

## АСТЕРОИДНАЯ УЯЗВИМОСТЬ ЗЕМЛИ

А.А. Александров, В.А. Котляревский, В.И. Ларионов, С.П. Сушев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

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

*Рассмотрены опасности падения на земную поверхность астероидов и других космических тел и возможные последствия их действия на здания, сооружения и системы жизнеобеспечения в городах и населенных пунктах в связи с возникновением интенсивных тепловых воздействий, воздушных ударных и сейсмических волн, способных инициировать землетрясения в сейсмически активных регионах. Рассмотрен сценарий сейсмической опасности, связанный с вероятностью падения астероидов на земную поверхность. Представлены возможные методы и программные средства, позволяющие реализовать системный подход к прогнозированию последствий катастрофических явлений, связанных с падением космических объектов на земную поверхность, а также рассмотрены вопросы планирования средств снижения потенциальных угроз для населения. Проанализированы основные эффекты Челябинского болида. Обоснована необходимость разработки методов обнаружения и мониторинга объектов, сближающихся с Землей, и создания средств защиты Земли от астероидно-кометной опасности.*

**Ключевые слова:** астероид, энергия удара, огненный шар, воздушная ударная волна, объем и глубина ударного кратера, сейсмические волны, магнитуда землетрясения, уязвимость населения.

## ASTEROID VULNERABILITY OF THE EARTH

A.A. Aleksandrov, V.A. Kotlyarevskii, V.I. Larionov, S.P. Sushchev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

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

*Dangers of asteroids and other space bodies falling to the surface of the Earth and possible consequences of their activity for buildings, constructions and life support systems in cities and towns due to intensive thermal effects, air shock and seismic waves that can also trigger earthquakes in seismically active regions are considered. The scenario of seismic hazard associated with the probability of asteroid falls to the Earth's surface is presented. The possible methods and software tools, which allow implementing systematic approach to prediction of the effects of space impacts, and the issues of planning measures of its reduction for the population are considered. The main "effects" of the Chelyabinsk bolide were analyzed. The need for development of methods for detection and monitoring of the objects approaching the Earth and for creation of means for the Earth protection from asteroid and comet danger is proved.*

**Keywords:** asteroid, impact energy, fireball, air shock wave, volume and depth of the impact crater, seismic waves, earthquake magnitude, vulnerability of the population.

Космические тела подлетают к Земле в широком диапазоне скоростей  $V$  вплоть до десятков километров в секунду. Мелкие метеориты

сгорают в земной атмосфере, крупные могут ее преодолеть, высвобождая при ударе о Землю в доли секунды весь запас кинетической энергии. Обнаруженные на земле космические тела — метеориты — обычно имеют небольшую массу (рис. 1) и не представляют реальной опасности.

Параметры весьма опасных в сейсмическом отношении крупных тел при больших скоростях при взрывах, сопровождающих прохождение атмосферы, устанавливаются путем теоретического анализа, а также по эффекту воздействия на окружающую среду и найденным небольшим фрагментам. Оценка параметров поражающих факторов воздушных взрывов возможна адаптацией известных методов расчета параметров ударных волн и тепловой радиации взрывов конденсированных взрывчатых веществ, газовых и ядерных взрывов [1]. Сейсмические эффекты, вызываемые падением астероидов, при широком диапазоне исходных параметров определяют разнообразные сценарии, учитывающие как чисто ударные воздействия, так и сопровождающиеся взрывом астероида при подлете к Земле (рис. 2).

При вхождении космического тела (далее астероида) в земную атмосферу и возможном ударе о земную поверхность с прониканием в грунт выделяемая энергия расходуется на образование огненного шара, воздушной ударной волны и кратера в грунте с генерированием системы сейсмических волн.

Полная энергия астероида  $Q$  в атмосфере до момента контакта с земной поверхностью, в предположении об остывании при прохождении атмосферы, принимается равной кинетической энергии:

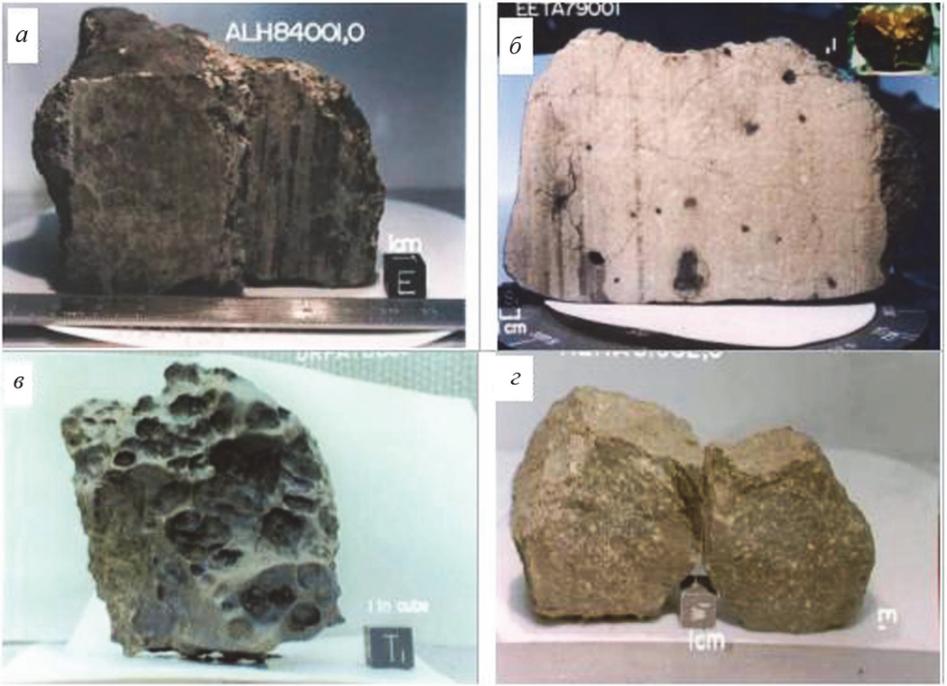
$$Q = 0,5mV^2,$$

где  $m$  — масса астероида;  $V$  — скорость.

Определение распределения энергии по протекающим процессам возможно при изучении всей их совокупности методами математического моделирования с использованием компьютерных программ. На основании ряда источников и вариантных расчетов по взаимодействию твердых тел с атмосферой и грунтовым массивом [2–12] установлено примерное распределение по процессам исходной кинетической энергии космического тела.

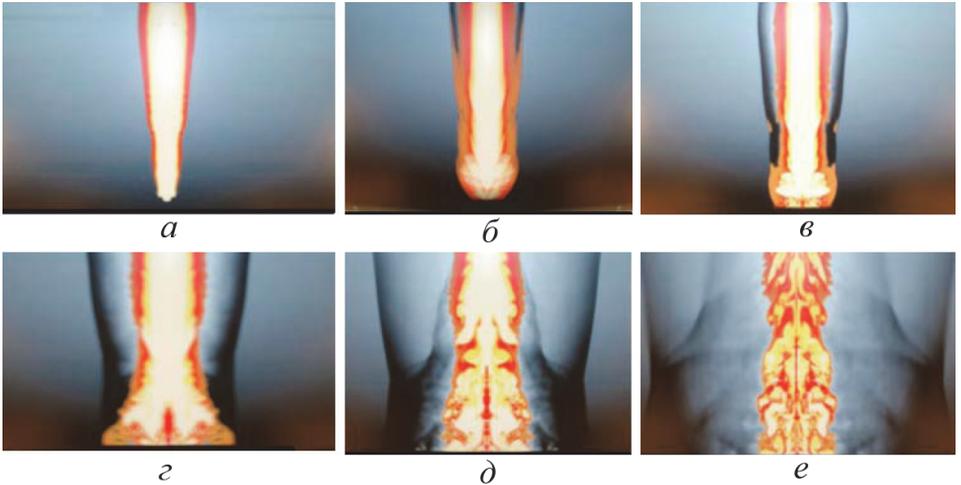
*При взрыве болида в воздухе и разрушении с дроблением на осколки (метеориты):*

- 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 %.



