоке частиц мешает нам в оценке этой формулы. Таким образом, та же формула используется в настоящем исследовании с условием, что никакие частицы не отскакивают от влажной поверхности.

Частицы могут расти в условиях высокой влажности. Этот эффект учитывается здесь путем замещения радиуса сухой частицы на радиус влажной частицы. Радиус влажной частицы r_w вычисляется с использованием радиуса сухой частицы r_d и относительной влажности [Gerber, 1985] для морских и сульфатных аэрозолей:

$$r_w = \left[\frac{C_s r_d^{c_2}}{C_3 r_d^{c_4} - \log RH} + r_d^3 \right], \quad (21)$$

где C_1, C_2, C_3 и C_4 - эмпирические константы, представленные в таблице.

Константы уравнения (21)

Модель аэрозолей	C_1	C_2	C_3	C_4
Морская соль	0,7674	3,079	$2,573 \cdot 10^{-11}$	-1,424
Город	0,3926	3,101	$4,190 \cdot 10^{-11}$	-1,404
Сельская местность	0,2789	3,115	$5,415 \cdot 10^{-11}$	-1,399
$(NH_4)_2SO_4$	0,4809	3,082	$3,110 \cdot 10^{-11}$	-1,428

В канадской модели аэрозолей CAM [Gong et al., 2000] рост частиц вычисляются скорее для смешанных аэрозолей, чем для индивидуальных частиц. Скорости сухого осаждения частицы могут быть вычислены, используя уравнения (6) - (12), (15) и (19) - (21).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Физико-химические формы радионуклидов в выпадениях после Чернобыльской аварии и их перенос в почву* / Ц. И. Бобовникова и др. // Атомная энергия. – 1991. – Вып.71. – № 5. – С. 449 – 454.
2. *Боровой А. А.* Выброс ядерного топлива и продуктов деления из реактора 4-го блока ЧАЭС при аварии (обзор) / А. А. Боровой. – Чернобыль, 2000. – (Препринт / НАН Украины. МНТЦ «Укрытие»; 00-10).
3. *Бызова Н. Л.* Рассеяние примеси в пограничном слое атмосферы / Н. Л. Бызова. – М. : Гидрометеоздат, 1974. – 191 с.
4. *Бызова Н. Л.* О взаимодействии аэрозоля с подстилающей поверхностью / Н. Л. Бызова, К. П. Махонько // Изв. АН СССР. Сер. физ. атмосферы и океана. – 1968. – Вып. 4, № 9.

