

Для устранения искажений в восстановленном изображении используются и развиваются математические методы. Такую задачу по устранению искажений можно считать обратной некорректной задачей [9].

Рассмотренные принципы построения и характеристики позиционно-чувствительного детектора на основе модульных детекторов являются основанием для дальнейших исследований расширения областей применения интроскопов с кодированной апертурой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Колеватов Ю.И., Семенов В.П., Трыков Л.А.** Спектрометрия нейтронов и гамма-излучения в радиационной физике. М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. **Веретенников А.И., Горбачев В.М., Предени Б.А.** Методы исследований импульсных излучений. М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. **Альбинов З.А., Веретенников А.И., Козлов О.В.** Детекторы импульсного излучения. М.: Энергоатомиздат, 1978.
4. **Гусев Н.Г., Машкович В.П., Суворов А.П.** Физические основы защиты от излучений. М.: Атомиздат, 1980.
5. **Федоров Г.А.** Радиационная интроскопия. Кодирование информации и оптимизация эксперимента. М.: Энергоатомиздат, 1985.
6. **Fenimore E., Cannon T.** Coded aperture imaging with redundant arrays. — *Appl. Opt.*, 1978, v. 17, № 22, p. 3562.
7. **Busboom A., Elders-Boll H., Schotten H.** Uniformly redundant arrays. — *Experim. Astronomy*, 1998, № 8, p. 97—123.
8. **Калашников С.Д.** Физические основы проектирования сцинтилляционных гамма-камер. М.: Энергоатомиздат, 1985.
9. **Прокуронов М.В., Севастьянов В.Д., Шибасев Р.М.** Оценка методов построения высокочувствительных интроскопов с кодированной апертурой для регистрации изображения источников гамма-излучения и смешанного ионизирующего излучения. — В сб.: Альманах современной метрологии, 2018, № 16, с. 33—53.
10. **Прокуронов М.В., Голубев А.А., Демидов В.С. и др.** Цифровая идентификация частиц по форме импульса. — *Приборы и техника эксперимента*, 2006, № 1, с. 1—17.
11. **Прокуронов М.В., Шаболин А.Н.** Цифровая идентификация нейтронов и гамма-квантов по форме импульса при высокой загрузке детектора и низкой энергии регистрируемого излучения. — Там же, 2007, № 3, с. 1—15.
12. **Прокуронов М.В., Руднев П.И.** Идентификация нейтронов и гамма-квантов на основе цифровых методов. — *Электроника: наука, технология, бизнес*, 2009, № 1, с. 96—101.
13. **Gatti E., Martini F.** A new linear method of discrimination between elementary particles in scintillation counters. — *Nucl. Electronics*, 1962, № 2, p. 265—276.
14. **Прокуронов М.В., Руднев П.И., Севастьянов В.Д.** Спектрометр нейтронного и гамма-излучения на основе цифровых методов регистрации и обработки сигналов. — *Современная электроника*, 2011, № 8, p. 38—41.
15. **Прокуронов М.В., Голубев А.А., Демидов В.С. и др.** Метод измерения спектральных и временных характеристик смешанных полей сцинтилляционным и черенковским детекторами с наносекундным временным разрешением. — *Приборы и техника эксперимента*, № 4, 2008, с. 1—15.

Поступила в Редакцию 26.03.19

УДК 519.713.5:504.3.054

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ РАССЕЯНИЯ ПРИМЕСИ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

Панченко С.В., Припачкин Д.А. (ИБРАЭ РАН, г. Москва),

Крышев А.И., Каткова М.Н. (НПО «Тайфун», г. Обнинск)

e-mail: panch@ibrae.ar.ru

Для сравнительных оценок риска на населенные выбросов стационарных источников моделируют рассеяние от каждой отдельной вентиляционной трубы. Приземная концентрация веществ, вызывающих негативные для здоровья населения эффекты, затем с помощью зависимости доза—эффект при заданной экспозиции трансформируется в риск [1]. На следующем этапе анализа риск от разных примесей в отдельных точках городской территории суммируется с тем, чтобы определить места формиро-

вания наибольших значений. В этой расчетной схеме значительные неопределенности вносит уже первый этап — расчет приземной концентрации от отдельно взятого источника атмосферных выбросов. Трудности в оценке приземной концентрации состоят в том, что объемная архитектура городского поселения может вносить, как полагают многие специалисты, значительные локальные искажения в расчетные модели. Масштаб таких искажений можно оценить только экспериментально, но постановка экспе-