**Рис. 1. Типичные астероиды из мировой коллекции:**

*a* – метеорит ALH84001,0 ( $d \sim 0,12$  м); *б* – марсианский метеорит EETA79001 ( $d \sim 0,2$  м); *в* – железный метеорит; *г* – хондрит-метеорит



**Рис. 2. Кадры моделирования во времени процесса входа космического тела в атмосферу (*a*), полета к земле (*б*), удара о землю (*в*) и взрыва в грунте (*г-е*) [2]**

При взрыве астероида в воздухе и ударе о земную поверхность:

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

**Параметры огненного шара.** Параметры огненного шара приближенно можно оценить по аналогии с испарением горючего продукта [4]. Диаметр  $D$  и время существования  $t_s$  огненного шара определяются в зависимости от энергозапаса  $E_s$  и температуры  $\Theta$  соотношениями

$$D = a_0 \left( \frac{E_s}{\Theta} \right)^{1/3}; \quad t_s = b_0 \frac{E_s^{1/3}}{\Theta^{10/3}}, \quad (1)$$

где  $a_0, b_0$  — эмпирические константы.

Поскольку энергозапас  $E_s = M_\Theta q_\Gamma$  пропорционален массе  $M_\Theta = K_\Pi m$  источника с теплотой сгорания  $q_\Gamma$ , соотношения (1) перепишем с новыми значениями констант:

$$D = a \left( \frac{M_\Theta}{\Theta} \right)^{1/3}; \quad t_s = b \frac{M_\Theta^{1/3}}{\Theta^{10/3}}.$$

По данным экспериментов с ракетными топливами получены значения  $a = 52,4, b = 6,34 \cdot 10^{10}$  и для веществ, сгорающих с образованием газообразных продуктов при среднем значении  $q_\Gamma = 47$  МДж/кг, которое наиболее часто приводит к образованию огненного шара, рекомендовано значение  $\Theta = 2300$  К [9]. При этом последние формулы с учетом энергетической доли огненного шара  $K_\Pi$  приобретают вид

$$D = 3,97 M_\Theta^{1/3}, \quad t_s = 0,395 M_\Theta^{1/3}. \quad (2)$$

Воспламеняющее и поражающее действие огненного шара определяется параметрами его теплового излучения: плотностью потока излучения и суммарным импульсом теплового излучения. Зависимость теплового потока  $q$  от расстояния  $R$  до центра огненного шара с радиусом  $R_s = D/2$  определяется соотношением

$$\frac{q}{\Theta^4} = \frac{G(2R_s/R)^2}{F + (2R_s/R)^2}, \quad (3)$$

а тепловой энергии (импульс теплового излучения)  $Q_\Gamma$ , приходящейся на единицу поверхности, — соотношением

$$\frac{Q_\Gamma}{b_0 G \sqrt{M_\Theta} \Theta^2} = \frac{(2R_s/R)^2}{F + (2R_s/R)^2}, \quad (4)$$

где  $F = 161,7; b_0 G = 2,04 \cdot 10^4$ .

Приняв  $\Theta = 2300 \text{ K}$ , перепишем формулу (4) в виде функции  $Q_T^* \equiv Q_T / \sqrt[3]{M_\Theta}$  безразмерного аргумента  $k \equiv (D/R)^2$ :

$$Q_T^* = \frac{3,55 \cdot 10^3 k}{161,7 + k} \quad (5)$$

(значения импульса  $Q_T^*$  приведены в табл. 1).

Таблица 1

Зависимость импульса теплового излучения  $Q_T^*$ , кДж/(м<sup>2</sup>·кг<sup>1/3</sup>), от расстояния  $R$  до центра огненного шара диаметром  $D$

$R/D$	1	1,2	1,5	2	5
$k$	1	0,694	0,444	0,25	0,04
$Q_T^*$	21,82	15,17	9,73	5,49	0,88

**Воздушная ударная волна.** Взрыв астероида идентифицирован эквивалентному по энергии взрыву заряда взрывчатого вещества (ВВ). При взрыве заряда ВВ в атмосфере (воздушный взрыв) возникает сферическая воздушная ударная волна, распространяющаяся с большой скоростью в виде области сжатия/разрежения со скачком давления на своем фронте.

Ударная волна достигает земной поверхности и отражается от нее (рис. 3). На некотором расстоянии от эпицентра взрыва (проекции центра взрыва на земную поверхность) фронт отраженной волны сливается с фронтом падающей, образуя так называемую головную волну с вертикальным фронтом.

Ближняя зона, где отсутствует слияние фронтов, называется зоной регулярного отражения, а дальняя, в которой распространяется головная волна, — зоной нерегулярного отражения (ниже траектории тройной точки слияния трех фронтов). Характерная волновая картина действия ударной волны на грунтовый массив приведена на рис. 4.

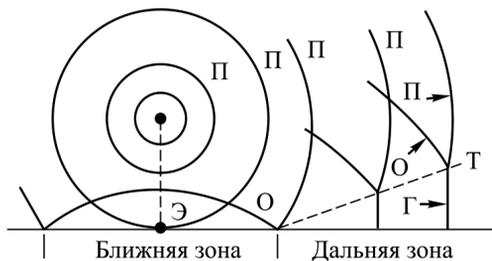


Рис. 3. Схема волнообразования при воздушном взрыве:

Э — эпицентр взрыва; П — фронт падающей волны; О — фронт отраженной волны; Г — фронт головной ударной волны; Т — траектория тройной точки

В двухслойном грунтовом массиве энергия взрыва, переданная грунту, вызывает прямую взрывную волну 1. Воздушная ударная волна (В), распространяющаяся вдоль поверхности грунта, замедляется, а ее интенсивность уменьшается, что вызывает в мягком слое волну сжатия, режим которой 2 на траектории 4 переходит в опережающий режим 5. Кроме того,

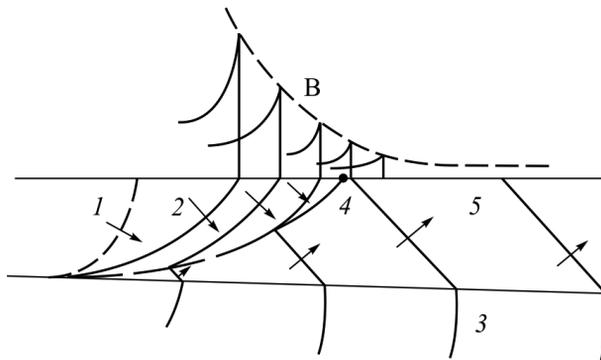


Рис. 4. Волновая картина в дальней зоне воздушного взрыва

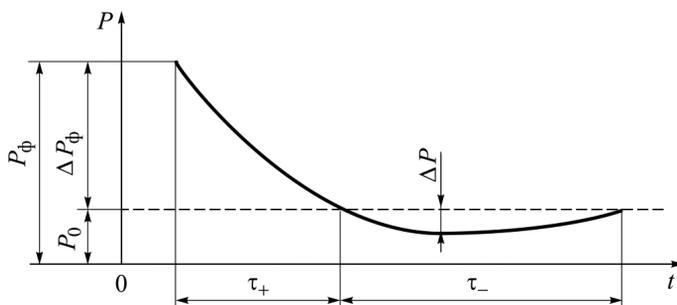


Рис. 5. Изменение давления в ударной волне со временем в фиксированной точке на земной поверхности

образуется преломленная во второй слой волна 3. С момента прихода фронта воздушной ударной волны в точку на земной поверхности давление резко повышается до максимального значения  $P_\phi$ , а затем убывает до атмосферного  $P_0$  и ниже атмосферного (рис. 5).

Период  $\tau_+$  повышенного избыточного (сверх атмосферного) давления  $\Delta P = P - P_0 > 0$  называется фазой сжатия, а период  $\tau_-$  пониженного давления  $\Delta P < 0$  – фазой разрежения. Одновременно с давлением в ударной волне возникает движение воздушной среды от эпицентра (центра) взрыва, создающее скоростной напор.

Основными параметрами, определяющими интенсивность ударной волны, являются избыточное давление на фронте  $\Delta P_\phi$  и длительность фазы сжатия  $\tau_+$ , которые зависят от массы энергоносителя (т.е. энергии взрыва), высоты  $H$  и расстояния  $R_\Sigma$  от эпицентра.

