В.А. Васильев

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РИСКА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СМЕРЧЕЙ (ТОРНАДО) НА НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ И ПРИРОДЫЕ ОБЪЕКТЫ

V.A. Vasilyev

QUANTITATIVE RISK ASSESSMENT UNDER THE INFLUENCE OF TORANADO ON NATIONAL ECONOMIC AND NATURAL OBJECTS

В статье рассмотрены принципы районирования территории России по смерчеопасности. Приведена оценка вероятности прохождения смерчей, через различные регионы России Определены расчетные характеристики вероятного смерча. Выполнена оценка риска воздействия смерчей на народнохозяйственные объекты.

Ключевые слова: смерч, риск, вероятность, ущерб, районирование, расчетные характеристики, класс интенсивности.

The article discusses the principles division of Russia's territory division by tornado hazard. The article gives estimate of the probability of tornado's appereance in different regions of Russia. Calculated characteristics of expectable tornado and risk assessment under the influence of toranado on national economic and natural objects were perfomed.

Key words: tornado, risk, probability, damage, zoning, calculated characteristics, class of intensity.

Введение

Природные процессы и явление нередко оказывают негативное воздействие на различные стороны жизни людей. Ураганы, тайфуны, смерчи, наводнения приводят к значительным материальным потерям, угрожают жизни и здоровью людей. Среди всей совокупности опасных природных явлений выделяются особо опасные [4, 7], имеющие сравнительно небольшую вероятность появления, но приносящие огромный материальный и социальный вред. Одним из таких природных образований является смерч.

Смерч — атмосферный вихрь, возникающий в грозовом облаке и распространяющийся вниз, часто до самой поверхности Земли, в виде темного облачного рукава или хобота диаметром в десятки и сотни метров. Существует недолго, перемещаясь вместе с облаком; может причинить большие разрушения. Смерч над сушей называют также тромбом (в США — торнадо). Смерчи обладают огромной разрушительной силой, приводящей к значительным материальным потерям и к серьезными социальным потрясениям. Поэтому исследование природы смерчей, их диагностики и прогнозирования является важнейшей теоретической и прикладной задачей современного природопользования.

Причиной возникновения торнадо является прохождение над местностью атмосферного фронта. При этом из верхних слоев атмосферы опускается масса воздуха

с определенными физическими свойствами, вытесняет слой воздуха с поверхности земли и занимает его место.

Иногда случается так, что спускающаяся масса воздуха не доходит до земной поверхности, а распределяется в пределах приземного слоя атмосферного воздуха. Метеорологам это явление известно давно. Они отслеживают движение атмосферных фронтов и составляют высотные карты погоды, необходимые авиации. Но самое важное в этом явлении то, что спускающийся сверху атмосферный воздух всегда несет с собой большой положительный электрический заряд. Откуда берется этот положительный заряд в верхних слоях атмосферы? Через атмосферу постоянно протекают ионные токи, которые достигают многих тысяч ампер. На сегодняшний день практически доказано [1, 5, 6], что наряду с метеорологической природой, связанной с термодинамическими процессами в атмосфере и образованием мощной кучево-дождевой облачности значительную роль, если не основную, играют электромагнитные процессы образования и эволюции смерчей.

Прохождение смерчей по урбанизированной территории связано со значительными разрушениями и причинением экономического социального и экологического ущерба в регионах. В ряде случаев возникают условия представляющие угрозу региональной безопасности. Так, например, смерч прошедший 22.05.2013 г. в Тульской области (населенный пункт Ефремово), привел к значительному повреждению более 200 жилых домов, 16 административных зданий и зданий социального назначения. Повалено 50 деревьев и 15 столбов линии электропередач [2]. 24.05.2013 г., смерч прошел через город Обнинск Калужской области, в частности по территории АЭС, повреждены крыши 19 домов. Существуют многочисленные подтверждения об интенсивности смерчей и ущербе, наносимом ими в различных регионах России.

Следует отметить, что с точки зрения особенностей воздействия смерчей на народнохозяйственные объекты и объекты природной среды можно выделить следующие основные задачи:

- воздействие на здания и сооружения (нагрузки);
- воздействия на наземные экосистемы;
- воздействия на водные объекты и водные экосистемы.

Цель настоящей работы заключается в количественной оценки вероятности возникновения смерчей в различных регионах России и определении риска от их воздействия для различных народнохозяйственных и природных объектов.

