

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ВОЗДУШНЫХ, НАЗЕМНЫХ И ПОДВОДНЫХ ВЗРЫВОВ ОПАСНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ****А.А. Александров, В.А. Котляревский, В.И. Ларионов, С.П. Сушчев**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

e-mail: rector@bmsu.ru; kotlyarevsky22@mail.ru; lar@esrc.ru; esrc@esrc.ru

*Проанализированы основные поражающие факторы падения опасных космических тел и возможные последствия их воздействий на природные и техногенные объекты. Представлены методы прогнозирования и оценки последствий для населения и территорий взрывов космических тел в воздухе, на земной поверхности и в акватории с учетом физико-географических условий местности и уровня ее урбанизации. Приведены результаты моделирования последствий взрывов и сценарии катастрофического распространения волн, вызванных подводным взрывом, и возможной опасности при ударе космического тела о земную поверхность. При оценке социальных последствий воздушных, наземных и подводных взрывов опасных космических тел использован вероятностный подход. Это обусловлено тем, что разрушение зданий и ситуация, в которой могут оказаться люди, носит ярко выраженный случайный характер.*

**Ключевые слова:** опасное космическое тело, взрыв, земная поверхность, акватория, поражающие факторы, прогнозирование последствий, моделирование.

**MODELING CONSEQUENCES OF AIR, LAND AND UNDERWATER EXPLOSIONS OF DANGEROUS SPACE BODIES****A.A. Aleksandrov, V.A. Kotlyarevskiy, V.I. Larionov, S.P. Sushchev**

Bauman Moscow Technical University, Moscow, Russian Federation

e-mail: rector@bmsu.ru; kotlyarevsky22@mail.ru; lar@esrc.ru; esrc@esrc.ru

*The major damage effects of dangerous space bodies falling and possible consequences of their impacts on natural and technogenic objects are analyzed. Methods of forecasting and evaluating of consequences of space bodies explosions in air, on earth's surface and inside water area for the population and territories are presented taking into account physiographic conditions of the district and its urbanization level. Results of explosions' consequences modeling and scenarios of catastrophic waves propagation caused by underwater explosion and possible danger from space body impact to the earth's surface are given. The probabilistic approach is used for evaluating of social consequences of air, land and underwater explosions by dangerous space bodies. This is due to the fact that the destruction of buildings and the situation in which people can be, has a clearly pronounced random nature.*

**Keywords:** dangerous space body, explosion, earth's surface, water area, damage effects, consequences' forecasting, modeling.

Падение опасных космических тел может приводить к большим человеческим потерям и значительному материальному ущербу. Это стало очевидным после падения Челябинского метеорита. В настоящее время защита нашей планеты от катастрофических столкновений с астероидами и ядрами комет, прогнозирование последствий и

обеспечение минимального ущерба от этих столкновений являются актуальными задачами.

Для предотвращения последствий астероидно-кометной опасности необходимо заблаговременно определить место, время и мощность взрыва, а также оценить возможные последствия его воздействия на объекты инфраструктуры в районе катастрофы. При моделировании катастроф, связанных с падениями опасных тел, и оценке последствий их воздействий необходимо проводить расчеты последствий взрывов космического тела в воздухе, удара (взрыва) о земную поверхность, а также взрыва в акватории на определенной глубине.

**Воздушный взрыв космического тела.** При воздушном взрыве космического тела исходная кинетическая энергия приблизительно распределяется в следующих соотношениях (с коэффициентом энергетической доли  $K_n$ ) [1]:

- энергия торможения с нагревом воздуха 3 %;
- энергия образования огненного шара 7 %;
- взрывная энергия генерирования воздушных ударных волн 60 %;
- энергия дробления на мелкие метеориты и рассеиваемая в атмосфере 30 %.

**Огненный шар.** *Параметры огненного шара.* Диаметр огненного шара, м, можно оценить по формуле [1]

$$D = 3,79M_\theta^{1/3},$$

где  $M_\theta = K_n m$  — расчетная масса энергетического источника;  $m = 0,52d^3\rho$  — масса источника с характерным размером (диаметром)  $d$ , м;  $\rho$  — плотность каменного космического тела (2000...4000 кг/м<sup>3</sup>).

Воспламеняющее и поражающее действие огненного шара определяется величиной теплового потока  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, посредством соотношения [1]

$$\frac{q}{\theta^4} = \frac{G(2R_s/R)^2}{F + (2R_s/R)^2},$$

где  $R$  — расстояние до центра огненного шара радиусом  $R_s = D/2$ ;  $G = 2,04 \cdot 10^4/b_0$ ;  $b_0 = b/\sqrt[3]{q_r}$ ;  $b = 6,34 \cdot 10^{10}$  — коэффициент, полученный по данным экспериментов с ракетными топливами;  $q_r = 4,7 \times 10^7$  Дж/кг — удельная теплота сгорания;  $F = 161,7$ ;  $\theta = 2300$  К.

Импульс теплового излучения (доза)  $Q$ , кДж/м<sup>2</sup>, определяется величиной теплового потока  $q$ , кВт/м<sup>2</sup>, и временем действия  $t$ , с:

$$Q = qt.$$

*Поражающее действие огненного шара.* Степень поражения человека от действия тепловой радиации оценивают по величине теплового потока и времени пребывания в зоне облучения.

При обосновании времени облучения учитывается время реагирования и достижения человеком безопасной зоны (20... 30 с). Вероятность поражения человека тепловым воздействием можно оценить по методике [2] с применением формулы для “пробит-функции”:

$$P_r = -14,9 + 2,56 \ln(tq^{1,33}),$$

где  $t$  — время пребывания в зоне облучения, с;  $q$  — интенсивность теплового излучения, Вт/м<sup>2</sup>.

Предельные значения поражающей интенсивности теплового излучения  $q$  и импульса (дозы)  $Q$ , вызывающие поражение человека различной степени, приведены в табл. 1 [2].