5. *Ветровой* перенос радионуклидов в районе аварии Чернобыльской АЭС : (Отчет о НИР) / Руководитель Е. К. Гаргер. – НПО «Тайфун» – Обнинск, 1987. – 156 с.
6. *Гаргер Е. К.* Вторичный подъем радиоактивного аэрозоля в приземном слое атмосферы / Е. К. Гаргер. – Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2008. – 192 с.
7. *Израэль Ю. А.* Моделирование радиоактивных выпадений в ближней зоне от аварии на Чернобыльской атомной электростанции / Ю. А. Израэль, В. Н. Петров, Д. А. Северов // *Метеорология и гидрология.* – 1987. – № 7.
8. *Израэль Ю. А.* Региональная модель переноса и выпадений радионуклидов от аварии на Чернобыльской атомной станции / Ю. А. Израэль, В. Н. Петров, Д. А. Северов // *Метеорология и гидрология.* – 1989. – № 7.
9. *Медицинские* последствия аварии на Чернобыльской атомной электростанции / И. П. Лось и др.; ВНЦ радиационной медицины АМН СССР. – Радиационная обстановка. – Киев, 1991. – С. 9 – 69.
10. *Монин А. С.* О граничном условии на поверхности земли для диффундирующей примеси / А. С. Монин. – М.: Иностран. лит. – 1962. – 477 - 478 с.
11. *РД 52.18.717- 2009.* Методика расчета рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах. – Обнинск, 2009.
12. *Ткаченко Н. В.* Особенности радиоактивного загрязнения растительности и его роль в формировании радиационной обстановки в первые годы после аварии на ЧАЭС : канд. дис. / Н. В. Ткаченко. – Киев, 1990. – 161 с.
13. *Состав* и свойства радиоактивных частиц, обнаруженных в южных районах Беларуси / Е. П. Петряев и др. // *Геохимия.* – 1993. – С. 930 – 939.
14. *Реконструкция* радионуклидного состава выпадений на территории России вследствие аварии на Чернобыльской АЭС / В. А. Питкевич и др. // *Радиация и риск.* – 1993. – Вып. 3. – С. 62 – 93.
15. *Радиогеохимическое* исследование топливосодержащих новообразований, возникших в результате аварии на Чернобыльской АЭС / В. Г. Савенков, Е. Б. Андерсон, Е. А. Смирнова, С. И. Шабалев // *Тр. Радиового ин-та им. Хлопина.* – 2009. – Т. 14. – С. 87 – 117.
16. *Чернобыль* : Радиоактивное загрязнение природных сред ; под ред. Ю. А. Израэля. – Л. : Гидрометеиздат. – 1990. – 296 с.
17. *Aoyama M.* Particle size dependent dry deposition velocity of the Chernobyl Radioactivity / M. Aoyama, H. Katsumi // *Precipitation Scavenging and Atmosphere-Surface Exchange (S. E. Schwartz et al.) : Proc. of the Fifth International Conference (Richland, Washington, 15 – 19 July 1991).* – Hemisphere Publishing, Washington DC. – Vol. 3. – P. 1581 – 1593.
18. *The ATMES Report* : Evaluation of long range atmospheric transport models using environmental radioactivity data from the Chernobyl accident. – 1992. – 366 p.
19. *Baklanov A.* Sorensen parameterisation of radionuclide deposition in atmospheric long-range transport modelling / A. Baklanov and J. H. Sorensen // *Phys. Chem. Earth. (B).* – 2001. – Vol. 26, No. 10. – P. 787 – 799.
20. *Belot Y.* Transport of micronic particles from atmosphere to foliar surfaces / Y. Belot, D. Gauthier // *Heat and Mass Transfer in The Biosphere, Part I (D. A de Vries, N. H. Afgan et al.).* - Wiley. New York. – 1976. – P. 582 – 591.
21. *Borzilov V. A.* Effect of meteorological conditions and release compositions after the Chernobyl accident / V. A. Borzilov, N. V. Klepikova // *Chernobyl papers (St. Mervin and M. Balonov, eds.).* - Richland : Research Enterprises. – 1993. – Vol. I. – P. 47 – 68.
22. *Brant J.* Modelling transport and deposition of ¹³⁷Cs and ¹³¹I from Chernobyl accident using the DREAM model / J. Brant, J. H. Christensen and L. Frohn // *Atmospheric Chemistry and Physics.* – 2002. – Vol. 2. – P. 397 – 417.
23. *Cataldo D. A.* Fate of plutonium intercepted by leaf surface : leachability and translocation to seed and root tissues / D. A. Cataldo, E. L. Klepper and D. K. Craig // *Proc. Transuranium Nuclides in the Environment.* - International Atomic Energy Agency, Vienna. – 1976. – P. 291 – 301.
24. *Chamberlain A. C.* Deposition of iodine-131 in Northern England in October 1957 / A. C. Chamberlain // *Q. J. Roy. Met. Soc.* – 1959. – Vol. 85 – P. 350.
25. *Chamberlain A. C.* Aspects of the deposition of radioactive and other cases and particles / A. C. Chamberlain // *Int. J. Air Poll.; also in Aerodynamic Capture of Particles (E. G. Richardson, ed.).* – Pergamon Press. Inc. N. Y. 6. – 1960. – Vol. 3 (1 – 3). – P. 63 – 88.
26. *Chamberlain A. C.* Transport of iodine from atmospheric to ground / A. C. Chamberlain and R. C. Chadwick // *Tellus.* – 1966. – Vol. XVIII, No. 2. – P. 226 – 236.
27. *Chamberlain A. C.* Transport of lycopodium spores and other particles to rough / A. C. Chamberlain // *P. R. Soc.* – 1967. – Vol. A296. – P. 45 – 70.
28. *Clark M. J.* Wet and dry deposition of Chernobyl releases / M. J. Clark and F. B. Smith // *Nature.* – 1988. – Vol. 332, 17 March. – P. 245 – 249.
29. *Colder K. L.* Atmospheric diffusion of particulate material, considered as a boundary value problem / K. L. Colder // *J. Meteorol.* – 1961. – Vol. 18, No. 3. – P. 413 – 442.
30. *Convair.* Fission Products Field Release. Test I / Convair : Report NARF 59-32T U.S. Air Force Nuclear Aircraft Res. Facility. – 1959.