Исходные данные

В качестве исходных материалов в работе использовались данные, собранные в фондах ГМЦ России, Института географии РАН, а также исторические данные и данные, содержащиеся в отдельных публикациях [9, 10]. Эти данные представлены в виде каталога и включают в себя сведения о географических координатах и времени прохождения смерча.

География смерчей

На рис. 1 представлена карта распределения смерчей на Земле. Как видно из рисунка наиболее смерчеопасными районами является территория США и Европы.

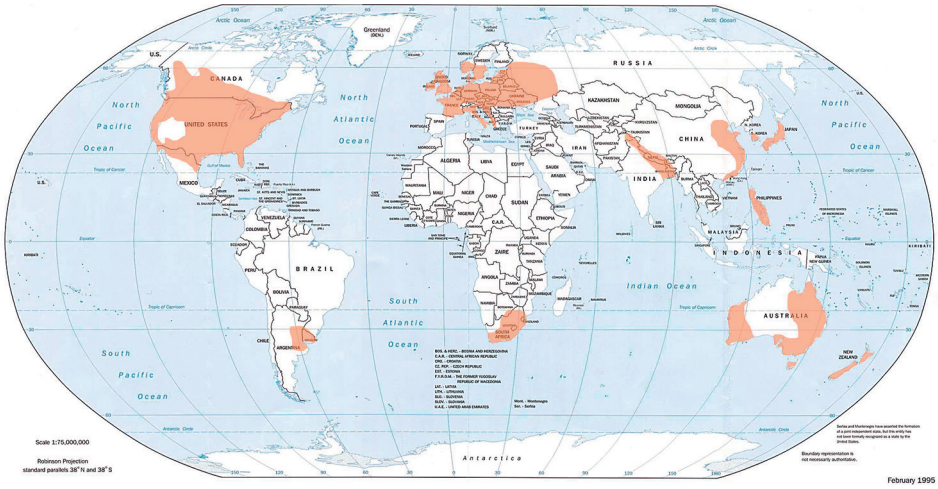

Рис. 1. Распределение смерчей на планете:
оранжевым цветом выделены районы повышенной смерчеопасности

Учитывая особую опасность смерчей для указанных территорий, была проведена процедура районирования территории в бывшем Советском Союзе. В основу районирования был положен принцип [8, 9] оценки вероятности прохождения и класса интенсивности смерчей для рассматриваемой территории. Он сводится к следующему.

Годовую вероятность прохождения смерча через заданную точку района площадью A с однородными физико-географическими условиями можно определить по формуле:

$$P_S = \frac{S}{AT}, \tag{1}$$

где S — суммарная площадь зоны разрушений от смерча в районе; T — эффективный период наблюдений.

Годовая вероятность прохождения смерча через заданную точку определяется на основе соотношения:

$$P = P_S\left[1 - F\left(k\right)\right], \tag{2}$$

где $F(k)$ — вероятность непревышения класса k среди смерчей, зарегистрированных в данном районе, который определяется характером разрушений по классификации Фуджиты [8].

Расчетный класс интенсивности k_P вероятного смерча на рассматриваемой территории определяется из условия:

$$F\left(k_P\right)=1-\frac{P_0}{P_S}, \tag{3}$$

где P_0 — принимается равной вероятному уровню безопасности (приемлемый риск [3]). В качестве такой величины принимается значение, равное 10^{-6}. Значение $F(k)$ определяется из условия $P_S > P_0$.

На основании рассмотренной методики было проведено районирование территории бывшего СССР и выделены смерчеопасные зоны и районы , представленные на рис. 2.