Давление  $\Delta P_\phi$ , МПа, для свободно распространяющейся сферической воздушной ударной волны в зависимости от расстояния  $R$ , м, и массы заряда (в тротиловом эквиваленте)  $C$ , кг, определяют по формуле М. Садовского

$$\Delta P_\phi = \frac{0,084}{\bar{R}} + \frac{0,27}{\bar{R}^2} + \frac{0,7}{\bar{R}^3}, \quad (6)$$

где  $\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{C}}$ , а длительность фазы сжатия – по формуле

$$\tau_+ = 1,5 \cdot 10^{-3} \sqrt[6]{C} \sqrt{R}, \quad \text{с.} \quad (7)$$

При нормальном отражении воздушной ударной волны от поверхности земли давление в отраженной волне возрастает до значения

$$\Delta P_{\text{отр}} = K_{\text{отр}} \Delta P_{\text{ф}}; \quad K_{\text{отр}} = \frac{14 + 8\Delta P_{\text{ф}}/P_0}{7 + \Delta P_{\text{ф}}/P_0}, \quad (8)$$

где  $K_{\text{отр}}$  — коэффициент отражения;  $P_0$  — атмосферное давление.

Важной характеристикой ударной волны является ее удельный импульс  $I$ , Па·с, фазы сжатия ( $0 < t < \tau_+$ ), приближенно определяемый по формуле

$$I = \frac{1}{2} \Delta P_{\text{ф}} \tau_+. \quad (9)$$

Мощность взрыва обычно оценивают тротиловым эквивалентом  $C_{\text{ВВ}}$ , соответствующим эффекту взрыва тротилового заряда массой  $C_{\text{ВВ}}$ .

Основные параметры ударной волны подчиняются законам подобия, применимым для широкого диапазона энергий взрыва. Пусть для заряда ВВ, например тротила, массой  $C_1$  на расстоянии  $R_1$  известны параметры на фронте ударной волны (давление, плотность, скорость частиц), а также временные параметры (длительность фазы сжатия  $\tau_+$ , скоростного напора  $\tau_{\text{сж}}$  и время прихода фронта волны). Тогда те же параметры на фронте ударной волны взрыва заряда массой  $C_2$  будут на расстоянии  $R_2$ , причем это расстояние и временные параметры (для расстояний  $R_1$  и  $R_2$  соответственно обозначим  $\tau_1$  и  $\tau_2$ ) определяются по формулам (закон подобия кубического корня)

$$R_2 = R_1 \sqrt[3]{\frac{C_2}{C_1}}; \quad \tau_2 = \tau_1 \sqrt[3]{\frac{C_2}{C_1}}. \quad (10)$$

Если ввести величину

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{C}}, \quad (11)$$

то закон подобия можно сформулировать как равенство параметров на фронте волны на равных приведенных расстояниях  $\bar{R}$ . Для воздушных взрывов на высоте  $H$  для соблюдения подобия необходимо иметь также равенство приведенных высот

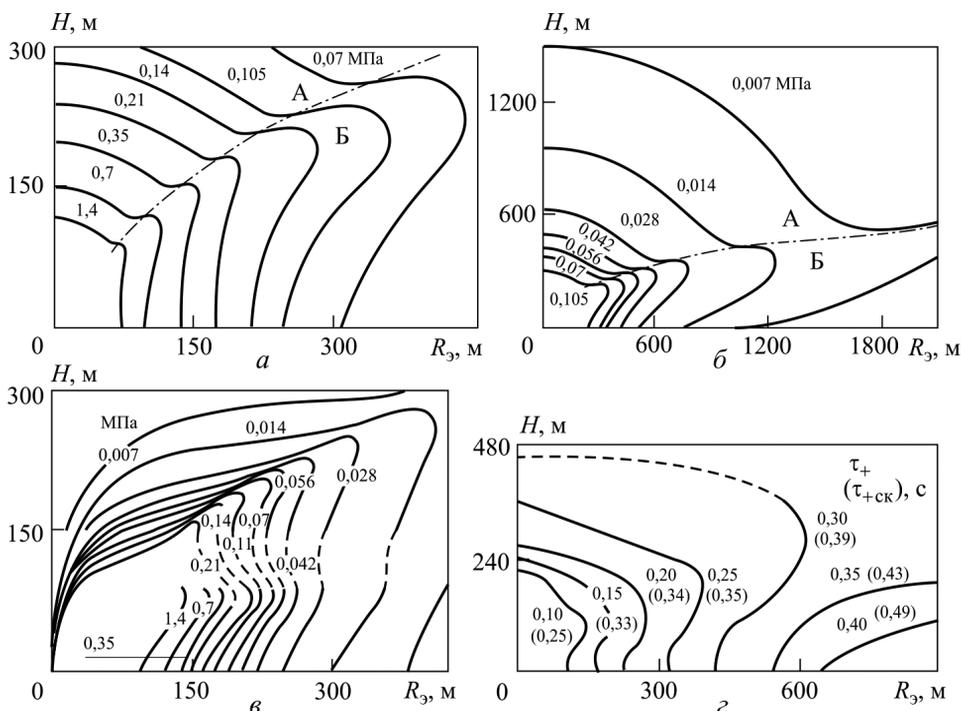
$$\bar{H} = \frac{H}{\sqrt[3]{C}}. \quad (12)$$

Согласно закону подобия на расстояниях  $R_1$ ,  $R_2$ , определяемых формулой (10), импульсы  $I_1$  и  $I_2$  связаны соотношением

$$I_2 = I_1 \sqrt[3]{\frac{C_2}{C_1}}. \quad (13)$$

Для воздушных ядерных взрывов параметры ударной волны на поверхности земли зависят от эпицентрального расстояния  $R_{\text{Э}}$  и высоты взрыва  $H$ . Соответствующие графики для взрыва мощностью  $C = 1 \text{ кт}^1$  представлены на рис. 6 [5].

<sup>1</sup>Для других значений  $C$  следует воспользоваться законами подобия.



**Рис. 6. Зависимость параметров ударной волны на поверхности грунта от расстояния  $R_3$  до эпицентра и высоты  $H$  взрыва мощностью 1 кт в зоне регулярного (А) и нерегулярного (Б) отражения:**

$a, \bar{b}$  — избыточное давление на фронте волны;  $v$  — максимум горизонтальной составляющей скоростного напора;  $z$  — длительности фазы сжатия  $\tau_+$  и действия скоростного напора  $\tau_{+ск}$

**Параметры ударного кратера.** При высокоскоростном ударе астероида 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 [12, 13]

$$\Omega = \frac{2Q_\Omega \cos \alpha}{2,62H_B}, \quad (14)$$

где  $Q_\Omega = K_\Omega Q$  — энергия удара;  $\alpha$  — угол встречи удара,  $H_B$  — число твердости породы по Бринеллю.

Глубина кратера  $h$  дается соотношением [14]

$$h = 1,2r \left( \frac{\rho_0}{\rho} \right)^{2/3} \ln \left( 1 + \frac{\rho_0^{2/3} \rho^{1/3} V_\Omega^2}{H_B} \right), \quad (15)$$

где  $r$  — радиус астероида, приведенного к сфере;  $V_\Omega$  — скорость удара;  $\rho_0$  — плотность астероида,  $\rho$  — плотность породы.

**Сейсмические параметры падения астероида на земную поверхность.** Сейсмическая опасность при падении на земную поверхность астероидов и других космических тел связана с возникновением от ударных воздействий интенсивных сейсмических волн, т.е. колеба-

ний грунта, действующих на здания, сооружения и систему жизнеобеспечения в городах и населенных пунктах. Кроме того, в сейсмически активных регионах такие удары могут послужить пусковым механизмом землетрясений. Возможные последствия в каждом конкретном случае зависят от условий входа космического тела в атмосферу, места его падения, массы и скорости в момент удара, т.е. от выделяющейся энергии.

**Моделирование ударного действия космических тел.** В математических моделях ударных воздействий полная система уравнений волновой динамики содержит реологию материалов космического тела и грунта (далее мишени). При небольших и средних скоростях удара модели материалов могут представлять нелинейно-упругое, вязкоупругое и упругопластическое тело. При больших скоростях прочность мишени не учитывают и используют гидродинамическое описание — зависимость “сжимаемость–давление”, т.е. среда рассматривается как жидкость.

*Удар при средних скоростях по мишеням из упруговязкого и упругопластичного материалов с прочностью.* Математическое моделирование удара твердого тела по мягкому грунту может выполняться численными методами с применением разных моделей, учитывающих нелинейно-упругие, вязкие и пластические свойства сплошной среды. В [15–17] результаты таких расчетов сравнивались с экспериментами по удару штампа о грунт. Для воспроизведения удара штамп, установленный на грунт, подвергался действию взрывного импульса, вызывающего движение штампа с начальной скоростью удара. Установлено, что форма диаграммы объемного деформирования, учет пластической сжимаемости и вязкости среды слабо сказываются на напряжениях под штампом, но существенно влияют на его кинематику и возбуждаемое волновое поле.