римента вызывает определенные трудности. И не случайно мировой опыт таких проверок скуден. Основные сложности возникают на стадии формирования полей скорости и направления ветра в городском пространстве, когда достаточно сложно измерить метеорологические параметры в разных точках. Использование индикаторных веществ для оценки рассеяния выбрасываемой в атмосферу примеси естественный, но редкий прием. Радиоактивные вещества по многим свойствам наиболее подходят для экспериментальной проверки моделей рассеяния. Радионуклиды в качестве меченых атомов уже более столетия широко применяются во многих областях естествознания и медицины [2]. Но сложившееся отношение к радиоактивности мешает широкому использованию этого метода в тех случаях, когда решаемая задача относится к области безопасности населения и управления техногенными рисками.

Тем не менее при благоприятных условиях все же иногда удается провести экспериментальную проверку модельных расчетов с помощью радионуклидных маркеров. В настоящей статье приводится оценка неопределенности техногенных рисков для населения Обнинска.

Исходные материалы и методы. В Обнинске расположены не оказывающие значимого влияния на здоровье населения два предприятия, выбрасывающие небольшое количество радионуклидов в атмосферу: АО «ГНЦ РФ — ФЭИ» и АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» [3, 4]. Из табл. 1 видно, что радионуклидный состав выбросов НИФХИ состоит из относительно короткоживущих радионуклидов, в то время как в выбросах ФЭИ преобладают, главным образом, долгоживущие нуклиды. Кроме того, инжестрированная активность для НИФХИ во много десятков раз выше. Это позволяет для проверки модели рассеяния выбрать в качестве источника радиоактивных выбросов НИФХИ, в качестве реперного нуклида — ^{131}I . Такой выбор обусловлен действующей в НИФХИ системой мониторинга за содержанием именно этого радионуклида в приземном воздухе (рис. 1, табл. 2) [4, 5]. Кроме того, в Обнинске ведется непрерывное измерение метеорологических параметров — температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра, давления, турбулентных характеристик на разной высоте от уровня земли с помощью приборов, установленных на метеорологической мачте (ВММ-310).

Таблица 1. Годовой выброс радионуклидов АО «ГНЦ РФ — ФЭИ» и АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» в 2013—2017 гг. [4], Бк

Радионуклид	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.
АО «ГНЦ РФ — ФЭИ»					
^{57}Co	$1,62 \cdot 10^8$	$4,10 \cdot 10^7$	$9,07 \cdot 10^6$	$8,10 \cdot 10^6$	$6,60 \cdot 10^6$
^{65}Zn	$1,70 \cdot 10^5$	Не детектирован	$2,30 \cdot 10^6$	$5,00 \cdot 10^5$	$3,90 \cdot 10^5$
^{90}Sr	$4,60 \cdot 10^6$	$2,80 \cdot 10^6$	$4,20 \cdot 10^6$	$7,40 \cdot 10^5$	$5,70 \cdot 10^5$
^{137}Cs	$2,77 \cdot 10^6$	$2,62 \cdot 10^6$	$1,71 \cdot 10^6$	$6,28 \cdot 10^7$	$7,57 \cdot 10^6$
^{109}Cd	$2,10 \cdot 10^7$	$1,10 \cdot 10^7$	$4,30 \cdot 10^6$	$4,50 \cdot 10^6$	$5,80 \cdot 10^6$
^{241}Am		Не детектирован			$1,10 \cdot 10^6$
^{68}Ge	$4,60 \cdot 10^6$	$2,80 \cdot 10^6$		Не детектирован	
$^{68}\text{Ge} + ^{68}\text{Ga}$	Не детектирован		$4,20 \cdot 10^6$	$5,20 \cdot 10^6$	$6,00 \cdot 10^6$
АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова»					
^{41}Ar	$2,5 \cdot 10^{13}$	$4,5 \cdot 10^{13}$	$7,8 \cdot 10^{13}$	$1,7 \cdot 10^{14}$	$9,3 \cdot 10^{13}$
^{85m}Kr	$5,2 \cdot 10^{12}$	$2,7 \cdot 10^{12}$	$2,2 \cdot 10^{13}$	$1,4 \cdot 10^{13}$	$1,3 \cdot 10^{13}$
^{131}I	$1,2 \cdot 10^{11}$	$1,6 \cdot 10^{11}$	$8,5 \cdot 10^{11}$	$1,4 \cdot 10^{12}$	$1,6 \cdot 10^{12}$
^{132}I	$3,6 \cdot 10^{10}$	$9,1 \cdot 10^{10}$	$1,6 \cdot 10^{12}$	$1,0 \cdot 10^{12}$	$1,9 \cdot 10^{12}$
^{133}I	$1,1 \cdot 10^{10}$	$2,1 \cdot 10^{10}$	$4,4 \cdot 10^{11}$	$8,8 \cdot 10^{11}$	$1,0 \cdot 10^{12}$
^{135}I	$6,3 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^8$	$4,6 \cdot 10^{10}$	$4,6 \cdot 10^{10}$	$7,1 \cdot 10^{10}$
^{133}Xe	$9,1 \cdot 10^{13}$	$2,4 \cdot 10^{13}$	$2,5 \cdot 10^{14}$	$1,6 \cdot 10^{14}$	$8,8 \cdot 10^{13}$
^{135}Xe	$5,0 \cdot 10^{13}$	$1,9 \cdot 10^{13}$	$2,0 \cdot 10^{14}$	$1,7 \cdot 10^{14}$	$1,1 \cdot 10^{14}$
^{135m}Xe		Не детектирован			$1,8 \cdot 10^{13}$