Таблица 1

**Предельные значения поражающей интенсивности  $q$  и импульса  $Q$  теплового излучения [2]**

Степень поражения человека	$q$ , кВт/м <sup>2</sup>	$Q$ , кДж/м <sup>2</sup>
Без негативных последствий в течение длительного времени	1,4	—
Безопасно для человека в брезентовой одежде	4,2	—
Непереносимая боль через 20... 30 с		175
Ожог:		
1-й степени через 15... 20 с	7,0	123
2-й степени через 30... 40 с		245
Воспламенение хлопка-волокна через 15 мин		6300
Непереносимая боль через 3... 5 с		42
Ожог:		
1-й степени через 6... 8 с	10,5	74
2-й степени через 12... 16 с		147

Предельное значение теплового излучения в течение длительного времени для человека без негативных последствий составляет 1,4 кВт/м<sup>2</sup>.

**Воздушная ударная волна.** *Параметры воздушной ударной волны.* Основными параметрами, определяющими интенсивность ударной волны, являются избыточное давление на фронте  $\Delta P_\Phi$  и длительность фазы сжатия. Эти параметры зависят от массы источника взрыва (т.е. энергии взрыва) и расстояния  $R$ .

Доля энергии, приходящаяся на воздушную ударную волну, приближенно равна 60 %, т.е. расчетная масса источника взрыва  $C = 0,6m$ .

Давление на фронте волны, МПа, определяется по формуле Садовского [2]

$$\Delta P_\Phi = \frac{0,084}{\bar{R}} + \frac{0,27}{\bar{R}^2} + \frac{0,7}{\bar{R}^3},$$

где  $\bar{R} = R/\sqrt[3]{C}$ , м/кг<sup>1/3</sup>;  $R = \sqrt{R_0^2 + H^2}$ , м;  $R_0$  — расстояние от эпицентра взрыва до рассматриваемой точки на земной поверхности, м;  $H$  — высота взрыва, м.

При нормальном отражении воздушной ударной волны от земной поверхности (в эпицентре  $R_0 = 0$ ) давление в отраженной волне возрастает до значения  $\Delta P_{\text{отр}}$ :

$$\Delta P_{\text{отр}} = K_{\text{отр}} \Delta P_{\phi},$$

где  $K_{\text{отр}} = \frac{14 + 8\Delta P_{\phi}/P_0}{7 + \Delta P_{\phi}/P_0}$  – коэффициент отражения. При  $R_0 > 0$  коэффициент отражения определяется углом встречи ударной волны с поверхностью грунта или элемента риска.

*Поражающее действие воздушной ударной волны.* На основе экспериментальных исследований [2] установлено, что вероятность разрушения строительных конструкций от воздействия взрывных нагрузок подчиняется нормальному закону.

Характерные параметры нормального закона (математические ожидания  $M$  интенсивности поражающих факторов, вызывающих не менее определенных степеней разрушения (повреждения) зданий, и средние квадратические отклонения  $\sigma$ ) приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Математические ожидания  $M$  и средние квадратические отклонения  $\sigma$  избыточных давлений ударной волны, кПа**

Тип здания	Степень разрушения здания							
	Слабая		Средняя		Сильная		Полная	
	$M$	$\sigma$	$M$	$\sigma$	$M$	$\sigma$	$M$	$\sigma$
Со стенами типа “сэндвич”	20	4	40	8	60	12	90	16
Панельное	20	3,8	37,5	7,5	57,5	11,3	80	15
Кирпичное	14	2,3	22,5	5,5	42,5	7,8	60	11

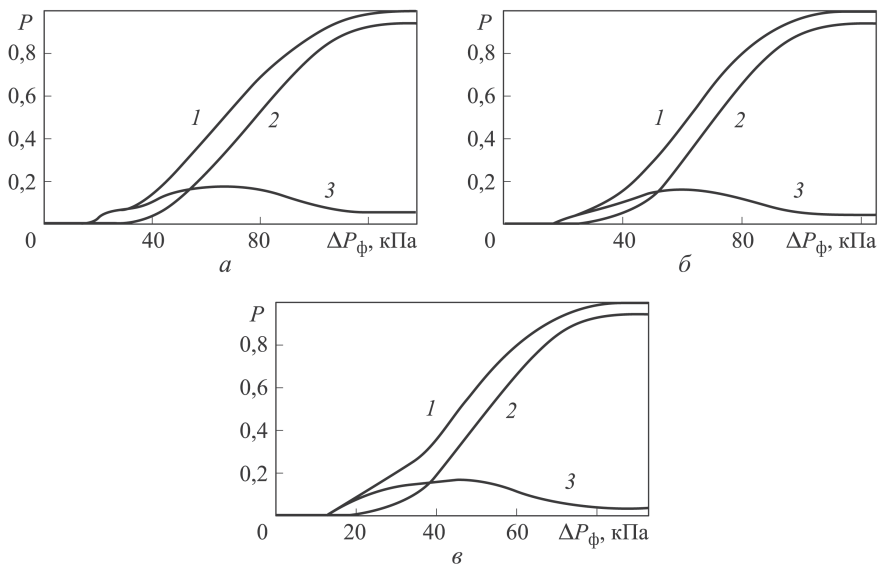
Значения вероятности поражения людей в зданиях (структура потерь) от действия взрывной волны приведены в табл. 3. Законы поражения людей в зданиях при различной степени их разрушения представлены на рис. 1.

Таблица 3

**Значения вероятности поражения людей в зданиях в зависимости от их степени разрушения [2]**

Структура потерь	Степень разрушения здания			
	Слабая	Средняя	Сильная	Полная
Общие	0,05	0,20	0,6	1,00
Безвозвратные	0	0,05	0,4	0,95
Санитарные	0,05	0,15	0,2	0,05

Для расчетов территория населенного пункта разбивается на элементарные площади. Для каждой площадки подготавливаются исходные данные, включающие в себя типы зданий и плотность населения.