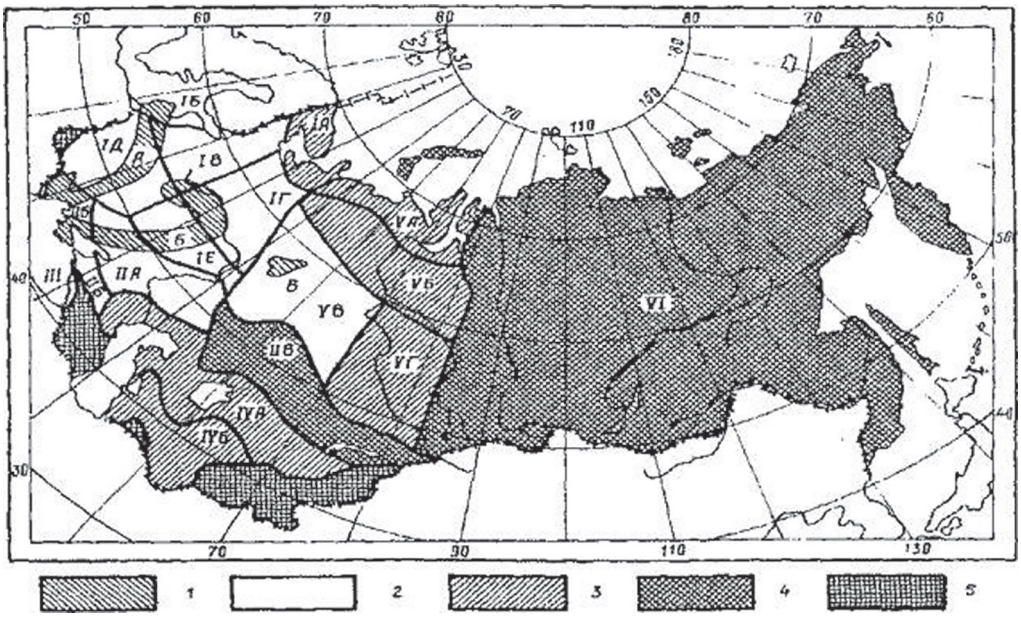

Рис. 2. Схема районирования территории бывшего СССР по смерчеопасности Масштаб 1:50 000 000: *1* — зоны повышенной смерчеопасности; *2* — смерчеопасные районы; *3* — несмерчеопасные районы; *4* — несмерчеопасные зоны; *5* — горные районы, *6* — малоизученные районы [8]

При этом выделяются зоны (районы) повышенной смерчеопасности (с индексами IБ, IВ, IД, IЕ , IIА, IIБ, III, VВ), несмерчеопасные территории (с индексами IА, IVА, IVБ, VА, VБ, VГ), а также малоизученные районы (с индексами IIВ, VI).

Общее число смерчей (N), прошедших через рассматриваемый район превышает число зарегистрированных смерчей (N_0) на количество незаоегистритованных слабых смерчей с $k \leqslant 1$. Зависимость фактического числа смерчей к числу зарегистрированных смерчей от класса интенсивности следует принимать в виде: $\alpha(k) = \alpha_0$ при $k \leqslant 1$, $\alpha(k) = 1$ при $k > 1$.

Количественные показатели различных зон и районов, в которых были зарегистрированы смерчи, представлены в табл. 1. Из таблицы видно, что основным классом интенсивности смерчей являются 0 и 1 класс.

Таблица 1

Основные характеристики зон (районов) смерчеопасности

Район (зона)	*A*, км^{2}10^3	*T*, лет	α_0	Распределение зарегистрированных смерчей по классам								Число смерчей за период *T*
				0	0,5	1	2	2,5	3	3,5	4	
по районам												
IА	197	20	4	1	–	–	–	–	–	–	–	1
IБ	60	20	2	2	–	1	–	–	–	–	–	3
IВ	525	20	2	4	3	4	5	2	–	–	–	18
IГ	668	52	1,5	7	–	8	–	9	1	5	1	32
IД	700	47	1,5	15	–	26	13	–	4	–	–	58
IЕ	414	45	2	12	–	17	2	–	1	–	–	32
IIА	534	26	3	3	–	8	7	–	–	–	–	18
IIБ	206	28	1,5	17	–	11	2	1	1	–	–	32
IIВ	970	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
III	7	34	1,5	17	–	2	–	–	–	–	–	19
IVА	1044	26	4	2	–	–	1	–	–	–	–	3
IVБ	819	26	3	4	–	1	–	–	–	–	–	5
VА	510	26	4	2	–	–	–	–	–	–	–	2
VБ	842	30	4	1	–	2	1	–	–	–	–	4
VВ	1498	53	3	2	–	13	10	–	–	–	–	25
VГ	1037	26	4	1	–	7	–	–	–	–	–	8
по зонам повышенной смерчеопасности												
А	376	36	1,5	12	3	30	17	1	3	–	–	66
Б	494	44	1,5	26	–	26	13	1	8	1	1	76
В	96	32	2	1	–	7	3	–	–	–	–	11