Р и с. 1. Расположение точек контроля за объемной активностью ^{131}I в приземном воздухе от выбросов НИФХИ

Помимо детальных данных, по отдельным параметрам приводятся и обобщенные за год данные, широко используемые в приложениях. Типичным примером является среднегодовая роза ветров в Обнинске в 2015 г., показанная на рис. 2.

Еще одно благоприятное для проверки качества моделей рассеяния обстоятельство связано с наблюдениями в НПО «Тайфун» за радиоактивными аэрозолями воздуха, включая ^{131}I в молекулярной и аэрозольной форме.

Методические подходы к оценке рассеяния примеси. Среднегодовую концентрацию радионуклида в воздухе C можно оценить по годовому выбросу Q , характерной розе ветров R и коэффициенту рассеяния σ , взятому, напри-

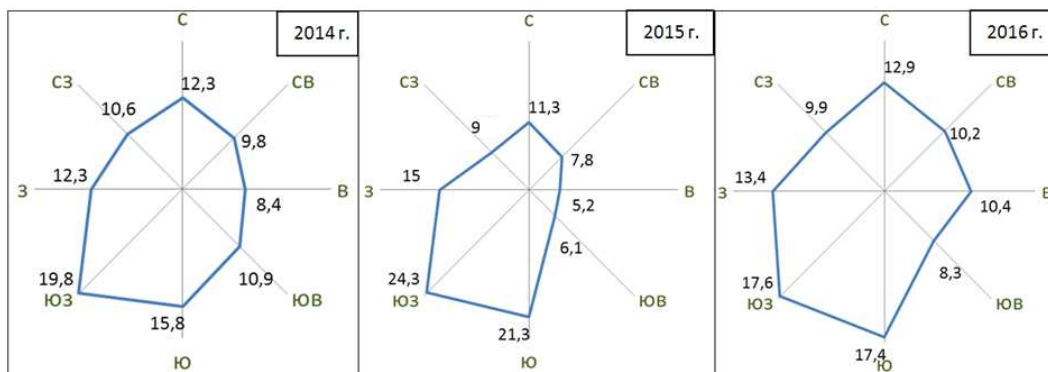
мер, из справочника [6], по соотношению $C = Q\sigma R$.

Так, для площадки НПО «Тайфун» можно использовать следующие параметры: среднегодовая скорость выброса ^{131}I в 2014—2016 гг., $\sigma = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ с/м}^3$ для высоты выброса 30 м, что соответствует расположению вентиляционных труб на крыше здания ВВР-ц, расположенного на территории НИФХИ, при коэффициенте шероховатости $z_0 = 100 \text{ см}$ и преимуществен-

ных категорий погоды С и D, удалении точки контроля от трубы $x = 4,6 \text{ км}$. Исходные данные и результаты расчета приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Расчетная и измеренная среднегодовая концентрация ^{131}I в Обнинске

Параметр	2014 г.	2015 г.	2016 г.
Выброс ^{131}I , Бк/с	$5,07 \cdot 10^3$	$2,70 \cdot 10^4$	$4,44 \cdot 10^4$
Повторяемость направления ветра R	0,13	0,14	0,13
Концентрация ^{131}I , Бк/м ³ :			
расчетная	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$
измеренная	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$
Отношение расчетных значений к измеренным	4,1	1,1	2,7



Р и с. 2. Среднегодовая роза ветров в Обнинске в 2014—2016 гг.