**Рис. 1. Законы поражения людей в зданиях с легким каркасом со стенами типа “сэндвич” (а), в панельных (б) и кирпичных (в) зданиях от действия взрыва в зависимости от давления  $\Delta P_{\phi}$  ударной волны:**

1 – общие потери; 2 – безвозвратные потери; 3 – санитарные потери

Ожидаемое число пораженных  $M(N)$  от ударной волны в целом по населенному пункту с учетом их размещения в зданиях различного типа определяется по формуле:

$$M(N) = \sum_{j=1}^n \iint_S \int_0^{\Delta P_{\max}} \int_{P_{\min}}^{P_{\max}} P_{jk}(\Delta P) f(x, y, \Delta P) \psi(x, y) f_z(t) d(\Delta P) dt dx dy, \quad (1)$$

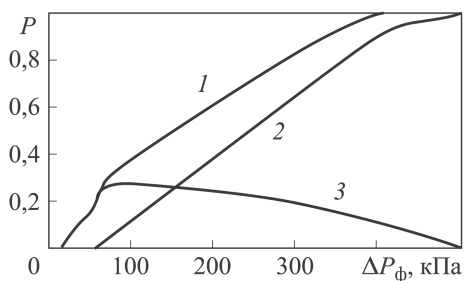
где  $n$  – число рассматриваемых типов зданий;  $S$  – площадь населенного пункта;  $\Delta P_{\min}$ ,  $\Delta P_{\max}$  – интервалы возможных давлений в пределах заданной площадки;  $P_{jk}(\Delta P)$  – вероятность поражения людей  $k$ -й степени при повреждении здания  $j$ -го типа давлением  $\Delta P$  (рис. 2);  $\psi(x, y)$  – плотность населения в пределах рассматриваемой площадки;  $f_z(t)$  – функция, характеризующая размещение людей в зданиях в течение суток;  $f(x, y, \Delta P)$  – плотность вероятности случайной величины  $\Delta P$  в точке с координатами  $(x, y)$ , определяемая с учетом эллипса рассеивания взрыва.

Значения вероятности поражения людей вне зданий (на открытой местности) от действия взрывной волны приведены в табл. 4, 5. Законы поражения людей на открытой местности представлены на рис. 2.

Таблица 4

**Значения вероятности общего поражения людей на открытой местности от взрывной волны в зависимости от давления [2]**

Давление, кПа	15	15... 35	35... 65	65... 120	120... 400	Более 400
Вероятность	0	0,05	0,15	0,35	0,75	1,0



**Рис. 2. Законы поражения людей на открытой местности при воздействии взрывной волны в зависимости от давления  $\Delta P_{\phi}$  ударной волны:**  
 1 — общие потери; 2 — безвозвратные потери; 3 — санитарные потери

Таблица 5

**Значения безвозвратных потерь людей на открытой местности от взрывной волны в зависимости от давления [2]**

Давление, кПа	66	250	500
Вероятность	0	0,5	1,0

**Наземный взрыв космического тела.** При наземном взрыве космического тела исходная энергия ориентировочно распределяется в соотношениях [1]:

- энергия торможения с нагревом воздуха 3 %;
- энергия образования огненного шара 7 %;
- взрывная энергия генерирования воздушных ударных волн 20 %;
- энергия на проникание в грунт с нагревом породы 4 %;
- энергия кратерообразования с выбросом породы 5 %;
- энергия генерирования сейсмических волн 60 %;
- энергия электромагнитного излучения 1 %

Основная часть энергии расходуется на генерирование воздушных ударных и сейсмических волн. Оценки параметров и поражающего действия воздушной ударной волны рассмотрены выше. При определении массы источника учитывают энергетическую долю процессов.

**Параметры поражающих факторов.** При высокоскоростном ударе космического тела о земную поверхность возможно его проникание в грунт с выбросом породы и образованием кратера, параметры которого можно определить по приближенным эмпирическим соотношениям.

Объем кратера  $\Omega$  определяется по формуле [3, 4]

$$\Omega = \frac{2Q_{\Omega} \cos \alpha}{2,62H_B},$$

где  $Q_{\Omega} = K_{\Omega}Q$  — энергия удара;  $\alpha$  — угол встречи удара;  $H_B$  — твердость породы по Бринеллю.

Глубина кратера  $h$  задается соотношением [5]

$$h = 1,2 \left( \frac{\rho_0}{\rho} \right)^{2/3} r \ln \left( 1 + \frac{\rho_0^{2/3} \rho^{1/3} V_{\Omega}^2}{H_B} \right),$$

где  $r$  — радиус космического тела, приведенного к сфере;  $V_{\Omega}$  — скорость удара;  $\rho_0$  — плотность космического тела;  $\rho$  — плотность породы (грунта).

Сейсмический эквивалент магнитуды  $M_s$  эффекта удара определяется по формуле [1]

$$M_s = \frac{\lg Q - B_1}{\alpha_1}.$$

Здесь  $Q = Q_0 \cdot 10^7$  — энергия, эрг;  $B_1, \alpha_1$  — константы для средних значений сейсмической интенсивности ( $B_1 = 11,5; \alpha_1 = 1,65B_1$ );  $Q_0 = (1/2)m_0V_{\Omega}^2$ ;  $m_0 = 0,6m$  — расчетная масса;  $m$  — масса космического тела.

Интенсивность сейсмических сотрясений  $I$  на конкретной площадке по 12-балльной шкале определяется в зависимости от магнитуды  $M_s$ , эпицентрального расстояния  $R_{\Sigma}$ , км, глубины энергетического источника  $h$ , км, и региональных констант  $a_3, b_3$  и  $c_3$  (по Н. Шебалину для России  $a_3 = 3, b_3 = 1,5$  и  $c_3 = 3,5$ ):  $I = a_3 + b_3M_s - c_3 \lg \sqrt{R_{\Sigma}^2 + h^2}$ .

С учетом широкого диапазона параметров опасных космических тел в табл. 6 приведены некоторые данные по их энергетическому спектру. Масса тела определялась приведением к сфере с плотностью материала  $3000 \text{ кг/м}^3$ . Значения магнитуды в зависимости от энергии источника даны в табл. 7.