Первая серия опытов проводилась на массиве суглинка естественного сложения с незначительными включениями мелкого гравия (рис. 7, компрессионная кривая 1), вторая — на влажном песчаном грунте (рис. 7, компрессионная кривая 2); здесь же показаны типичные осциллограммы давлений под штампом и его смещений.

Математическое моделирование проведено по программам «М» и «MS» – двумерных движений упругопластических сред [15, 16] и по программе «F» — одномерных движений нелинейной упруговязкой среды [17]. В программах реализован автоматический переход взаимодействующих сред от одного фазового состояния к другому по схеме “упругость–вязкоупругость–пластичность–жидкость”. Поверхность текучести в пространстве главных напряжений принята в виде замкнутой деформируемой поверхности вращения с вырождением вследствие частичной потери прочности в цилиндрическую поверхность Мизеса переменного радиуса с учетом сопряжения с гидродинамическим описанием в зоне высоких давлений. Данные двумерных программ «М» и «MS» приведены в табл. 2.

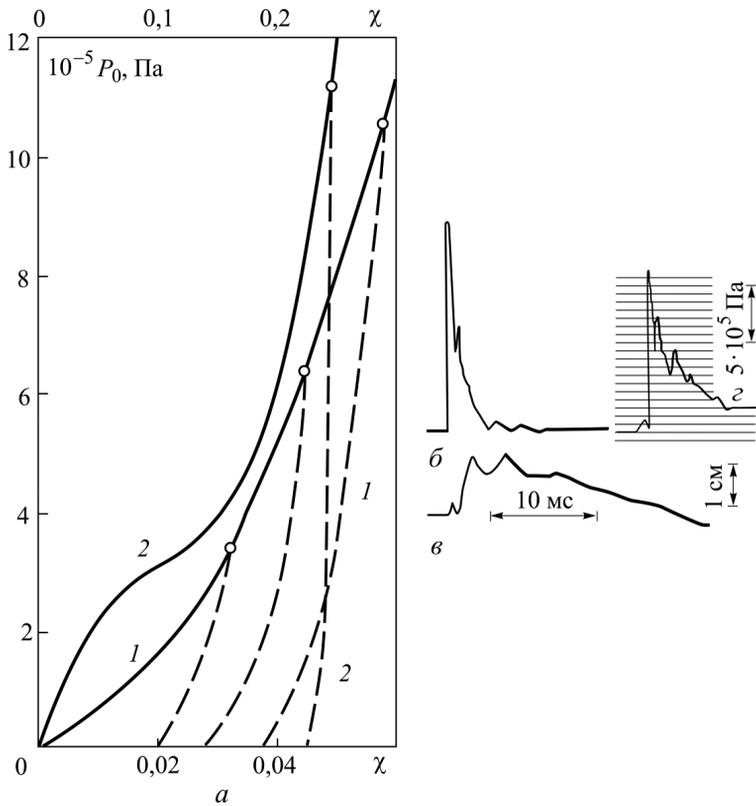


Рис. 7. Компрессионные кривые  $P_0(\chi)$  (а) (1 – суглинка (нижняя шкала), 2 – песчаного грунта (верхняя шкала)); осциллограммы изменения со временем давлений в грунте под штампом (б) и смещений штампа (в) в первой серии; давлений (г) во второй серии экспериментов по удару штампа (вверху)

Для описания волновых движений в массиве нелинейной упруго-вязкой сплошной среды при ударных воздействиях со средними скоростями использовано уравнение состояния наследственного типа

$$\varepsilon = \frac{p}{E} + \int_0^t \Gamma(t - \xi) \dot{p}(\xi) d\xi, \quad \Gamma = \begin{cases} \Gamma_1 & (\dot{\varepsilon} - \dot{p}/E \geq 0); \\ \Gamma_2 & (\dot{\varepsilon} - \dot{p}/E < 0). \end{cases} \quad (16)$$

Здесь  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  – сопрягаемые ядра ползучести для условий одноосной деформации  $\varepsilon$ ;  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации;  $p$  – осевое давление;  $\dot{p}$  – скорость изменения давления;  $E = 3K / (1 + 2K_\delta)$  – модуль упругости;  $K$  – модуль объемного сжатия;  $K_\delta$  – коэффициент бокового давления.

На рис. 8 и 9 приведены волновые поля от ударов в виде матриц вертикальных смещений, напряжений и деформаций среды под штампом в фиксированные моменты времени для некоторых расчетных вариантов (штамп выделен контуром,  $DD$  – цена квантования параметра).

На рис. 10 и 11 показаны изменения со временем вертикальной компоненты тензора напряжений в среде под штампом и смещений

**Расчетные варианты удара штампа по деформируемой среде с использованием нелинейно-упругой и упругопластической моделей**

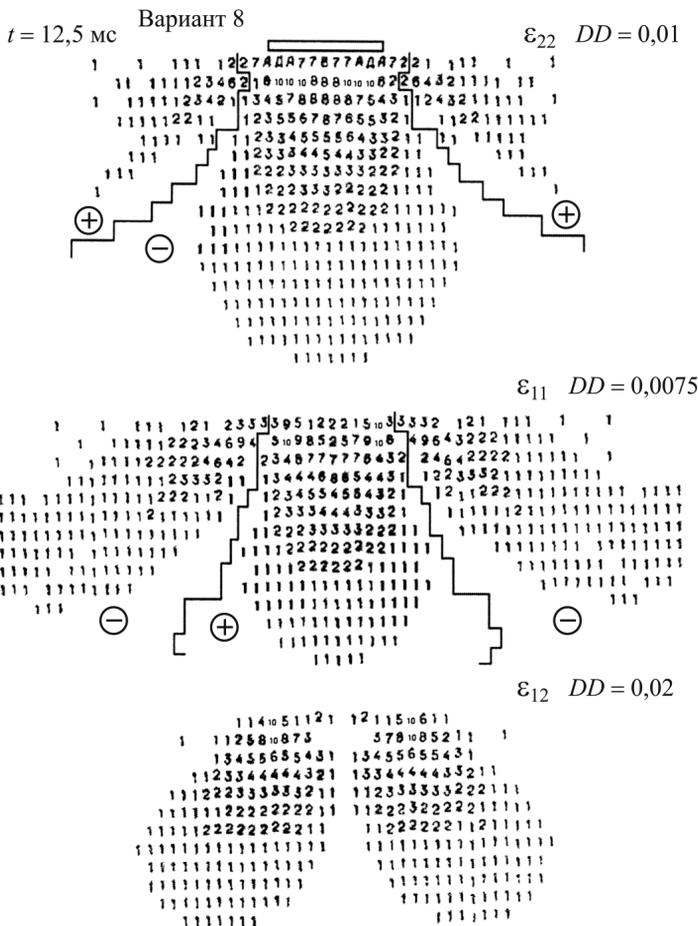
Номер варианта	Среда	Программа	Закон сжимаемости (см. рис. 7)	Условие текучести
6	Нелинейно-упругая, не обладающая прочностью (жидкость)	«М»	Жесткая диаграмма нелинейно-упругого сжатия (кривая 1)	—
2	Нелинейно-упругая, обладающая прочностью (грунт)	«М»	То же	—
1	Идеальная упругопластическая среда Прандтля–Рейсса, пластически несжимаемая	«М»	»	Мизеса (динамическое), наложено на девиатор упругих напряжений
5	Упругопластическая Григоряна, пластически сжимаемая	«MS»	Жесткая диаграмма упругопластического сжатия (кривые 1)	Мизеса–Шлейхера, наложено на девиатор полных напряжений
10	»	«MS»	Диаграмма упругопластического сжатия двойкой кривизны (кривые 2)	То же
8	То же	«MS»	То же	Мизеса–Шлейхера, наложено на девиатор упругих напряжений
9	» (подошва штампа деформируемая)	«MS»	»	То же

штампа для всех вариантов расчета с номерами кривых, соответствующими номерам вариантов. Приведенные данные дают сравнительную оценку поведения моделей сред и согласия с экспериментальными кривыми *A*, *B*.

Получено, что пластическое течение начинается немедленно после удара под всей подошвой штампа и распространяется в глубь среды. Деформации сдвига, распространяющиеся от углов штампа к оси симметрии, в начальной фазе окаймляют треугольную зону под центром штампа, в которой лагранжева сетка сжата, но остается прямоугольной.