31. *Convair*. Fission Products Field Release Test II / Convair : Report NARF 60-10T U.S. Air Force Nuclear Aircraft Res. Facility. – 1960.
32. *Craig D. K.* Deposition of various plutonium-compound aerosols onto plant foliage at very low wind velocities / D. K. Craig, B. L. Klepper and R. L. Bushbom // Proc. Atmospheric-Surface Exchange of Particulate and Gaseous Pollutants. 1974 Symp. (Richland, WA, 4–6 September 1974). – Energy Research and Development Administration Symposium Series CONF-740921. National International Services, U. S. Dept. of Commerce, Springfield, VA. – 1976. – P. 244 – 263.
33. *Schell* Radioactive Cesium from the Chernobyl Accident in the Greenland Ice Sheet / J. R. Davidson et al. // Science. – 1987. – Vol. 237. – P. 633 – 634.
34. *Davidson C. I.* The influence of surface structure on prediction to natural grass canopies / C. I. Davidson, J. M. Miller, M. A. Pleskow // Water, Air and Soil Pollution. – 1982. – Vol. 18. – P. 25 – 44.
35. *Fuchs N. A.* The Mechanics of Aerosols / N. A. Fuchs. - Pergamon, New York. - 1964.
36. *Garland J. A.* Deposition, resuspension and long term variation of airborne radioactivity from Chernobyl / J. A. Garland and R. S. Cambray // 4th Int. Symp. On Radioecology 14 - 18 March 1988 Cadarache, France. – 1988.
37. *Garland J. A.* On the size dependence of particle deposition / J. A. Garland // Water, Air, and Soil Pollution : Focus 1. – 2001. – P. 323 – 332.
38. *Gerber H. E.* Relative humidity parametrization of the Navy aerosol model (NAM) / H. E. Gerber. NRL, Rep. 8956. National Research Laboratory, Washington DC. – 1985.
39. *Giorgi F.* A particle dry deposition parametrization scheme for use in tracer transport models / F. Giorgi // Journal of Geophysical Research. – 1986. – Vol. 91. – P. 9794 – 9806.
40. *Giorgi F.* Dry deposition velocity of atmospheric aerosols as inferred by applying a particle dry deposition parameterization to a general calculation model / F. Giorgi // Tellus. – 1988. – Vol. 40B. – P. 23 – 41.
41. *Horn H. G.* Measured particle bound activity size-distribution, deposition velocity, and activity concentration in rainwater after the Chernobyl accident / H. G. Horn, H. Bonka, M. Maque // J. Aerosol Sci. – 1987. – Vol. 18. – No. 6 – P. 681 – 684.
42. *Lieuwe H. V.* The distribution of the Chernobyl pollution in the Netherlands airs an empirical relation for the transfer of radionuclides from dry and wet deposition to grass / H. V. Lieuwe. – National Institute for Public Health and Environmental Hygiene (RIVM), Laboratory of Radiation Research (LSO). – 1986. – P. 81 – 85.
43. *Megaw W. J.* Some field experiments on the Release and Deposition of Fission products and Thoria / W. J. Megaw and R. C. Chadwick. – AERE_HP_M_114, available from National Technical Information Service, U. S. Dept. of Commerce, Springfield, VA. – 1956.
44. *Consistent radionuclide vector after the Chernobyl accident* // K. Mück, G. Pröhl, I. Likhtarev, L. Kovgan, R. Meckbach and V. Golikiv // Health Physics. – 2002. – Vol. 82, No. 2. 141-156 p.
45. *Müller H.* ECOSYS-87. A dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents / H. Müller and G. Pröhl // Health Physics. – 1993. - Vol. 64, No. 3. – P. 232 – 252.
46. *Nicholson K. W.* The deposition, resuspension and weathering of Chernobyl derived material in the UK / K. W. Nicholson // J. Radiol. Prot. – 1989. - Vol. 9, № 2. - P. 113 - 119.
47. *Päsler-Sauer J.* Description of the atmospheric dispersion model ATSTEP. Version RODOS PV 5.0 / J. Päsler-Sauer // Technical Report RODOS(RA2)-TN(03), Forschungszentrum Karlsruhe GMBH. – 2003.
48. *Peters K. K.* Modelling the dry deposition velocity of aerosol particles to a spruce forest / K. K. Peters and R. Eiden // Atmospheric Environment. – 1992. – Vol. 21. – P. 2555 – 2564.
49. *Report 2009.* Technical Analysis of Dry Deposition. Department of Energy Washington, DC 20585 November 5, 2010.
50. *Rosner G.* Effect of dry deposition, washout and resuspension on radionuclide ratios after the Chernobyl accident / G. Rosner, H. Hotzl and R. Winkler // The Science Total Environment. – 1990. – Vol. 90. – P. 1 – 12.
51. *Sehmel G. A.* Field deposition velocity measurements to a sagebrush canopy / G. A. Sehmel and W. H. Hodgson (Annual Report for 1975) // Atmospheric Sciences, BNWL-2000-3, Battelle, Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA. – 1976.
52. *Sehmel G. A.* Particle and gas dry deposition: a review / G. A. Sehmel // Atmospheric Environment. – 1980. – Vol. 14. – P. 983 – 101.
53. *Simpson C. L.* Estimates of Deposition of Matter from a Continuous Point Source in the stable atmosphere / C. L. Simpson // HW-69292. Hanford Atomic Products Operation, Richland, WA. – 1961.
54. *Slinn W. G. N.* Predictions for particles deposition to vegetative surfaces / W. G. N. Slinn // Atmospheric Environment. – 1982. – Vol. 16. – P. 1785 – 1794.
55. *Slinn S. A.* Prediction for particle deposition on natural waters / S. A. Slinn, W. G. N. Slinn // Atmospheric Environment. – 1980. – Vol. 14. – P. 1013 – 1026.
56. *Stewart K.* The particulate material formed by the oxidation of plutonium / K. Stewart // Progress of Nuclear Energy, Series IV. Technology of Safety ; C. M. Nichols, ed. - Pergamon Press, Macmillan, New York. – 1963. – Vol. 5. – P. 535 – 579.
57. *Thyker-Nielsen S.* Description of the atmospheric dispersion module RIMPUFF / S. Thyker-Nielsen, S. Deme and T. Mikkelsen // Technical Report RODOS(WG2)-TN(98)-02, Forschungszentrum Karlsruhe GMBH. – 1999.
58. *Zhang L.* A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module / S. Cong, J. Padro and L. Barrie // Atmospheric Environment. – 2001. – Vol. 35. – P. 549 – 560.