Таблица 6

**Энергетический спектр, МДж, космических тел в диапазонах их диаметров  $d$  и скоростей удара  $V_{\Omega}$  с земной поверхностью**

$d$ , м	$m_0$ , кг	$V_{\Omega}$ , км/с					
		0,5	1	5	10	25	50
5	0,196	$2,45 \cdot 10^4$	$9,82 \cdot 10^4$	$2,45 \cdot 10^6$	$9,82 \cdot 10^6$	$6,14 \cdot 10^7$	$2,45 \cdot 10^8$
10	1,57	$1,96 \cdot 10^5$	$7,85 \cdot 10^5$	$1,96 \cdot 10^7$	$7,85 \cdot 10^7$	$4,91 \cdot 10^8$	$1,96 \cdot 10^9$
20	12,57	$1,57 \cdot 10^6$	$6,28 \cdot 10^6$	$1,57 \cdot 10^8$	$6,28 \cdot 10^8$	$3,93 \cdot 10^9$	$1,57 \cdot 10^{10}$
50	$1,96 \cdot 10^2$	$2,45 \cdot 10^7$	$9,82 \cdot 10^7$	$2,45 \cdot 10^9$	$9,82 \cdot 10^9$	$6,14 \cdot 10^{10}$	$2,45 \cdot 10^{11}$
100	$1,57 \cdot 10^3$	$1,96 \cdot 10^8$	$7,85 \cdot 10^8$	$1,96 \cdot 10^{10}$	$7,85 \cdot 10^{10}$	$4,91 \cdot 10^{11}$	$1,96 \cdot 10^{12}$
500	$1,96 \cdot 10^5$	$2,45 \cdot 10^{10}$	$9,82 \cdot 10^{10}$	$2,45 \cdot 10^{12}$	$9,82 \cdot 10^{12}$	$6,14 \cdot 10^{13}$	$2,45 \cdot 10^{14}$
1000	$1,57 \cdot 10^6$	$1,96 \cdot 10^{11}$	$7,85 \cdot 10^{11}$	$1,96 \cdot 10^{13}$	$7,85 \cdot 10^{13}$	$4,91 \cdot 10^{14}$	$1,96 \cdot 10^{15}$

Таблица 7

**Значения магнитуды  $M_s$  сейсмике в зависимости от кинетической энергии  $Q_0$  космического тела в момент удара о земную поверхность**

$Q_0$ , МДж	$M_s$	$Q_0$ , МДж	$M_s$	$Q_0$ , МДж	$M_s$	$Q_0$ , МДж	$M_s$
50	1,94	$5 \cdot 10^4$	3,76	$5 \cdot 10^9$	6,78	$5 \cdot 10^{14}$	9,82
100	2,12	5105	4,36	$5 \cdot 10^{10}$	7,39	$5 \cdot 10^{15}$	10,42
500	2,54	$5 \cdot 10^6$	4,97	$5 \cdot 10^{11}$	8,00	$5 \cdot 10^{16}$	11,03
1000	2,73	$5 \cdot 10^7$	5,58	$5 \cdot 10^{12}$	8,61	$5 \cdot 10^{17}$	11,64
5000	3,15	$5 \cdot 10^8$	6,18	$5 \cdot 10^{13}$	9,21	$5 \cdot 10^{18}$	12,24

### Оценка последствий при наземном взрыве космического тела.

Оценка последствий для населения. Последствия оценивают с учетом размещения людей в различных типах зданий.

При определении вероятности поражения людей (общие, безвозвратные, санитарные потери) при сейсмическом воздействии интенсивностью  $I$  учитываются степени разрушения (повреждения) зданий. Расчеты проводятся по формуле

$$P_{jk}(I) = \sum_{i=1}^5 P_{Bi}(I) P(C_k|B_i),$$

где  $P_{jk}(I)$  — вероятность поражения людей  $k$ -й степени при сейсмическом сотрясении интенсивностью  $I$  в здании  $j$ -го типа;  $P_{Bi}(I)$  — вероятность наступления  $i$ -й степени разрушения здания при заданном значении интенсивности сейсмического сотрясения  $I$ ;  $P(C_k|B_i)$  — вероятность получения людьми  $k$ -й степени поражения при условии, что наступила  $i$ -я степень разрушения здания.

Средние показатели вероятностей поражения людей в зданиях представлены в табл. 8. Распределение поражений населения по степени их тяжести проводится с учетом соотношений: легкая 40 %; средней тяжести 20 %; тяжелая 40 %.

Вероятность поражения людей  $k$ -й степени в пределах рассматриваемой площадки от сотрясений различной интенсивности определяется по формуле

$$P(x, y) = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} P_{jk}(I) f(x, y, I) dI.$$

Здесь  $I_{\min}$  и  $I_{\max}$  — интервалы возможной интенсивности сотрясений в пределах заданной площадки;  $f(x, y, I)$  — плотность вероятности случайной величины  $I$  в точке с координатами  $(x, y)$ .

Таблица 8

#### Вероятность поражения людей при различных степенях разрушения зданий

Структура потерь	Степень разрушения зданий				
	Слабые повреждения	Умеренные повреждения	Тяжелые повреждения	Частичные разрушения	Обвалы
Общие	0	0,01	0,11	0,6	0,97
Безвозвратные	0	0	0,02	0,23	0,60
Санитарные	0	0,01	0,09	0,37	0,37

П р и м е ч а н и е. Степени разрушения зданий приняты в соответствии с международной шкалой сейсмической интенсивности MMSK-86.

Математическое ожидание людских потерь  $M(N)$  в целом по населенному пункту с учетом их размещения в зданиях  $j$ -го типа определяется по формуле (1) с заменой функций возможных давлений функцией сейсмического воздействия.



Возможное число пораженных с летальным исходом при сейсмическом сотрясении от ударов опасных космических тел диаметром  $d$  при скорости удара  $V_{\Omega}$  приведены в табл. 9.