*Удар при больших скоростях по мишеням из материалов, не обладающих прочностью (гидродинамическое приближение).* При больших скоростях удара свойства грунтовой среды описывают в гидродинамическом приближении. Вопросы удара в такой постановке аналитически рассмотрены в работе [18]. Решение численными методами





**Рис. 9.** Матрицы компонент тензора деформаций грунта под штампом в варианте 8 в момент времени 12,5 мс

торможения. Приведенные величины определены соотношениями

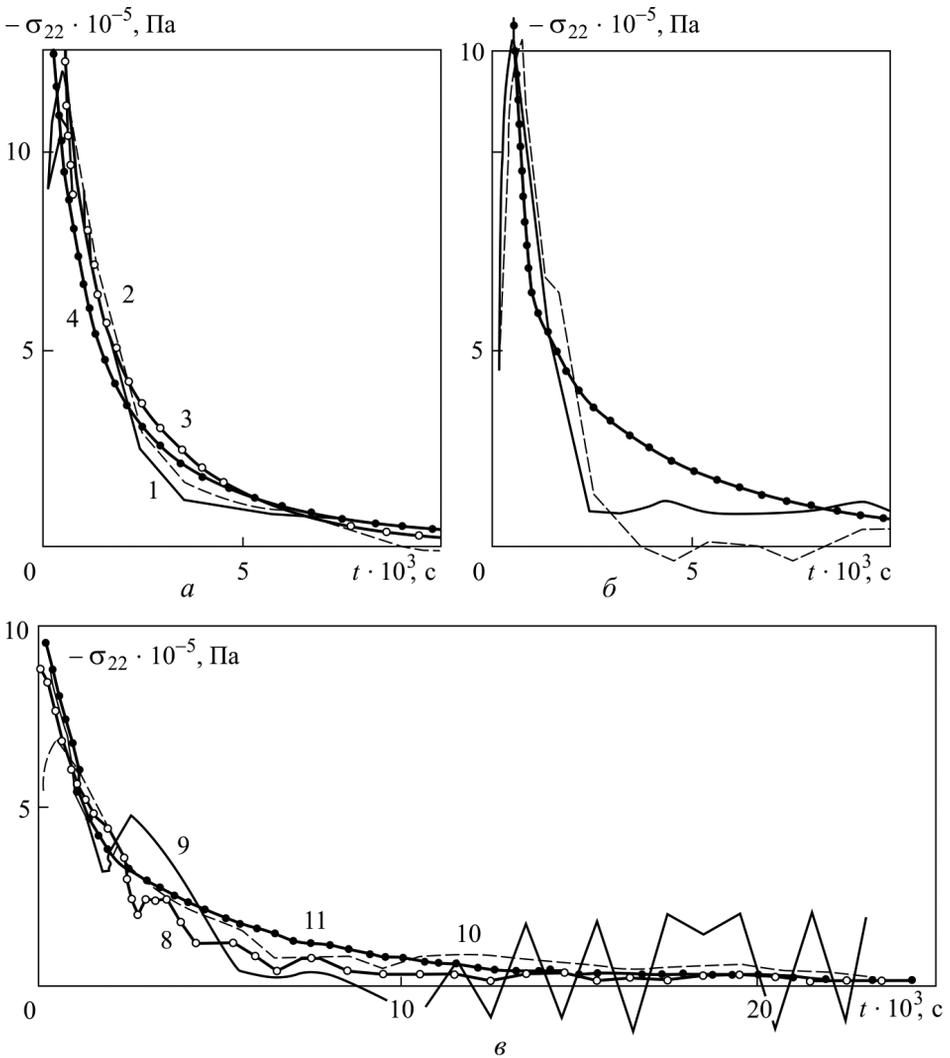
$$P_{\delta} = \frac{p}{\rho_0 V_0} \sqrt{\frac{\rho_0}{K}}; \quad V = \frac{v}{V_0}; \quad G = \frac{dV}{ds}; \quad \xi = \frac{2\rho_0 b^2}{m}; \quad s = \frac{t}{b} \sqrt{\frac{K}{\rho_0}},$$

где  $K$  – модуль объемного сжатия;  $V_0$  – скорость удара в момент контакта; для сравнения кривыми 4 и 5 показаны функции  $V(s)$  и  $-G(s)/\xi$ , полученные из аналитического решения [18] для условий потенциального течения жидкости;

$$V = \frac{\xi}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[ \left( 1 - \frac{1}{2\lambda_1} \right) \exp(\lambda_1 s) - \left( 1 - \frac{1}{2\lambda_2} \right) \exp(\lambda_2 s) \right],$$

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2} \left( \xi \mp \sqrt{\xi^2 - 2\xi} \right) \quad (0 < s \leq 2).$$

Результаты расчетов на рис. 13 приведены в системе координат  $X_i = X_i^0/b$  ( $i = 1, 2$ ), где  $X_i^0$  – координаты Лагранжа, фиксирующие начальное положение частиц среды. Получено, что растяжение в

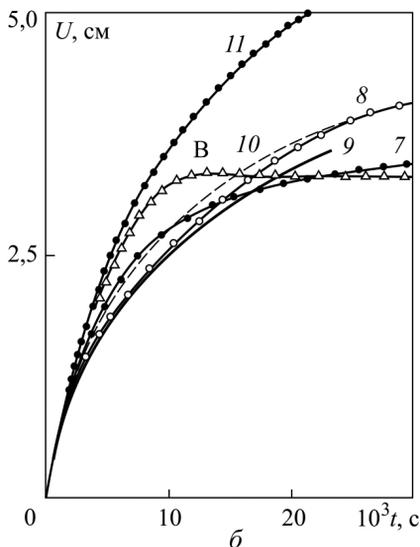
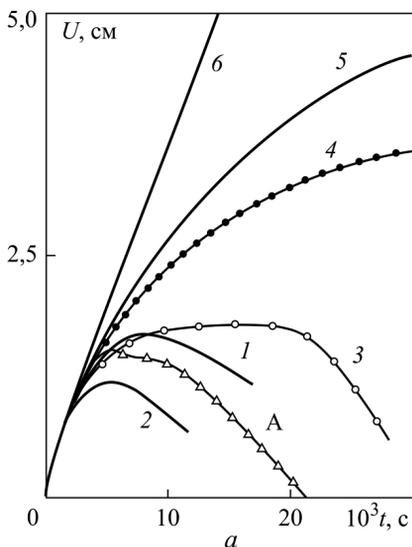


**Рис. 10.** Изменение во времени расчетных напряжений в грунте под штампом в вариантах с номерами, указанными на кривых:

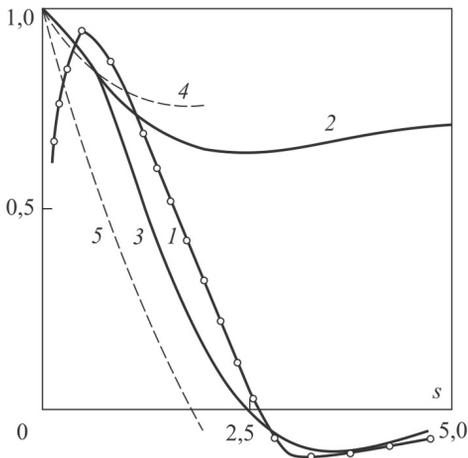
*а* – варианты 1–4; *б* – варианты 5–7; *в* – варианты 8–11

сrede впервые возникает при  $s = 2,4$  у поверхности ударника в точках на расстояниях  $\pm X_1^0/b \sim 0,5$  от диаметральной плоскости. В процессе торможения ударника зона растяжения расширяется, как это видно на рис. 13 (левая часть), где показано положение границы зоны растяжения жидкости в моменты времени  $s = 2,88; 3,80; 5,66$ . Наибольшее (безразмерное) растяжение  $P_0 = -0,151$  ( $p = -15 \cdot 10^5$  Па) достигается при  $s = 2,88$ , т.е. в реальных условиях происходит образование кратера.