Є. К. Гаргер

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна***ШВИДКІСТЬ СУХОГО ОСАЖДЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ РЕЧОВИН ЧОРНОБИЛЬСЬКОГО ПОХОДЖЕННЯ ЗА ДАНИМИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ**

У цьому огляді коротко розглянуто дані польових експериментальних вимірювань швидкості сухого осадження v_d , оцінки спостережень v_d у період Чорнобильської аварії на різних відстанях від ЧАЕС, методи прогнозу формування гамма-полів забруднення в мезо- і регіональному масштабах при використанні різних значень v_d , рекомендацій значень швидкості сухого осадження для розрахунку осадження радіоактивних аерозолів. За даними експериментальних вимірювань, проведених у польових дифузійних дослідах, показано, що діапазон зміни швидкості сухого осадження аерозольних частинок становить більше трьох порядків величини. Аварія на ЧАЕС характеризувалася викидами радіоактивних речовин, що складаються із частинок диспергованого палива, інертних газів і легколетучих нуклідів йоду, цезію, телуру. Особливістю цієї аварії були викиди широкого спектра частинок за розмірами з різними фізико-хімічними властивостями, які забруднили величезні території протягом тривалого часу за різних метеорологічних умов, що різко ускладнило отримання оцінок v_d , особливо у ближній сильно забрудненій зоні в гострій фазі аварії. З даних аналізу випливає, що невизначеність оцінок величин швидкості сухого осадження велика і багато в чому залежить від урахування характеру аварійних викидів, відстані між точками спостережень і джерелом викидів, нестационарності метеорологічних і ландшафтно-геохімічних умов.