Таблица 9

**Возможное число пораженных с летальным исходом при сейсмическом сотрясении от ударов опасных космических тел диаметром  $d$  при скорости удара  $V_{\Omega}$  [1]**

Параметры космического тела		Число пораженных с летальным исходом, тыс. чел.	
$V_{\Omega}$ , км/с	$d$ , м	Европейская часть	Восточная Сибирь
10	50	100	50
	500	800	100
	1000	1500	300
50	50	200	100
	500	2500	400
	1000	4500	800

**Оценка последствий для наземной инфраструктуры.** Уязвимость зданий. Разрушение зданий характеризуется законами разрушений, которые представляют собой зависимость вероятности его повреждения от интенсивности проявления сейсмического сотрясения в баллах. Законы разрушения зданий получены на основе анализа статистических материалов по разрушению жилых, общественных и промышленных зданий от воздействия сейсмических сотрясений различной интенсивности [2].

Для построения кривой, аппроксимирующей вероятности наступления не менее определенной степени разрушения (повреждения) сооружений  $P_{Ai}(I)$ , используется нормальный закон. Значения математического ожидания законов разрушения представлены в табл. 10.

Таблица 10

**Значения математического ожидания  $M$  законов разрушения в зависимости от степени разрушения зданий [2]**

Классы зданий	Степень разрушения зданий				
	Слабые повреждения	Умеренные повреждения	Тяжелые повреждения	Частичные разрушения	Обвалы
A1, A2	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
B1, B2	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
B1, B2	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0
C7	7,5	8,0	8,5	9,0	10,0
C8	8,0	8,5	9,0	9,5	9,5
C9	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5

**П р и м е ч а н и е.** Классы и степени разрушения зданий приняты в соответствии с международной шкалой сейсмической интенсивности MMSK-86.

При определении вероятности наступления определенной степени повреждения сооружений учитывается теорема о полной группе событий, включая событие, когда сооружение не повреждено. В этом

случае должно выполняться условие

$$\sum_{i=0}^5 P_{Bi}(I) = 1.$$

где  $P_{Bi}(I)$  — вероятность получения зданием  $j$ -го типа  $i$ -й степени разрушений при сотрясении интенсивностью  $I$ .

Математическое ожидание числа зданий со степенью разрушения  $i$  в целом по населенному пункту (объекту) для зданий  $j$ -го типа определяется по формуле

$$M(V_{ji}) = \iint_S \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} P_{Bi}(I) f(x, y, I) \varphi_j(x, y) dI dx dy, \quad (2)$$

где  $S$  — площадь населенного пункта;  $I_{\min}$  и  $I_{\max}$  — минимально и максимально возможные интенсивности сотрясения в пределах заданной площадки;  $f(x, y, I)$  — плотность распределения случайной величины  $I$  в точке с координатами  $(x, y)$ ;  $\varphi_j(x, y)$  — плотность зданий рассматриваемого типа в пределах заданной площадки.

Расчеты по формуле (2) проводятся отдельно для каждого типа здания ( $j$ ) населенного пункта, затем результаты суммируются с учетом типов зданий.

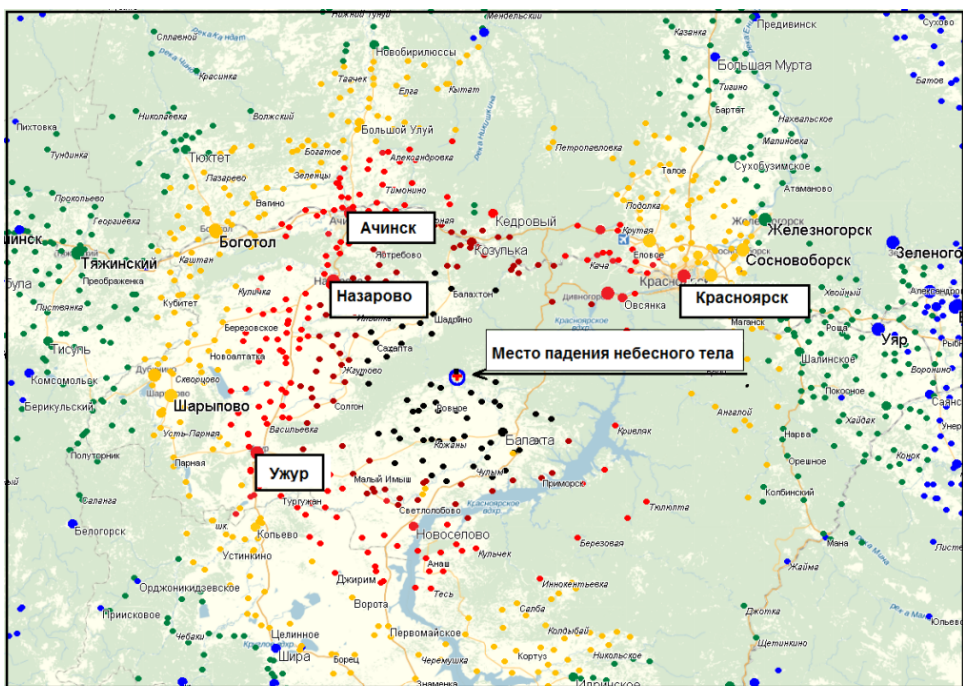
*Уязвимость потенциально опасных объектов.* При оценке последствий в случае сейсмического сотрясения необходимо учитывать возможность аварий на критически важных промышленных объектах. В качестве критериев приняты: тип объекта; интенсивность сотрясения; вероятность аварии с выбросом радиоактивных, горючих и ядовитых веществ на промышленных объектах. Критерии возникновения аварий на атомных станциях, пожаро-, взрыво- и химически опасных объектах в зависимости от интенсивности сотрясений приведены в табл. 11.