Т а б л и ц а 2. Объемная активность ^{131}I в воздухе Обнинска, на границах зоны наблюдения и санитарно-защитной зоны НИФХИ [4, 5], Бк/м³

Точка контроля	Удаление от источника, км	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.
НИФХИ:						
санитарно-защитная зона	0,4	$6,64 \cdot 10^{-3}$	$5,28 \cdot 10^{-4}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$6,70 \cdot 10^{-3}$	$4,88 \cdot 10^{-3}$
зона наблюдения	0,8	$7,64 \cdot 10^{-3}$	$7,97 \cdot 10^{-3}$	$1,27 \cdot 10^{-3}$	Не детектирован	$1,13 \cdot 10^{-2}$
г. Обнинск	4,6	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$4,82 \cdot 10^{-4}$	$3,12 \cdot 10^{-4}$	$4,12 \cdot 10^{-4}$

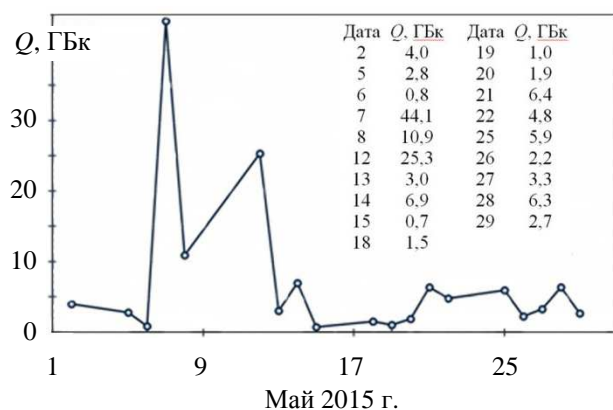
Т а б л и ц а 4. Данные о метеорологической обстановке за 21 и 22 мая 2015 г. в Обнинске по данным НПО «Тайфун»

Время, ч	Скорость, направление ветра и температура на высоте 8 м			Температура на высоте 121 м, °С	Градиент температуры, °С/100 м
	м/с	градус	°С		
21 мая					
0	0,1	118	11,3	20,7	8,32
1	0,3	69	10,8	20,9	8,94
2	0,1	109	10,3	20,3	8,85
3	0,2	66	9,7	20,5	9,56
4	0,1	89	9,2	19,8	9,38
5	0,1	118	9,1	18,7	8,50
6	0,1	224	11,6	18,7	6,28
7	0,1	74	14,4	18,9	3,98
8	0,4	153	19	18,4	-0,53
9	1,2	192	22,2	20,5	-1,50
10	1,5	159	23,9	22	-1,68
11	2,2	205	24	22,6	-1,24
12	2,1	167	25,3	23,4	-1,68
13	1,8	140	26,4	24,4	-1,77
14	2,6	185	27,1	25,1	-1,77
15	2,1	193	27,6	25,7	-1,68
16	2,1	196	27,9	26	-1,68
17	1,9	189	27,6	26,3	-1,15
18	2,1	181	27,6	26,6	-0,88
19	0,7	190	26,7	26,2	-0,44
20	0,6	136	24,4	25,5	0,97
21	0,4	108	19,5	24,8	4,69
22	0,2	133	19,4	23,9	3,98
23	0,6	183	18,4	23,2	4,25
24	0,2	113	16	22,5	5,75
22 мая					
1	0,4	120	15,1	21,9	6,02
2	0,4	160	14,9	21,7	6,02
3	1,1	276	18,3	20,4	1,86
4	0,8	189	16,2	20,4	3,72
5	1,4	203	18	20,2	1,95
6	1,3	206	19	19,8	0,71
7	2,1	201	20,4	20	-0,35
8	1,1	203	20,4	19,8	-0,53
9	0,8	225	22,1	20,7	-1,24

Сравнение расчетной и измеренной концентрации показывает удовлетворительное с точки зрения оценки радиационной безопасности согласие. Максимальное различие составило около 4 раз. Параметры модели [7] подбирали по экспериментальным усредненным данным [8]. Эта эмпирическая модель является рабочей для МАГАТЭ и используется во многих

практических приложениях, как правило, для расстояния до 10—15 км от источника.