Волновое поле давлений в среде при  $s = 3,80$  показано на рис. 13 справа; цифры в шести зонах означают диапазоны давлений  $P_\delta$ :



**Рис. 11.** Изменение во времени расчетных перемещений штампа в вариантах с номерами, указанными на кривых, и экспериментальные смещения штампа (А) на суглинистом и (В) на песчаном грунтах: а – варианты 1-6; б – варианты 7-11



**Рис. 12.** Параметры взаимодействия ударника со средой по результатам численного расчета в сравнении с аналитическим решением

Зона 1	$-0,1375 < P_\delta < -0,1125;$	Зона 2	$-0,1125 < P_\delta < -0,0375$
Зона 3	$-0,0375 < P_\delta < +0,0375;$	Зона 4	$0,0375 < P_\delta < 0,0875$
Зона 5	$0,0875 < P_\delta < 0,1625;$	Зона 6	$0,1625 < P_\delta < 0,2625$

Положение поверхности жидкости справа от диаметральной плоскости в разные моменты времени представлено на рис. 14 центрами лагранжевых ячеек верхнего слоя среды (точки  $j = 0, 1, 2, \dots$ ) в системе координат  $X_i^*$ , причем  $X_1^* = 0,04X_1 + u_1/b$ ,  $X_2^* = u_2/b$ , где  $u_i$  – компоненты вектора смещения центров ячеек, совмещенных с осью  $X_1^*$  при  $s = 0$ . Для наглядности изображения горизонтальных смещений начальное положение частиц вдоль  $X_1^*$  введено с масштабным коэффициентом 0,04, т.е. при  $s = 0$  для радиуса ударника (область А

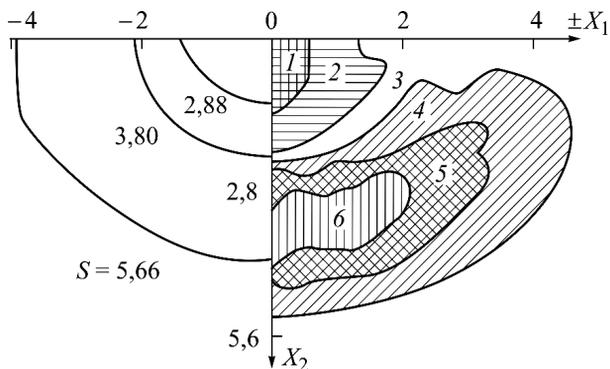


Рис. 13. Положение границы зоны растяжения жидкости в различные моменты времени от момента контакта  $s$  (слева) и поле давлений при  $s = 3,8$  в шести зонах  $P_j$  (справа)

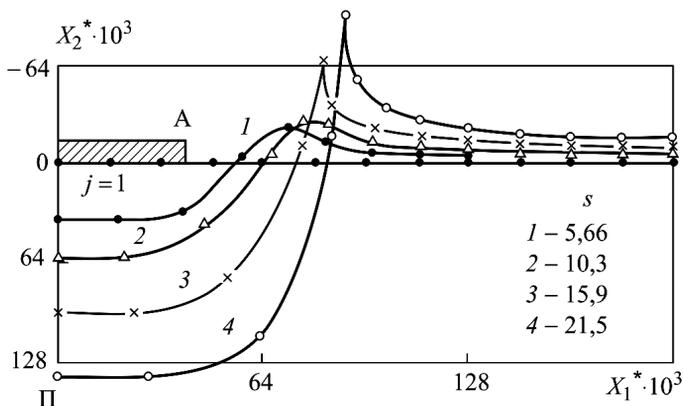


Рис. 14. Положение поверхности жидкости справа от диаметральной плоскости в моменты времени  $s$

на рис. 14)  $j = 2,5$ ;  $X_1^* = 0,04$ ;  $X_2^* = 0$ .

Численное моделирование высокоскоростного удара по разным средам в [20] проведено также в гидродинамическом приближении. Материалы этих исследований тесно связаны с проблемой противометеоритной защиты космических кораблей. Основное внимание было сосредоточено на проникание ударника в мишень с определением картины и параметров образования кратера. Рассматривались задачи соударения ударников малой плотности с мишенями для определения влияния пористости космического вещества на окончательные размеры кратера. Работа проведена в лаборатории космических исследований с использованием программ, основанных на трех схемах — эйлеровой, лагранжевой и частиц в ячейках, что обеспечивало сшивание всех стадий рассматриваемого процесса при ударе. Так, для изучения систем противометеоритной защиты применялись программа частиц в ячейках третьего поколения VISTA и объединенные программы VISTA-GRAM и VISTA-DEPROSS [21–23]. Получены поля давлений и массовых скоростей в мишени, что дает принципиальную возможность перейти к оценкам сейсмических эффектов. Для иллюстрации на

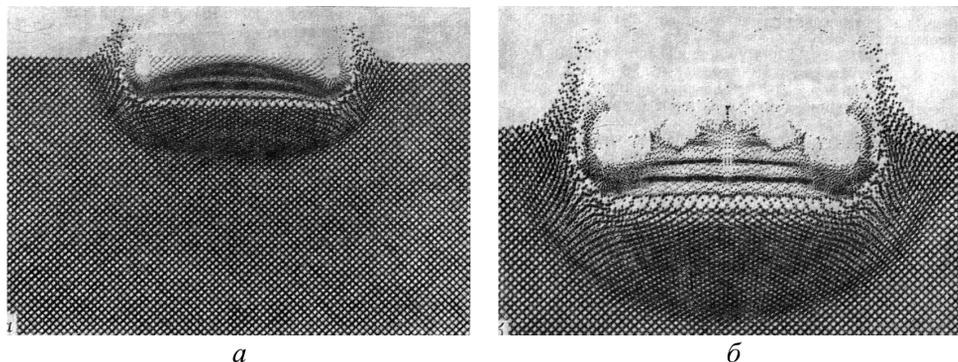


Рис. 15. Конфигурация ударника и кратера при скорости удара 20 км/с в моменты времени 0,238 мкс (а) и 0,418 мкс (б) от начала контакта

рис. 15 представлена визуализация результатов моделирования эффектов удара со скоростью 20 км/с в последовательные моменты времени.

**Сейсмический эффект ударов астероидов.** Силу землетрясения характеризует сейсмическая интенсивность (или балльность  $J$ ), зависящая от магнитуды  $M$ , связанной с энергией сейсмического источника и эпицентральным расстоянием, убывающей от эпицентра к периферии. Для магнитуды используют ряд определений. По ранней магнитудной шкале Рихтера магнитуда определяется как десятичный логарифм амплитуды записи сейсмографом с определенными параметрами на твердом грунте в 100 км от эпицентра. При очень больших магнитудах применяют телескопическую шкалу и унифицированную шкалу Гутенберга.

Полную энергию очага  $W$  (в эргах) в функции магнитуды определяют по формуле [24]  $\lg W = \alpha M + B_1$ , где для сильных землетрясений  $\alpha = 1,5$ ;  $B_1 = 12$  и для слабых землетрясений  $\alpha = 1,8$ ;  $B_1 = 11$ . Например, при слабом землетрясении с магнитудой  $M = 5$  имеем  $\lg W = 1,8 \cdot 5 + 11 = 20$  и  $W = 10^{20}$  эрг =  $10^7$  МДж, что по энергии соответствует взрыву бомбы с тротильным эквивалентом 2,36 кт. Интенсивность землетрясений на поверхности земли оценивают по 12-балльной шкале MSK-64 Медведева–Шпонхойера–Карника и MMSK-86, усовершенствованной Шебалиным в 1986 г.

Далее приведены результаты расчета магнитуд и балльности сейсмике по параметрам удара о грунт падающего астероида.

Энергия удара астероида, создающего сейсмические эффекты,  $Q_0$  равна кинетической энергии в момент контакта за вычетом доли энергии расхода образования кратера:

$$Q_0 = 0,5m_0V_0^2,$$

где  $m_0 = K_S m$  — расчетная масса космического тела;  $K_S$  — энергетическая доля сейсмике;  $m$  — масса космического тела.

Сейсмический эквивалент магнитуды  $M$  эффекта удара

$$M = \frac{\lg Q - B_1}{\alpha_1} \quad (Q = Q_0 \cdot 10^7),$$

где  $Q$  — энергия в эргах;  $B_1$  и  $\alpha_1$  — константы для средних значений сейсмической интенсивности:  $B_1 = 11,5$  и  $\alpha_1 = 1,65$ .