Таблица 2

Фрагмент классификации интенсивности смерчей по шкале Фуджиты

Класс интенсивности	Вращательная скорость, м/с.	Характер разрушений
0	до 33	Слабые повреждения; некоторые повреждения антенн; сломаны ветви деревьев
1	33–49	Средние повреждения; сорваны листы кровли с крыши дачных домов; разбиты окна; некоторые деревья вырваны с корнем; перевернуты легкие автоприцепы

Заметим, что при появлении смерчей с более высоким классом интенсивности характер разрушений оказывается более значительным Так, например, при прохождении смерчей 2 класса интенсивности (скорость вращения 50–69 м/с) наблюдаются весьма значительные повреждения: сорваны крыши с каркасов домов; крупные деревья вырваны с корнем и унесены; опрокинуты железнодорожные товарные вагоны; снесены автомобили с шоссе и т.д.

Основные характеристики смерчей

Исходной характеристикой для оценки смерчеопасности территории является класс интенсивности смерча k, на основании которого определяются следующие производные характеристики:

– максимальная горизонтальная скорость вращательного движения стенки смерча

$$V_K = 6{,}3\left(k + 2{,}5\right)^{1{,}5} \text{ м/с}, \tag{4}$$

– поступательная скорость движения смерча

$$U_K = 1{,}575\left(k + 2{,}5\right)^{1{,}5} \text{ м/с}, \tag{5}$$

– длина пути прохождения смерча

$$L_K = 1{,}609 \cdot 10^{0{,}5\left(K - 0{,}5\right)} \text{ км}, \tag{6}$$

– ширина пути прохождения смерча

$$W_K = 1{,}609 \cdot 10^{0{,}5\left(K + 1{,}5\right)} \text{ м}, \tag{7}$$

– перепад давления между периферией и центром воронки смерча

$$\Delta p_K = 0{,}486\left(k + 2{,}5\right)^3 \text{ гПа}, \quad \left(0 \le k \le 4\right). \tag{8}$$

Характеристики вероятного смерча для зон повышенной смерчеопасности и смерчеопасных районов приведены в табл. 3. Кроме этого в табл. 4 приведен диапазон изменения характеристик V_K, U_K, L_K, W_K, Δp_K для различных классов интенсивности. Эти расчеты проводятся только в том случае, если выполняется условие $P_S > P_0$. Если это условие не выполняется, то расчет не проводят и пункт принимается безопасным по вероятным воздействиям смерчей.

Модель воздействия смерчей на заданный район

Общее число смерчей N, прошедших через район повышенной смерчеопасности, и суммарную площадь разрушений S выражений

$$N = \sum_{k=0}^{l} n_k \alpha\left(k\right), \quad S = \sum_{k=0}^{l} n_k \alpha\left(k\right) L_k W_k, \tag{9}$$

где n_k — число зарегистрированных смерчей класса k; l — наибольший наблюденный класс смерча.

Таблица 3

Расчетные характеристики смерчей

Зона (район) повышенной смерчеопасности	$P_S \cdot 10^{-6}$, год$^{-1}$	k_p	V_p, м/с	U_p, м/с	Δp_p, гПа
по зонам повышенной смерчеопасности					
А	30	2,56	72	18	64
Б	87	3,58	94	24	109
В	12	1,93	59	15	42
по смерчеопасным районам					
IБ	1,6	0,56	34	8	14
IВ	3,6	1,75	55	14	37
IГ	39	3,69	97	24	115
IД	14	2,75	78	19	70
IЕ	6,6	2,12	62	16	48
IIА	5,6	2,01	60	15	44
IIБ	24	2,71	75	19	69
III	19	1,07	43	11	22
VВ	1,4	1,47	50	12	30

Таблица 4

Диапазон изменения основных характеристик смерчей по классам интенсивности

Класс интенсивности	Диапазон характеристик				
	Максимальная скорость вращательного движения (V), м/с	Поступательная скорость движения смерча (u), м/с	Длина пути прохождения смерча (L), км	Ширина пути прохождения смерча (W), м	Перепад давления Δp, гПа
0	до 33	до 8	до 1,6	до 16	до 13
1	33–49	8–12	1,6–5,0	16–50	14–31
2	50–69	13–17	5,1–16	51–160	32–60
3	70–92	18–23	16,1–50,9	161–509	61–104
4	93–116	24–29	51–160	510–1600	105–166