При этом специалисты предполагают, что модель может давать значительную неопределенность в конкретных ситуациях. В задачу исследования настоящей статьи входила, в частности, оценка неопределенности при использовании выброса примеси, усредненного за



Р и с. 3. Объем суточных выбросов ^{131}I , поступивших в атмосферу от АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» в мае 2015 г. (информация предоставлена НИФХИ)

значительно меньший промежуток времени, но все же достаточно продолжительный относительно изменений метеорологических условий. При этом более корректно использовать метеорологические данные в программном модуле лагранжевого типа. С этой целью рассматривался суточный выброс ^{131}I в течение мая 2015 г. Как видно в табл. 4, даже в течение одного месяца неравномерность выброса ^{131}I составляет почти 100 раз. Это в значительной степени свидетельствует о необходимости рассматривать для верификации моделей и более короткие интервалы времени. Из физических представлений следует, что длина таких интервалов должна быть сопоставима с продолжительностью устойчивого направления ветра, т.е. в условиях Обнинска составлять от часа до нескольких часов (рис. 3).

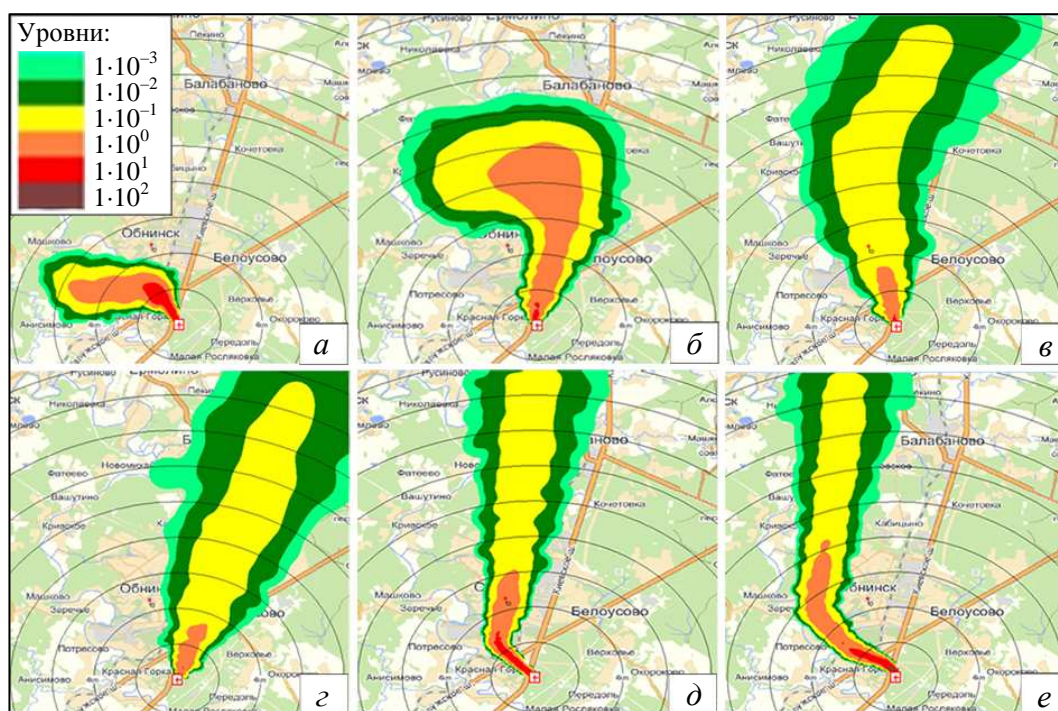
Проверка качества моделей рассеяния была инициирована полученными НПО «Тайфун» в мае 2015 г. данными о концентрации ^{131}I в аэрозольной и молекулярной форме в приземном воздухе на площадке, приведенными в табл. 5. Производительность воздухо-фильтрующей установки составляла 800—1300 м³/ч. Относительная погрешность измерения ^{131}I находилась в пределах 10—30%. Экспозиция фильтров, например, 21—22 мая 2015 г., когда была отмечена повышенная концентрация ^{131}I в приземном слое атмосферы, составляла 48 ч. Экспозиция фильтров в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» составляла две недели. В период с 13 по 29 мая 2015 г. средняя концентрация на границе санитарно-защитной зоны составляла 8920 мкБк/м³, на границе зоны наблюдения — 1700 мкБк/м³.