Ключові слова: радіоактивний аерозоль, спектр частинок за розмірами, швидкість осадження

E. K. Garger

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, Lysogirska str., 12, Kyiv, 03028, Ukraine***THE RATE OF DRY DEPOSITION OF RADIOACTIVE SUBSTANCES OF CHERNOBYL ORIGIN ACCORDING TO OBSERVATIONS**

In this review, it briefly examine data from field experimental measurements of of dry deposition velocity v_d , assessments of observations v_d in during the Chernobyl accident at various distances from the Chernobyl nuclear power station, methods for predicting the forming of gamma contamination fields in meso and regional scales using different values v_d , recommendations for values of the dry deposition velocity for the calculation of deposition radioactive aerosols. According to experimental measurements carried out in field diffusion experiments, it has been shown that the range of variation of the dry deposition velocity of aerosol particles was more than three orders of magnitude. The accident at the Chernobyl nuclear power plant was characterized by the release of radioactive substances consisting of particles of dispersed fuel, inert gases, and volatile nuclides of iodine, cesium, tellurium. The peculiarity of this accident was the emission of a wide range of particles in size with different physicochemical properties that polluted huge territories for a long period of time under different weather conditions, which made it extremely difficult to obtain estimates v_d especially in the near heavily polluted zone in the acute phase of the accident. From the analysis it follows that the uncertainty of estimates of the values of the dry deposition velocity is large and largely depends on the consideration of the nature of the accidental emissions, the removal of observation points from the source of emissions, nonstationarity of meteorological and landscape-geochemical conditions. Therefore that for prompt calculations of the radiation situation in the event of accidents and for preventive assessments of radiation contamination within the EIA (Environmental Impact Assessment), it is necessary to create a calculation methodology that takes into account the determining processes of radioactivity formation in a wide range of aerosol particles in size, meteorological and landscape-geochemical conditions, taking into account the nature of accidental emissions (type, height and duration).

Keywords: radioactive aerosol, range of aerosol particles in size, deposition rate.

REFERENCES

1. *Physico-chemical forms of radionuclide and depositions after the Chernobyl accident and their transfer to soil / C. I. Bobonikova et al. // Atomnaya energiya. – 1991. – Iss. 71. – № 5. – P. 449 – 454. (Rus)*
2. *Borovoy A. A. Release of nuclear fuel and fission products from a reactor of the 4th block CHAES at accident (review) / A. A. Borovoj. – Chernobyl, 2000. – (Preprint / NAS Ukraine. ISTC "Shelter"; 00-10). (Rus)*
3. *Byzova N. L. Diffusion of an admixture in the boundary layer atmosphere / N. L. Byzova. – Moskva : Hydrometeoizdat, 1974. – 191 p. (Rus)*
4. *Byzova N. L. About interaction of an aerosol with a underlying surface / N. L. Byzova, K. P. Mahonko // Proceedings of the Academy of Sciences, Series of physics of atmosphere and ocean. – 1968. – Iss. 4, № 9. (Rus)*