Таблица 11

**Критерии возникновения аварий на потенциально опасных объектах в зависимости от интенсивности сотрясений [2]**

Интенсивность сотрясений, балл	Нефтепроводы	Газопроводы	Нефтеперерабатывающие заводы, резервуарные парки	Химически опасные объекты	Атомные станции
6	0	0	0,01	0	0
7	0	0	0,05	0,05	0
8	0,15	0,20	0,15	0,15	0,05
9	0,75	0,80	0,45	0,40	0,15
10	0,95	0,95	0,80	0,65	0,30

***Пример моделирования последствий взрыва космического тела при падении на земную поверхность.*** Результаты моделирования



Степени разрушения населенных пунктов: **■** — нет разрушений; **■** — слабые повреждения; **■** — умеренные повреждения; **■** — сильные повреждения; **■** — разрушения; **■** — обвалы

**Рис. 3. Результаты моделирования последствий взрыва космического тела диаметром  $d = 300$  м и плотностью  $\rho = 3000$  кг/м<sup>3</sup> при падении на землю со скоростью  $V_{\Omega} = 30$  км/с и углом падения  $45^\circ$  для территории Красноярского края России**

последствий взрыва космического тела диаметром  $d = 300$  м и плотностью  $\rho = 3000$  кг/м<sup>3</sup> при падении на землю со скоростью  $V_{\Omega} = 30$  км/с и углом падения  $45^\circ$  для территории Красноярского края России показаны на рис. 3.

Общее число погибших при рассматриваемом сценарии может составить более 150 тыс. чел. (табл. 12).

Таблица 12

**Возможные потери при взрыве космического тела диаметром 300 м при скорости удара о земную поверхность 30 км/с (фрагмент) на территории Красноярского края**

Населенный пункт	Население, тыс. чел.	Структура потерь, чел.		
		Общие	Безвозвратные	Санитарные
Ужур	17,3	150	30	120
Ачинск	118,7	1370	240	1130
Назарово	56,5	2850	680	2170
Красноярск	909,3	5830	970	4860

**Взрыв космического тела в акватории. Параметры волн подводных взрывов.** Опасность для людей и территорий от подводного

взрыва космического тела связана с поражающим действием вызванной взрывом гравитационной волны. Возникающие нагрузки на элементы риска определяются суммарным действием скоростного напора и гидростатического давления. Масса космического тела определяется по его плотности и линейному размеру как диаметру сферы. Механический эквивалент энергии взрыва принимается с коэффициентом  $K_{\Pi} = 0,6$ .

Расчет основан на данных, полученных экспериментально при подводных ядерных взрывах [6]. Основными расчетными параметрами водяных гравитационных волн являются высота волны и ее скорость, изменяющиеся со временем при распространении на континентальном шельфе и далее на прибрежной территории. Экспериментальная информация представлена в функции параметров подводного взрыва от глубины и эпицентрального расстояния энергетического источника с тротильным эквивалентом  $W_1 = 1$  кт. Пересчет высоты волны на иную мощность взрыва осуществляется по формуле закона подобия

$$H = H_1 \sqrt[3]{W^2},$$

где  $H_1 = 20$  м;  $W$  — мощность взрыва, кт, с учетом энергетической доли по образованию волны  $K_{\Pi} = 0,6$ .

На урзе воды (береговой линии) высота волны  $h_{\text{ур}}$  определяется по формуле

$$h_{\text{ур}} = 1,3H \left( \frac{B_{\Pi}}{B_{\text{мелк}}} \right)^{1/4},$$

где  $H$  — начальная высота волны в месте падения космического тела в акваторию;  $B_{\Pi}$  — глубина воды в месте падения;  $B_{\text{мелк}}$  — глубина воды в прибрежной отмели.

Для определения скорости  $C$ , м/с, распространения волн используют формулу Лагранжа [7], согласующуюся с данными наблюдений за волнами цунами в Тихом океане:

$$C = \sqrt{2gH^*}.$$

Здесь  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $H^*$  — глубина океана, м.

Время распространения волн от эпицентра до берега определяется с учетом расстояния от места падения космического тела до берега и скорости распространения волн.

Давление гидравлического потока в основном зависит от скорости потока по берегу. Скорость распространения потока у урза воды  $U_{\text{ур}}$ , м/с, приблизительно можно определить по формуле [7]

$$U_{\text{ур}} = \beta \sqrt{H},$$

где  $\beta = 3$  — константа, м<sup>1/2</sup>/с.

Сопротивление движению потока в гидравлических расчетах учитывается коэффициентом шероховатости

$$n = \frac{h_{\text{yp}}^{0,7} i^{0,5}}{U_{\text{yp}}},$$

где  $i$  — уклон берега.

Дальность  $S_{\text{к}}$ , м, распространения воды по берегу зависит от уклона берега, шероховатости, а также от глубины потока в конечной рассматриваемой точке. Хорошую сходимость по определению дальности распространения потока воды с натурными данными получают по формуле

$$S_{\text{к}} = \frac{h_{\text{yp}}(1 - n) - h_{\text{к}}}{i(1 - n)},$$

где  $h_{\text{к}}$  — глубина потока в конечной рассматриваемой точке. Обычно за глубину потока принимают глубину  $h_{\text{к}} = 0,5$  м, при которой ущерб не наблюдается.

Высота волны  $h$ , м, на различных расстояниях  $S$  от берега вглубь территории может быть определена по формуле

$$h = (U_{\text{yp}} - iS)(1 - n).$$

Скорость распространения гидравлического потока  $U$ , м/с, составляет

$$U = U_{\text{yp}} \left( \frac{h}{h_{\text{yp}}} \right)^{0,7}.$$

При прохождении гидравлического потока мимо здания возникает сложная картина дифракционного взаимодействия. Поле давлений, в основном, зависит от параметров волны (глубины потока, скорости), размеров и ориентации объекта относительно фронта волны.

После достижения подходящей волной фронтальной стены в первый момент происходит удар о стену. На лобовую поверхность фронтальной стены действует давление, равное

$$P = P_s + P_d,$$

где  $P_s = (1/2)\rho gh$  — среднее гидростатическое давление, Па;  $P_d = (1/2)\beta_c \rho U^2$  — гидродинамическое давление, Па;  $\rho$  — плотность воды,  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $h$  — высота волны, м;  $\beta_c$  — коэффициент лобового сопротивления,  $\beta_c = 1,4$ .

**Оценка последствий взрыва космического тела в акватории.** Эта оценка проводится по упрощенной методике, полученной на основании анализа численных решений задачи о воздействии гидравлических волн.