Т а б л и ц а 5. Измеренная объемная активность ^{131}I в приземном слое атмосферы Обнинска в мае 2015 г. (площадка НПО «Тайфун»), мкБк/м³

Дата	Молекулярная форма	Аэрозольная форма
08—12	183	<1
12—13	148	90
13—14	490	<1
14—15	103	530
15—18	10	<1
18—19	100	155
21—22	5100	580
22—25	220	430
26—27	100	42
27—28	340	700
28—29	108	68

Моделирование рассеяния ^{131}I было выполнено с помощью аттестованного в Ростехнадзоре программного средства «Нострадамус», в основе которого используется адвекционно-диффузная лагранжева модель [9]. На рис. 4 показано распространение радиоактивных аэрозолей, содержащих ^{131}I , при технологических выбросах НИФХИ 21 мая. При моделировании предполагалось, что ^{131}I в рассматриваемый период поступает в атмосферу равномерно. Точка, в которой проводился отбор пробы воздуха, находится преимущественно северо-северо-западнее территории НИФХИ, поэтому только при северо-западном и северном переносе возможно попадание радиоактивного иода в отобранную на фильтр пробу.

Как показало моделирование, облако с радиоактивным иодом проходило через точку детектирования несколько раз за двое суток. Можно выделить три характерных интервала — с 9 до 14 ч и примерно в 21 ч 21 мая и с 0 до 4 ч 22 мая (рис. 5). Таким образом, моделирование с использованием реальных метеопараметров и моделей лагранжевого типа позволяет уточнить кинетику прохождения примеси в конкретной точке и выявить локальные максимумы приземной концентрации. Интеграл концентрации ^{131}I за двое суток согласно расчетным данным составил $1,0 \pm 0,3$ Бк·ч/м³. Измеренное значение интеграла концентрации ^{131}I на площадке НПО «Тайфун» составило $0,14 \pm 0,04$ Бк·ч/м³, т.е. примерно в 7 раз ниже. Консервативность оценок при залповых аварийных выбросах и регламентных с известным полем метеорологических



Р и с. 4. Объемная активность аэрозолей, содержащих ^{131}I , в атмосферном воздухе 21 мая 2015 г. в 9 (а), 10 (б), 13 (в), 17 (г), 21 (д), 23 ч (е)

параметров в настоящее время имеет примерно такой масштаб — порядок величины.

Обсуждение и выводы. Верификация моделей рассеяния вредных примесей выбросов стационарных источников в жилых зонах остается проблемной задачей, по которой требуется как накопление экспериментального материала, так и как можно более глубокая разработка самих моделей.

Для сравнительной оценки риска для здоровья населения от примесей различной природы, выбрасываемых в атмосферу промышленными

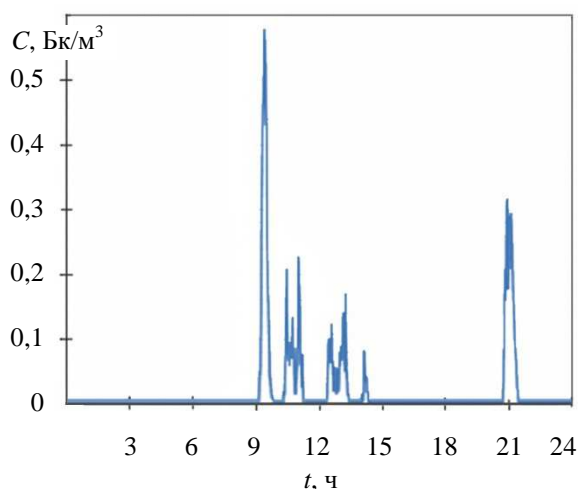
предприятиями, можно использовать усредненные годовые данные за год. При этом погрешность такой оценки может быть завышена в несколько раз. Однако для определения относительного влияния загрязняющих примесей неопределенность оценок будет заметно ниже.

При количественной оценке концентрации примеси в приземном воздухе для сравнительно кратковременных выбросов (от нескольких часов до суток) неопределенность в конкретной точке даже при наличии качественных метеопараметров может составлять до одного порядка величины.