Эмпирическая интегральная вероятность $F(k)$, принимаемая для заданного k-го класса n_k значений, определяется следующим образом:

$$F_i(k) = \frac{i\alpha_0 L_0 W_0}{S} \text{ при } k = 0 \ (i = 1,\ldots,n_0),$$

$$F_i(k) = \frac{1}{S}\sum_{j=0}^{k-1} n_j \alpha(j) L_j W_j + \frac{i\alpha(k) L_k W_k}{S} \text{ при } k > 0 \ (i = 1,\ldots,n_k). \quad (10)$$

Получаемые при этом точки наносятся на график в координатах [$\ln F(k)$, k] и апроксимируются в виде прямой

$$-\ln F\left(k\right) = ak + b. \tag{11}$$

Коэффициенты a и b определяются с помощью метода наименьших квадратов по формулам:

$$a = \frac{\left\langle k\right\rangle\left\langle \ln F\left(k\right)\right\rangle - \left\langle k \ln F\left(k\right)\right\rangle}{\left\langle k^2\right\rangle - \left\langle k\right\rangle^2},$$

$$b = \frac{\left\langle k\right\rangle\left\langle k \ln F\left(k\right)\right\rangle - \left\langle k^2\right\rangle\left\langle \ln F\left(k\right)\right\rangle}{\left\langle k^2\right\rangle - \left\langle k\right\rangle^2}. \tag{12}$$

Здесь символом <*> обозначена процедура осреднения переменной X по формуле

$$\left\langle X\right\rangle = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} x_j,$$

где $N = \sum_{k=0}^{l} n_k$ — число зарегистрированных смерчей. Расчетный класс интенсивности вероятного смерча определяется следующим образом:

$$k_p = -\frac{1}{a}\left[\ln\left(1 - \frac{P_0 AT}{S}\right) + b\right]. \tag{13}$$

После этого по формулам (4)–(8) рассчитываются характеристики вероятного смерча.

Численный пример

В качестве примера рассмотрим применение данной методики на конкретном примере. 22 мая 2013 г. через центр города Ефремов Тульской области прошел смерч, причинившей серьезные повреждения хозяйству города [2]. Город Ефремов расположен в 310 км, к югу от Москвы и в 140 км от Тулы. Площадь — 21,8 км^2. Население — 37 608 (2014).

Ущерб от прохождения смерча оказался существенным: повреждено 179 жилых домов–выбиты стекла, сорваны листы кровли, повреждены крыши пяти школ и гимназий, двух детских садов, также пострадали здания администрации, музея, прокуратуры, швейной фабрики и 18 торговых зданий. Повалено более 50 деревьев и 15 столбов освещения. За медицинской помощью обратились 21 житель города. Один из них госпитализирован.

По оценкам правительства Тульской области суммарный ущерб составил 150 млн руб.

Судя по свидетельствам очевидцев и характеру разрушений смерч можно отнести к I классу интенсивности по шкале Фуджиты. Город Ефремов находится в пределах смерчеопасного района IВ, и рядом с зоной повышенной смерчеопасности Б (рис. 2). Из табл. 1 и 2 следует, что по явление смерчей I интенсивности в этой зоне явление отнюдь не редкое. В то же время поскольку рассматриваемый смерч не внесен в базу данных необходимо определить его вероятные характеристики.

С учетом данных табл. 1 следует принять:

$$n_0 = 4, \quad n_{0,5} = 3, \quad n_1 = 5, \quad n_2 = 5, \quad n_3 = 2, \quad A = 5{,}25 \cdot 10^5 \text{ км}^2, \quad \alpha_0 = 2.$$

При этом в число смерчей I класса интенсивности добавлен 1 случай, который рассматривается в данном эксперименте. По формулам (1), (9) определяется суммарная площадь разрушений S и годовая вероятность прохождения смерчей через рассматриваемый пункт:

$$S = 4{,}32 \text{ км}^2, \quad P_S = 3{,}7 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}.$$

Отсюда следует, что вероятностный уровень безопасности, равный 10^{-6} превышен, кроме этого несколько превышен уровень безопасности, характерный дл района IВ в целом (табл. 3).