*Оценка последствий для наземной инфраструктуры.* Зоны возможных разрушений строятся по значению удельной энергии потока  $E_{уд}$ , Дж/м<sup>2</sup>, в каждой точке плана зоны катастрофического затопления, которое рассчитывается по формуле

$$E_{уд} = 0,5\rho hU^2,$$

где  $\rho$  — плотность воды;  $h$  — высота волны на рассматриваемом расстоянии от берега, м;  $U$  — скорость потока на рассматриваемом расстоянии от берега, м/с.

Значения удельной энергии потока в зависимости от типа здания и степени его разрушения зданий приведены в табл. 13.

Таблица 13

**Значения удельной энергии потока, Дж/м, в зависимости от типа здания и степени его разрушения**

Тип здания	Степень разрушения здания		
	Сильная	Средняя	Слабая
Деревянные (1–2-этажные)	1300	400	14
Кирпичные:			
1–3-этажные	13 500	4000	1300
4-этажные и более	40 000	13 500	4000
Промышленные:			
бескаркасные и с легким каркасом	40 000	13500	4000
с тяжелым каркасом	125 000	40 000	13 500

*Оценка последствий для населения.* Такая оценка проводится по данным, приведенным в табл. 14, 15.

Таблица 14

**Потери населения в зданиях**

Степень разрушения здания	Удельная энергия потока, Дж/м <sup>2</sup>	Структура потерь (доля от числа людей, находящихся в здании)	
		Безвозвратные	Санитарные
Сильная	40 000	0,10	0,26
Средняя	13 500	0,01	0,03
Слабая	4000	0	0,01

Таблица 15

**Потери, %, населения на открытой местности**

Удельная энергия потока Дж/м <sup>2</sup>	Общие потери		Из общего числа потерь			
	Днем	Ночью	Безвозвратные		Санитарные	
			Днем	Ночью	Днем	Ночью
Более 4000	60	90	40	75	60	25
4000	13	25	10	20	90	80
1300	5	15	7	15	93	85
400	2	10	5	10	95	90

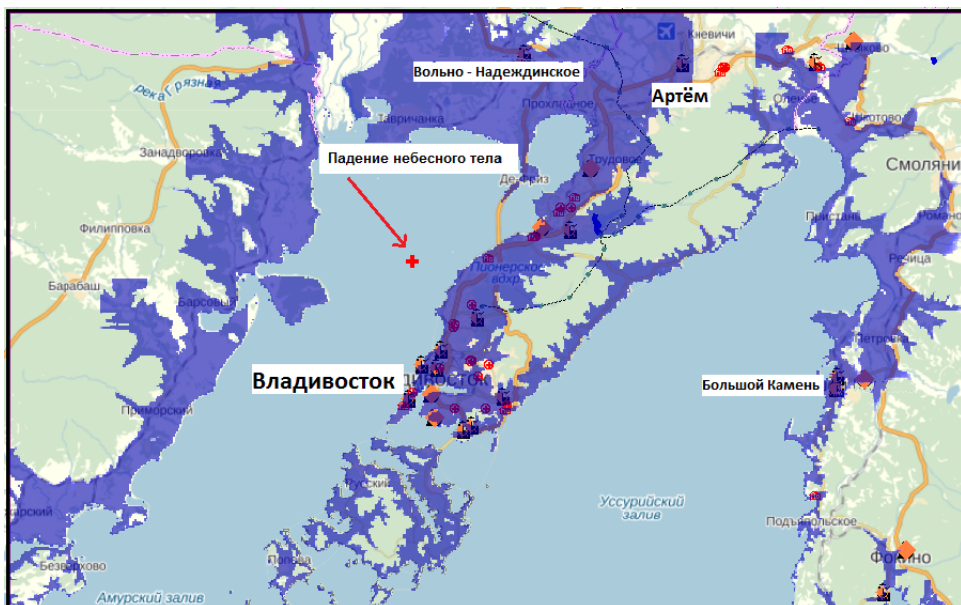


Рис. 4. Результаты моделирования последствий подводного взрыва в акватории Японского моря космического тела диаметром  $d=200$  м и плотностью  $\rho=2500$  кг/м<sup>3</sup>

**Пример моделирования последствий подводного взрыва космического тела.** Результаты моделирования последствий подводного взрыва в акватории Японского моря космического тела диаметром  $d = 200$  м и плотностью  $\rho = 2500$  кг/м<sup>3</sup>, со скоростью  $V_{\Omega} = 40$  км/с и углом падения  $45^{\circ}$  показаны на рис. 4.

Общее число погибших при падении и взрыве указанного космического тела в акватории может составить более 100 тыс. чел. (табл. 16).

Таблица 16

**Возможные последствия подводного взрыва космического тела диаметром 200 м при скорости 40 км/с (фрагмент) в акватории Японского моря**

Населенный пункт	Население, чел.		Площадь зоны затопления, га	Число погибших, чел.
	Всего	В зоне затопления		
Артём	102 300	51 761	2 581	6 300
Владивосток	583 700	487 966	21 129	65 800
Вольно-Надеждинское	6 400	6 405	1 159	850
Большой Камень	38 200	29 577	1 875	3 250

**Выводы.** Рассмотрены опасности, возникающие для населения и территорий при взрывах космических тел в воздухе, на земной поверхности и в акватории.

На основе представленных математических моделей разработаны программные средства с применением ГИС-технологий, которые позволяют реализовать системный подход к прогнозированию последствий падений опасных космических тел и планированию средств их снижения для населения, оценить последствия космических воздействий в зависимости от параметров, сценариев катастроф, географических условий местности и уровней ее урбанизации.