Интенсивность сейсмических колебаний  $J$  на конкретной площадке по 12-балльной шкале определяется в зависимости от магнитуды  $M$ , эпицентрального расстояния  $R_э$ , км, глубины залегания 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  $c_3 = 3,5$ ):

$$J = a_3 + b_3 - c_3 \lg \sqrt{R_э^2 + h^2}.$$

Учитывая широкий диапазон параметров астероидов, приведем данные по их энергетическому спектру в диапазонах космических тел диаметром  $d = 5 \dots 1000$  м и массой  $m_0 = (0,2 \dots 1,57) \cdot 10^6$  тыс. тонн при скоростях столкновения  $V_\Omega = 0,5 \dots 50$  км/с (табл. 3). Масса тела определялась приведением к сфере с плотностью материала  $3000 \text{ кг/м}^3$ . Зависимость магнитуды от энергии источника дана в табл. 4.

Таблица 3

**Энергетический спектр, МДж, астероидов в диапазонах их диаметров  $d$  и скоростей столкновения  $V_\Omega$  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	$1,57 \cdot 10^6$	$1,96 \cdot 10^{11}$	$7,85 \cdot 10^{11}$	$1,96 \cdot 10^{13}$	$7,85 \cdot 10^{13}$	$4,91 \cdot 10^{14}$	$1,96 \cdot 10^{15}$

Результаты вычисления значений магнитуд  $M$  и сейсмической интенсивности  $J$  в функции расстояния  $R_э$  (при  $h = 10^{-3}$  км) в широком диапазоне энергии удара  $Q_0$  приведены в табл. 5–7 и на рис. 16.

**Оценка уязвимости населения по сейсмической опасности.** Уязвимость населения оценивают по критериям различных степеней травматизма человека в результате воздействия поражающих факторов. Поражение воздушными ударными волнами оценивают по давлению и импульсу волны, термическими воздействиями — тепловым импульсом, а сейсмическими волнами — кинематическими перегрузками и различными вторичными факторами. Критерии поражения человека приведены в [24].

Уязвимость населения по сейсмической опасности оценивают для людей, размещенных в однотипных зданиях и в зданиях разных типов населенного пункта в целом.

Уязвимость населения  $V_{si}(J)$  в зданиях  $i$ -го типа равна отношению ожидаемого числа пораженных с летальным исходом  $M(N_i)$  в результате сейсмического воздействия интенсивностью  $J$  к общему числу

Таблица 4

**Зависимость магнитуды  $M$  от кинетической энергии  $Q_0$ , МДж, астероида в момент удара о земную поверхность**

$Q_0$	$M$	$Q_0$	$M$	$Q_0$	$M$	$Q_0$	$M$
50	1,94	$5 \cdot 10^4$	3,76	$5 \cdot 10^9$	6,78	$5 \cdot 10^{14}$	9,82
100	2,12	$5 \cdot 10^5$	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

Таблица 5

**Сейсмическая интенсивность  $J$  на радиусах  $R = R_Э$  территории от удара астероида с энергией в диапазоне  $(50 \dots 5) \cdot 10^4$  МДж**

$Q_0 = 50$ $M = 1,94$		$Q_0 = 5 \cdot 10^2$ $M = 2,54$		$Q_0 = 5 \cdot 10^3$ $M = 3,15$		$Q_0 = 5 \cdot 10^4$ $M = 3,76$	
$R$ , км	$J$ , балл	$R$ , км	$J$ , балл	$R$ , км	$J$ , балл	$R$ , км	$J$ , балл
0,1	9,40	0,2	9,26	0,4	9,10	0,4	10,03
0,2	8,35	0,4	8,21	0,6	8,50	0,6	9,41
0,3	7,74	0,6	7,60	0,8	8,07	0,8	8,97
0,4	7,30	0,8	7,15	1,0	7,73	1,0	8,64
0,5	7,00	1,0	6,80	1,2	7,45	1,2	8,36
0,6	6,68	1,2	6,54	1,4	7,21	1,4	8,12
0,7	6,45	1,4	6,30	1,6	7,00	1,6	7,92
0,8	6,25	1,6	6,20	1,8	6,82	1,8	7,74
0,9	6,00	1,8	5,92	2,0	6,67	2,0	7,58
1,0	5,90	2,0	5,76	2,2	6,53	2,2	7,44
—	—	—	—	2,4	6,40	2,4	7,30
—	—	—	—	2,6	6,27	2,6	7,18
—	—	—	—	—	—	2,8	7,00
—	—	—	—	—	—	3,0	6,97
—	—	—	—	—	—	3,2	6,87
—	—	—	—	—	—	3,4	6,78
—	—	—	—	—	—	3,6	6,69
—	—	—	—	—	—	3,8	6,61
—	—	—	—	—	—	4,0	6,53
—	—	—	—	—	—	4,2	6,45
—	—	—	—	—	—	4,4	6,38
—	—	—	—	—	—	4,6	6,32
—	—	—	—	—	—	4,8	6,25
—	—	—	—	—	—	5,0	6,19

**Сейсмическая интенсивность  $J$  на радиусах  $R = R_{\Sigma}$  территории от удара астероида с энергией  $Q_0 = 5 \cdot 10^5 \dots 5 \cdot 10^9$  МДж**

$Q_0 = 5 \cdot 10^5$ $M = 4,36$		$Q_0 = 5 \cdot 10^6$ $M = 4,97$		$Q_0 = 5 \cdot 10^7$ $M = 5,58$		$Q_0 = 5 \cdot 10^8$ $M = 6,18$		$Q_0 = 5 \cdot 10^9$ $M = 6,8$	
$R, \text{ км}$	$J, \text{ балл}$	$R, \text{ км}$	$J, \text{ балл}$						
1	9,54	1	10,45	2	10,30	5	9,83	5	10,70
2	8,59	2	9,40	4	9,26	10	8,77	10	9,68
3	7,87	3	8,78	6	8,64	15	8,16	15	9,06
4	7,44	4	8,35	8	8,20	20	7,72	20	8,63
5	7,10	5	8,00	10	7,86	25	3,38	25	8,29
6	6,82	6	7,73	12	7,59	30	7,10	30	8,00
7	6,59	7	7,50	14	7,35	35	6,87	35	7,78
8	6,38	8	7,29	16	7,15	40	6,66	40	7,57
9	6,20	9	7,11	18	6,97	45	6,49	45	7,39
10	6,04	10	6,95	20	6,80	50	6,33	50	7,23
–	–	11	6,80	22	6,64	55	6,18	55	7,09
–	–	12	6,68	24	6,53	60	6,00	60	6,96
–	–	13	6,55	26	6,40	75	5,71	65	6,84
–	–	14	4,44	28	6,30	100	5,27	70	6,72
–	–	15	6,34	30	6,20	125	4,93	75	6,62
–	–	16	6,24	35	6,00	150	4,66	80	6,50
–	–	–	–	–	–	–	–	90	6,34
–	–	–	–	–	–	–	–	100	6,10
–	–	–	–	–	–	–	–	125	5,84
–	–	–	–	–	–	–	–	150	5,56

Таблица 7

**Сейсмическая интенсивность  $J$  на радиусах  $R = R_{\Sigma}$  территории от удара астероида с энергией  $Q_0 = 5 \cdot 10^{10} \dots 5 \cdot 10^{14}$  МДж**

$Q_0 = 5 \cdot 10^{10}$ $M = 7,39$		$Q_0 = 5 \cdot 10^{11}$ $M = 8$		$Q_0 = 5 \cdot 10^{12}$ $M = 8,61$		$Q_0 = 5 \cdot 10^{13}$ $M = 9,21$		$Q_0 = 5 \cdot 10^{14}$ $M = 9,82$	
$R, \text{ км}$	$J, \text{ балл}$	$R, \text{ км}$	$J, \text{ балл}$	$R, \text{ км}$	$J, \text{ балл}$	$R, \text{ км}$	$J, \text{ балл}$	$R, \text{ км}$	$J, \text{ балл}$
5	11,64	50	9,05	50	9,96	50	10,87	50	11,78
10	10,60	100	8,00	100	8,91	100	9,83	100	10,71
20	9,54	150	7,38	150	8,29	150	9,20	150	10,11
30	8,92	200	6,95	200	7,85	200	8,77	200	9,67
40	8,48	250	6,61	250	7,52	250	8,42	250	9,33
50	8,14	300	6,33	300	7,24	300	8,16	300	9,06
75	7,53	350	6,09	350	7,00	350	7,91	350	8,82
100	7,09	400	5,89	400	6,80	400	7,72	400	8,62
125	6,75	450	5,71	450	6,62	450	7,53	450	8,44
150	6,47	500	5,55	500	6,46	500	7,38	500	8,28
–	–	600	5,28	600	6,18	600	7,10	600	8,00
–	–	700	5,04	700	5,95	700	6,87	700	7,72
–	–	800	4,84	800	5,75	800	6,66	800	7,57
–	–	900	4,66	900	5,59	900	6,49	900	7,39
–	–	1000	4,50	1000	5,41	1000	6,33	1000	7,23