5. *To calculate* local, mesoscale and regional effects of secondary air pollution; Scientific report about “Wind lifting and carrying over radionuclides in the around failure of the Chernobyl NPP”; Ed. E. K. Garger. - Institute Experimental Meteorology SPA”Typhoon”, Obninsk, 1987, 156 p. (Rus)
6. *Garger E. K.* Reentrainment of radioactive aerosol in the surface layer of the atmosphere / E. K. Garger. – Chernobyl : Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 2008. – 192 . (Rus)
7. *Izrael J. A.* Modeling of radioactive losses in a near zone from failure on the Chernobyl atomic power station / J. A. Izrael, V. N. Petrov, D. A. Severov // *Meteorologiya i hydrologiya*. – 1987. – № 7. (Rus)
8. *Izrael J. A.* Regional model of carrying over and losses of radionuclide from failure at Chernobyl nuclear station / J. A. Izrael, V. N. Petrov, D. A. Severov // *Meteorologiya i hydrologiya*. – 1989. – № 7. (Rus)
9. *Medical* consequences of failure on Chernobyl atomic power stations / I. P. Los et al.; VNC Radiating Medicine AMN of the USSR. – Radiating conditions. – Kiev, 1991. – P. 9 – 69. (Rus)
10. *Monin A. S.* About a boundary condition on a surface of the earth for diffusing admixture / A. S. Monin // *Atmospheric diffusion and air pollution* / Eds F. N. Frencel, P. A. Shepard. – Moskva : Iss. Forin. lit., 1962. – P. 477 – 478. (Rus)
11. *ПД 52.18.717 - 2009.* The Design procedure of dispersion of polluting substances in atmosphere at emergency emissions. – Obninsk, 2009. (Rus)
12. *Tkachenko N. V.* Features of radioactive pollution of vegetation and its role in formation of radiating conditions in the first years after accident on the Chernobyl NPP : Dissertation / H. V. Tkachenko. – Kiev, 1990. – 161 p. (Rus)
13. *Structure* and properties of the radioactive particles which have been found out in southern areas of Belarus / E. P. Petrjaev et al. // *Geochimiya*. – 1993. – P. 930 – 939. (Rus)
14. *Reconstruction* radionuclide structure of losses in territory of Russia owing to failure on the ChernobylNPP / V. A. Pitkevich et al. // *Radiatsiya i risk*. – 1993. – Iss. 3. – P. 62 – 93. (Rus)
15. *Radiochemical* research of the fuel-bearing new growths which have resulted failure on the Chernobyl atomic power station / V. G. Savenkov, E. B. Anderson, E. A. Smirnova, S. I. Shabalev // *Trudy Radium institute of Hlo-pina*. – 2009. – Vol. 14. – P. 87 – 117. (Rus)
16. *Chernobyl* : Radioactive pollution of environments ; ed. J. A. Izrael. – Leningrad : Hydrometeoizdat. – 1990. – 296 p. (Rus)
17. *Aoyama M.* Particle size dependent dry deposition velocity of the Chernobyl Radioactivity / M. Aoyama, H. Katsumi // *Precipitation Scavenging and Atmosphere-Surface Exchange* (S. E. Schwartz et al.) : Proc. of the Fifth International Conference (Richland, Washington, 15 – 19 July 1991). – Hemisphere Publishing, Washington DC. – Vol. 3. – P. 1581 – 1593.
18. *The ATMES Report* : Evaluation of long range atmospheric transport models using environmental radioactivity data from the Chernobyl accident. – 1992. – 366 p.
19. *Baklanov A.* Sorensen parameterisation of radionuclide deposition in atmospheric long-range transport modelling / A. Baklanov and J. H. Sorensen // *Phys. Chem. Earth. (B)*. – 2001. – Vol. 26, No. 10. – P. 787 – 799.
20. *Belot Y.* Transport of micronic particles from atmosphere to foliar surfaces / Y. Belot, D. Gauthier // *Heat and Mass Transfer in The Biosphere, Part I* (D. A de Vries, N. H. Afgan et al.). - Wiley. New York. – 1976. – P. 582 – 591.
21. *Borzilov V. A.* Effect of meteorological conditions and release compositions after the Chernobyl accident / V. A. Borzilov, N. V. Klepikova // *Chernobyl papers* (St. Mervin and M. Balonov, eds.). - Richland : Research Enterprises. – 1993. – Vol. I. – P. 47 – 68.
22. *Brant J.* Modelling transport and deposition of ^{137}Cs and ^{131}I from Chernobyl accident using the DREAM model / J. Brant, J. H. Christensen and L. Frohn // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2002. – Vol. 2. – P. 397 – 417.
23. *Cataldo D. A.* Fate of plutonium intercepted by leaf surface : leachability and translocation to seed and root tissues / D. A. Cataldo, E. L. Klepper and D. K. Craig // *Proc. Transuranium Nuclides in the Environment*. - International Atomic Energy Agency, Vienna. – 1976. – P. 291 – 301.
24. *Chamberlain A. C.* Deposition of iodine-131 in Northern England in October 1957 / A. C. Chamberlain // *Q. J. Roy. Met. Soc.* – 1959. – Vol. 85 – P. 350.
25. *Chamberlain A. C.* Aspects of the deposition of radioactive and other cases and particles / A. C. Chamberlain // *Int. J. Air Poll.*; also in *Aerodynamic Capture of Particles* (E. G. Richardson, ed.). – Pergamon Press. Inc. N. Y. 6. – 1960. – Vol. 3 (1 – 3). – P. 63 – 88.
26. *Chamberlain A. C.* Transport of iodine from atmospheric to ground / A. C. Chamberlain and R. C. Chadwick // *Tellus*. – 1966. – Vol. XVIII, No. 2. – P. 226 – 236.
27. *Chamberlain A. C.* Transport of lycopodium spores and other particles to rough / A. C. Chamberlain // *P. R. Soc.* – 1967. – Vol. A296. – P. 45 – 70.
28. *Clark M. J.* Wet and dry deposition of Chernobyl releases / M. J. Clark and F. B. Smith // *Nature*. – 1988. – Vol. 332, 17 March. – P. 245 – 249.
29. *Colder K. L.* Atmospheric diffusion of particulate material, considered as a boundary value problem / K. L. Colder // *J. Meteorol.* – 1961. – Vol. 18, No. 3. – P. 413 – 442.
30. *Convair.* Fission Products Field Release. Test I / Convair : Report NARF 59-32T U.S. Air Force Nuclear Aircraft Res. Facility. – 1959.