Показаны гипотетические сценарии катастроф, которые могут иметь глобальные последствия для населения и территорий. Возможное число погибших на урбанизированных территориях при наземном взрыве космического тела может составить более 150 тыс. чел., при падении и взрыве небесного тела в акватории — более 100 тыс. чел.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Астероидная уязвимость Земли* / А.А. Александров, В.А. Котляревский, В.И. Ларионов, С.П. Суцев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2013. № 2. С. 58–83.
2. *Котляревский В.А., Ларионов В.И., Суцев С.П.* Энциклопедия безопасности: строительство, промышленность, экология. В 3 т. Т. 2. Законы поражения. Прочность и динамика сооружений. М.: АСВ, 2008. 640 с.
3. *Котляревский В.А., Ларионов В.И., Суцев С.П.* Энциклопедия безопасности: строительство, промышленность, экология. В 3 т. Т. 3. Сейсмостойкость и теплозащита сооружений. М.: АСВ, 2010. 633 с.
4. *Понд Р., Глас А.* Металлофизические исследования и распределение энергии // Высокоскоростные ударные явления. 1973. С. 428–467.
5. *Eichelberger R.J., Gehring J.W.* Effects of Meteoroid Impacts on Space Vehicles // Jr. Rocketry. 1962. Vol. 32. No. 10. P. 1583–1591.
6. *Herrmann W., Jones A.H.* Survey of hypervelocity impact information / MIT, Aeroelastic and Structure Research Laboratory Report. No. 99-1, Oct. 1961.
7. *Действие ядерного оружия*; под ред. П.С. Дмитриева; пер. с англ. М.: Воениздат, 1963. 684 с.

## REFERENCES

- [1] Aleksandrov A.A., Kotlyarevskiy V.A., Larionov V.I., Sushchev S.P. Asteroid vulnerability Earth. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinotr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2013, no. 2, pp. 58–83 (in Russ.).
- [2] Kotlyarevskiy V.A., Larionov V.I., Sushchev S.P., eds. *Entsiklopediya bezopasnosti: stroitel'stvo, promyshlennost', ekologiya. V 3 t. T. 2: "Zakony porazheniya. Prochnost' i dinamika sooruzheniy"* [Destruction law. Strength and structural dynamics]. Mjscow, ASB Publ., 2008. 640 p.
- [3] Kotlyarevskiy V.A., Larionov V.I., Sushchev S.P., eds. *Entsiklopediya bezopasnosti: stroitel'stvo, promyshlennost', ekologiya. V 3 t. T. 3: "Seysmostoykost' i teplozashchita sooruzheniy"* [Seismic stability and heat protection of structures]. Moscow, ASB Publ., 2010. 633 p.



- [4] Pond R., Glas A. Metal-physical research and distribution of energy. High-velocity impact phenomena. Ed. R. Kinslow. N.Y.–London, Acad. Press, 1970. 536 p. (Russ. Ed.: Pond R., Glas A. Metallofizicheskie issledovaniya i raspredelenie energii. Vysokoskorostnye udarnye yavleniya. Moscow, Mir Publ., 1973, pp. 428–467.).
- [5] Eichelberger R.J., Gehring J.W. Effects of meteoroid impacts on space vehicles. *Jr. Rocketry*, 1962, vol. 32, no. 10, pp. 1583–1591.
- [6] Herrmann W., Jones A.H. Survey of hypervelocity impact information. MIT, Aeroelastic and Structure Research Laboratory Report, no. 99-1, 1961.
- [7] Department of Defense. The effects of nuclear weapons. Glasstone S., Dolan P. DOD Authoritative Reference on Atomic Explosions, Damage, Radiation, Fallout, EMP, Biological, Radio and Radar Effects (CD-ROM) Multimedia CD, 2010. (Russ. Ed.: Deystvie yadernogo oruzhiya; pod red. P.S. Dmitrieva; per. s angl. Moscow, Voenizdat Publ., 1963. 684 p.).

Статья поступила в редакцию 30.07.2014

Александров Анатолий Александрович — д-р техн. наук, профессор, ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий кафедрой “Экология и промышленная безопасность”. Автор более 100 научных работ в области ресурсо- и природосбережения при хранении и транспортировке жидкого углеводородного топлива с использованием криогенной техники, теории рисков, механики разрушения, промышленной безопасности и эксплуатации опасных производственных объектов.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Aleksandrov A.A. — Dr. Sci. (Eng.), professor, head of “Ecology and Industrial Safety” department, Rector of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of resources and nature conservation during storage and transportation of liquid hydrocarbon fuel using cryogenic technology, theory of risks, fracture mechanics, industrial safety and exploitation of dangerous production objects.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Котляревский Владимир Абрамович — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-образовательного центра исследований экстремальных ситуаций МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 400 научных работ в областях изучения взрывных процессов, динамического сопротивления материалов и динамики сооружений, теории рисков промышленных аварий, математического и физического моделирования, методологии экспериментальных исследований, связанных с действием взрывных и ударных нагрузок на сооружения и обеспечением защиты человека от поражающих факторов.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Kotlyarevskiy V.A. — Dr. Sci. (Eng.), professor, chief researcher of the Scientific and Educational Center for Study of Extreme Situations of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 400 publications in the field of study of explosion processes, dynamical strength of materials and dynamics of buildings, risk theory, industrial accidents, mathematical and physical simulation, methodology of experimental studies connected with action of explosion and impact loads on buildings and with guaranteeing of people protection from different damaging factors.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Ларионов Валерий Иванович — д-р техн. наук, профессор, заместитель директора по научной работе Научно-образовательного центра исследований экстремальных ситуаций МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области теории рисков и промышленной безопасности потенциально опасных объектов.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Larionov V.I. — Dr. Sci. (Eng.), professor, deputy director for scientific work of the Scientific and Educational Center for Study of Extreme Situations of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of theory of risks and industrial safety of potentially dangerous objects.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Суцев Сергей Петрович — д-р техн. наук, профессор кафедры “Экология и промышленная безопасность” МГТУ им. Н.Э. Баумана, генеральный директор Центра исследований экстремальных ситуаций (ООО “ЦИЭКС”). Автор более 100 научных работ в области теории рисков, механики разрушения, промышленной безопасности и эксплуатации опасных производственных объектов.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Sushchev S.P. — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Ecology and Industrial Safety” department of the Bauman Moscow State Technical University, chief director of the Research Center for Extreme Situation (ООО “TsIEKS”). Author of more than 100 publications in the field of risk theory, fracture mechanics, industrial safety and exploitation of dangerous production objects.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.