Для оценки характеристик вероятного смерча определим значение эмпирической интегральной вероятности $F(k)$, а также $\ln F(k)$. Эти данные приведены в табл. 5.

Таблица 5

Эмпирическая интегральная вероятность

k	0	0	1	2
$F(k)$	$2{,}88 \cdot 10^{-3}$	$5{,}76 \cdot 10^{-3}$	$8{,}64 \cdot 10^{-2}$	$1{,}16 \cdot 10^{-2}$
$\ln F(k)$	−5,85	−5,16	−4,75	−4,46

На основании этих данных находим:

$$\langle k \rangle = 0{,}66, \quad \langle k^2 \rangle = 1{,}66, \quad \langle \ln F(k) \rangle = -3{,}91, \quad \langle k \ln F(k) \rangle = -0{,}29.$$

По формулам (12) и (13) находим коэффициенты $a = 1{,}89$, $b = 3{,}17$ и расчетный класс вероятного смерча $k_p = 1{,}37$. Другие производные расчетные характеристики определяются по формулам (4)–(8) и принимают следующие значения $V_p = 54$ м/с, $U_p = 14$ м/с, $\Delta p_p = 30$ гПа.

Таким образом, результаты численного эксперимента достаточно хорошо согласуются с расчетами, выполненными для района в целом. Класс интенсивности вероятного смерча оказался несколько завышенным с классом по шкале Фуджиты, но это как раз свидетельствует в пользу предложенной методики, позволяющей получать с ее помощью расчетные характеристики, которые можно рассматривать как консервативные.

Определив характеристики вероятного смерча можно оценить величину риска. Как известно риск — количественная мера опасности с учетом ее последствий [3]. Следовательно оценка риска должна быть связана с оценкой ущерба. Поэтому риск R может быть определен как произведение вероятной опасности рассматриваемого события на магнитуду (меру) ожидаемого ущерба Z:

$$R = P \cdot Z. \tag{14}$$

При анализе смерчеопасности риск будет зависеть от класса интенсивности смерча, причем эта зависимость будет наверняка нелинейной, например, экспоненциальной:

$$Z = Z_0\left(1 - \exp\left(-\alpha k_p\right)\right). \tag{15}$$

Коэффициенты Z_0 и α определяются на основе специальных экономических исследований. К сожалению, в настоящее время практически отсутствуют экспериментальные данные по количественной оценке ущерба при прохождении, что затрудняет проведение необходимых исследований.

Смерч — это чрезвычайно мелкомстабное, локальное атмосферное явление, которое очень трудно прогнозировать. Тем не менее выполненные оценки показывают эффективность статистического подхода к решению этой задачи и позволяют связать риски от прохождения смерчей с потенциальным ущербом для территории.

Литература

1. *Боев А.Г.* Электромагнитная теория смерча. // Радиофизика и радиоастрономия, 2009, т. 14, № 2, с. 121–149.
2. Более 200 зданий повреждены микросмерчем в Тульской области. // Газета.Ру, 22 мая 2013.
3. *Ваганов В.А., Им М.-С.* Экологический риск. // СПб., 1999. — 113 с.
4. Геофизика опасных природных воздействий. СНиП 22-01-95. — М., 1996.
5. *Лита Л.М., Смит Р.К.* Численное моделирование структуры торнадо и его генезиса. // Интенсивные атмосферные вихри. Под ред. Л. Бенгстона, Д. Лайтхилла. — М.: Мир, 1985. — 367с.
6. *Мазуров Г.И, Васильев В.А, Акселевич В.И.* Анализ характеристик смерчей в России за полтора столетия. // Метеоспектр, 2012, № 1, с. 36–41.
7. *Наливкин Д.В.* Смерчи. — М.: Наука, 1984. — 111 с.
8. Правила и нормы ядерной и радиационной безопасности Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на ядерно и радиационно опасных объектах. ПНАЭ–Г-05-035-94. Утверждены Постановлением Госатомнадзора России от 09.04.1995, № 4.
9. РБ-022-01.Руководство по безопасности. Рекомендации по оценке характеристик смерча для объектов использования атомной энергетики. Утверждены Постановлением Госатомнадзора России от 28.12.2001, № 17.
10. *Симиу Э., Сканлан Р.* Воздействие ветра на здания и сооружения. — М.: Стройиздат, 1984. — 365 с.