31. *Convair*. Fission Products Field Release Test II / Convair : Report NARF 60-10T U.S. Air Force Nuclear Aircraft Res. Facility. – 1960.
32. *Craig D. K.* Deposition of various plutonium-compound aerosols onto plant foliage at very low wind velocities / D. K. Craig, B. L. Klepper and R. L. Bushbom // Proc. Atmospheric-Surface Exchange of Particulate and Gaseous Pollutants. 1974 Symp. (Richland, WA, 4 – 6 September 1974). – Energy Research and Development Administration Symposium Series CONF-740921. National International Services, U. S. Dept. of Commerce, Springfield. VA. – 1976. – P. 244 – 263.
33. *Schell* Radioactive Cesium from the Chernobyl Accident in the Greenland Ice Sheet / J. R. Davidson et al. // Science. – 1987. – Vol. 237. – P. 633 – 634.
34. *Davidson C. I.* The influence of surface structure on prediction to natural grass canopies / C. I. Davidson, J. M. Miller, M. A. Pleskow // Water, Air and Soil Pollution. – 1982. – Vol. 18. – P. 25 – 44.
35. *Fuchs N. A.* The Mechanics of Aerosols / N. A. Fuchs. - Pergamon, New York. – 1964.
36. *Garland J. A.* Deposition, resuspension and long term variation of airborne radioactivity from Chernobyl Garland J. A. and Cambray R. S. // 4th Int. Symp. On Radioecology 14 - 18 March 1988 Cadarache, France. - 1988.
37. *Garland J.A.* On the size dependence of particle deposition // Water, Air, and Soil Pollution : Focus 1. – 2001. – P. 323 – 332.
38. *Gerber H. E.* Relative humidity parametrization of the Navy aerosol model (NAM) / H. E. Gerber. NRL, Rep. 8956. National Research Laboratory, Washington DC. – 1985.
39. *Giorgi F.* A particle dry deposition parametrization scheme for use in tracer transport models / F. Giorgi // Journal of Geophysical Research. –1986. – Vol. 91. – P. 9794 – 9806.
40. *Giorgi F.* Dry deposition velocity of atmospheric aerosols as inferred by applying a particle dry deposition parametrization to a general calculation model / F. Giorgi // Tellus.– 1988. – Vol. 40B. – P. 23 – 41.
41. *Horn H. G.* Measured particle bound activity size-distribution, deposition velocity, and activity concentration in rainwater after the Chernobyl accident / H. G. Horn, H. Bonka, M. Maque // J. Aerosol Sci. – 1987.– Vol. 18.– No. 6 – P. 681 – 684.
42. *Lieuwe H. V.* The distribution of the Chernobyl pollution in the Netherlands air an empirical relation for the transfer of radionuclides from dry and wet deposition to grass / H. V. Lieuwe. – National Institute for Public Health and Environmental Hygiene (RIVM), Laboratory of Radiation Research (LSO). – 1986. – P. 81 – 85.
43. *Megaw W. J.* Some field experiments on the Release and Deposition of Fission products and Thoria / W. J. Megaw and R. C. Chadwick. – AERE_HP_M_114, available from National Technical Information Service, U. S. Dept. of Commerce, Springfield, VA. – 1956.