Авторы выражают благодарность АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» за предоставление технологической информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Онищенко Г.Г., Новиков С.М., Рахманин Ю.А. и др.** Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. Под ред. Ю.А. Рахманина, Г.Г. Онищенко. М.: НИИ ЭЧ и ГОС, 2002. 408 с.
2. **Панченко С.В.** У истоков радиэкологии: Препринт IBRAE-2018-02, 2018. 36 с.
3. **Аракелян А.А., Ведерникова М.В., Киселев А.А. и др.** Анализ рисков для здоровья населения Обнинска от воздействия выбросов вредных веществ в атмосфере



Р и с. 5. Расчетная динамика объемной активности ^{131}I 21 и 22 мая 2015 г. в точке расположения воздухофильтрующей установки

- ру. — Проблемы анализа риска, 2018, т. 15, № 5, с. 26—37.
4. **Радиационная** обстановка на территории России и сопредельных государств в 2014, 2015, 2016, 2017 гг. Ежегодник НПО «Тайфун». Обнинск, 2015. — 350 с., 2016. — 344 с., 2017. — 398 с., 2018. — 360 с.
 5. **Отчет** по экологической безопасности за 2014 год. Росатом, Филиал АО «Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова», 2015. 26 с.
 6. **Гусев Н.Г., Беляев В.А.** Радиоактивные выбросы в биосфере. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
 7. **Gifford F.** Atmospheric dispersion calculations using the generalized Gaussian plume model. — Nucl. Saf., 1960, v. 2, p. 56.
 8. **Бызова Н.Л., Гарнер Е.К., Иванов В.Н.** Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчет распространения примеси. Л.: Гидрометеоздат, 1991.
 9. **Арутюнян Р.В., Припачкин Д.А., Семенов В.Н. и др.** Описание системы прогнозирования аварийного распространения радионуклидов в атмосфере для действующих российских АЭС (ПАРАД). Технология и функционирование: Препринт IBRAE—2016-02. 42 с.

Поступила в Редакцию 6.02.20

УДК 621.039.003,621.039.009

ВОЗМОЖНОСТЬ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ КАПИТАЛА НА ПОКРЫТИЕ РИСКА АВАРИЙ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ ПРИ РАЗВИТИИ АСММ

Журавлев И.Б. (Отраслевой центр аналитических исследований и разработок,

Частное учреждение «Наука и инновации», г. Москва)

e-mail: ibozhuravlev@rosatom.ru

Целью настоящей статьи является проверка гипотезы о реальной ответственности оператора АЭС за последствия тяжелой аварии в случае развития атомных станций малой мощности (АСММ) с предварительным обоснованием экономического ущерба.

Произошедшие тяжелые аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима» (Япония) привели к значительному экономическому ущербу. В статье оценивается ущерб от гипотетической тяжелой аварии на АЭС для заданного уровня доверия. Сделать это на основе только фактических данных об ущербе аварий не представляется возможным по трем причинам: малость выборки таких данных, оценка экономического ущерба от аварии на АЭС «Фукусима-1» постоянно уточняется, в силу самой природы сложных систем невозможно сделать вывод о масштабе катастрофических событий в таких системах на основе исторических данных. Для количественной оценки последствий событий, т.е. риска, происходящих в сложных системах, оказывается плодотворным применение теории экстремальных значений (EVT). Как теоретически показано, ущерб от гипотетической аварии на АЭС, оцененный с применением подхода на основе EVT, в 1000 раз превышает принятые в настоящее время лимиты страхования гражданской ответственности операторов АЭС за ущерб от ядерной аварии, что не позволяет говорить о

реальном страховании гражданской ответственности оператора АЭС. Нелинейный характер снижения ущерба от возможных аварий при переходе к меньшей единичной установленной мощности энергоблока (модуля) позволяет обеспечить реальную ответственность оператора АЭС за ущерб вследствие ядерной аварии.

Для сложных систем, к которым, безусловно, относятся АЭС, включая человеко-машинный интерфейс, характерно поведение, обладающее свойствами динамического хаоса — ограниченностью предсказуемости неким горизонтом прогноза, за пределами которого состояние системы перестает однозначно определяться начальными условиями. Функция распределения последствий событий в таких системах описывается степенным законом, при котором для плотности вероятности справедливо соотношение

$$p(x) \sim x^{-(1+\gamma)}. \quad (1)$$

Распределение, описываемое степенным законом, называют также распределением с «тяжелым хвостом». Данное свойство оказывает решающее влияние на возможность оценки моментов распределения, характеризующих случайную величину:

$$M_k = \int x^k p(x) dx. \quad (2)$$