44. *Consistent radionuclide vector after the Chernobyl accident* / K. Mück, G. Pröhl, I. Likhtarev, L. Kovgan, R. Meckbach and V. Golikiv // Health Physics. – 2002. – Vol. 82, No. 2. 141-156 p.
45. *Müller H.* ECOSYS-87. A dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents / H. Müller and G. Pröhl // Health Physics. – 1993. – Vol. 64, No. 3. – P. 232 – 252.
46. *Nicholson K. W.* The deposition, resuspension and weathering of Chernobyl derived material in the UK / K. W. Nicholson // J. Radiol. Prot. 1989. - Vol. 9, No. 2. - P. 113 - 119.
47. *Päsler-Sauer J.* Description of the atmospheric dispersion model ATSTEP. Version RODOS PV 5.0 / J. Päsler-Sauer // Technical Report RODOS(RA2)-TN(03), Forschungszentrum Karlsruhe GMBH. – 2003.
48. *Peters K. K.* Modelling the dry deposition velocity of aerosol particles to a spruce forest / K. K. Peters and R. Eiden // Atmospheric Environment. – 1992. – Vol. 21. – P. 2555 – 2564.
49. *Report 2009.* Technical Analysis of Dry Deposition. Department of Energy Washington, DC 20585 November 5, 2010.
50. *Rosner G.* Effect of dry deposition, washout and resuspension on radionuclide ratios after the Chernobyl accident / G. Rosner, H. Hotzl and R. Winkler // The Science Total Environment. – 1990. – Vol. 90. – P. 1 – 12.
51. *Sehmel G. A.* Field deposition velocity measurements to a sagebrush canopy / G. A. Sehmel and W. H. Hodgson (Annual Report for 1975) // Atmospheric Sciences, BNWL-2000-3, Battelle, Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA. – 1976.
52. *Sehmel G. A.* Particle and gas dry deposition: a review / G. A. Sehmel // Atmospheric Environment. – 1980. – Vol. 14. – P. 983 – 101.
53. *Simpson C. L.* Estimates of Deposition of Matter from a Continuous Point Source in the stable atmosphere / C. L. Simpson // HW-69292. Hanford Atomic Products Operation, Richland, WA. – 1961.
54. *Slinn W. G. N.* Predictions for particles deposition to vegetative surfaces / W. G. N. Slinn // Atmospheric Environment. – 1982. – Vol. 16. – P. 1785 – 1794.
55. *Slinn S. A.* Prediction for particle deposition on natural waters / S. A. Slinn, W. G. N. Slinn // Atmospheric Environment. – 1980. – Vol. 14. – P. 1013 – 1026.
56. *Stewart K.* The particulate material formed by the oxidation of plutonium / K. Stewart // Progress of Nuclear Energy, Series IV. Technology of Safety ; C. M. Nichols, ed. - Pergamon Press, Macmillan, New York. – 1963. – Vol. 5. – P. 535 – 579.
57. *Thyker-Nielsen S.* Description of the atmospheric dispersion module RIMPUFF / S. Thyker-Nielsen, S. Deme and T. Mikkelsen // Technical Report RODOS(WG2)-TN(98)-02, Forschungszentrum Karlsruhe GMBH. – 1999.
58. *Zhang L.* A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module / S. Cong, J. Padro and L. Barrie // Atmospheric Environment. – 2001. – Vol. 35. – P. 549 – 560.

Надійшла 10.08.2018
Received 10.08.2018