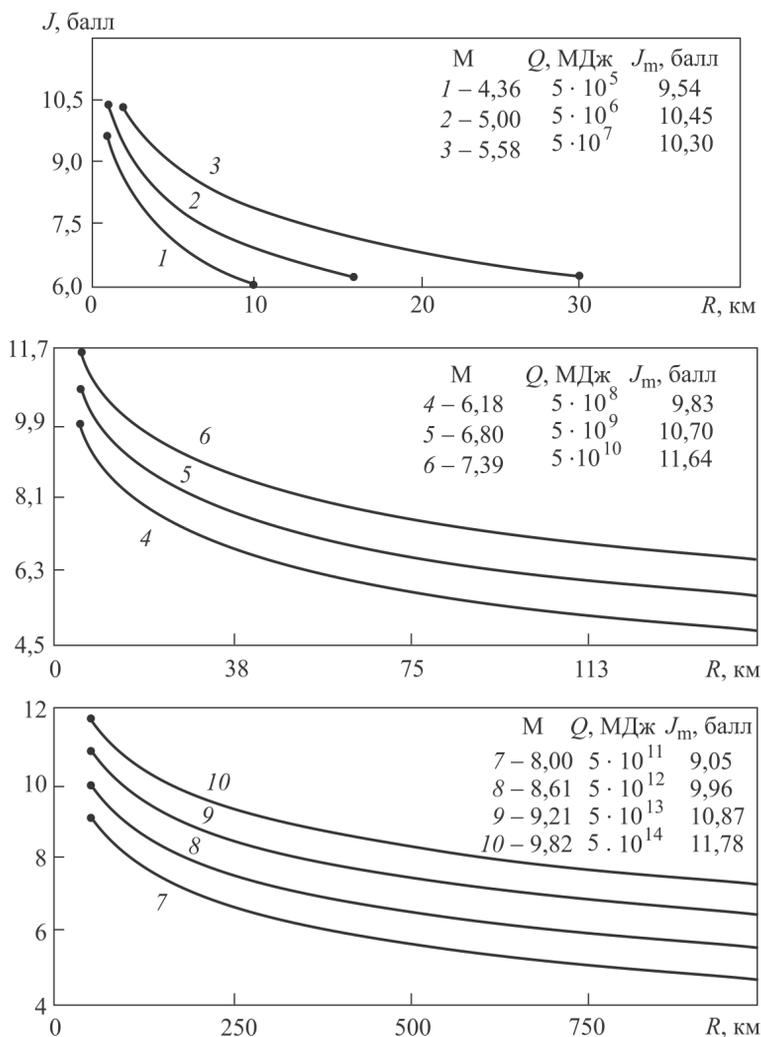
людей  $N_i$  в зданиях рассматриваемого типа [25, 26]:

$$V_{si}(J) = \frac{M(N_i)}{N_i}. \quad (17)$$

Уязвимость населения  $V_s(J)$ , проживающего в зданиях различного типа в целом по населенному пункту, равна отношению ожидаемого числа пораженных с летальным исходом  $M(N)$  в населенном пункте к общему числу  $N$ , проживающих в населенном пункте:

$$V_s(J) = \frac{M(N)}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m V_{si}(J) N_i. \quad (18)$$

Математическое ожидание  $M(N_i)$  числа пораженных с летальным исходом в зданиях  $i$ -го типа определяется по формуле  $M(N_i) =$



**Рис. 16.** Зависимость сейсмической интенсивности  $J$  от эпицентрального расстояния  $R_{\Sigma}$  при ударе астероидов с энергиями  $Q_0 = 5 \cdot 10^5 \dots 5 \cdot 10^{14}$  МДж

$= P_i N_i P_i(J)$ , где  $P_i$  — вероятность размещения людей в зданиях в течение суток;  $N_i$  — число людей в зданиях  $i$ -го типа;  $P_i(J)$  — вероятность гибели людей в зданиях  $i$ -го типа.

На основе предлагаемых математических моделей разработаны программные средства с применением ГИС-технологий.

Результаты расчетов с использованием указанных программных средств приведены в табл. 8 и 9. Варианты расчета для астероида диаметром  $d = 500$  м при скорости удара 50 км/с показаны на рис. 17.

Таблица 8

**Уязвимость населения в зданиях при землетрясениях**

Тип здания по шкале ММСК-86	Интенсивность землетрясения, балл						
	6	7	8	9	10	11	12
А	0	0,05	0,38	0,59	0,6	0,7	0,8
Б	0	0,01	0,18	0,53	0,6	0,7	0,8
В	0	0	0,05	0,38	0,59	0,7	0,8
С7	0	0	0,01	0,18	0,53	0,7	0,8
С8	0	0	0	0,05	0,38	0,6	0,8
С9	0	0	0	0,01	0,18	0,5	0,8

Таблица 9

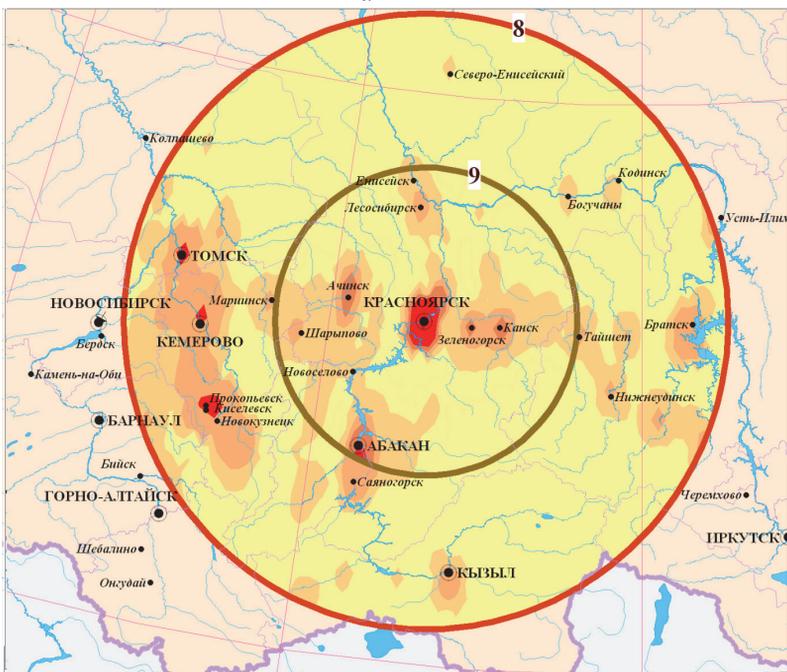
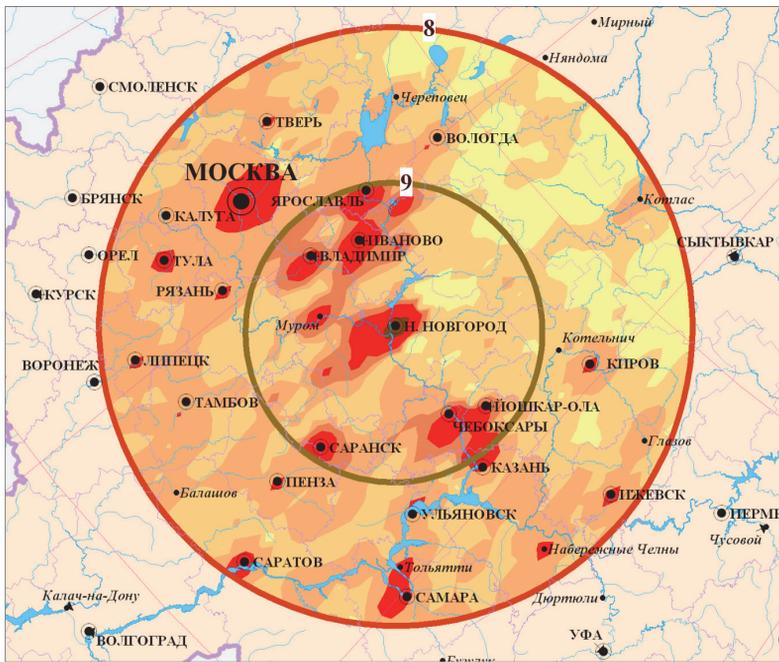
**Возможное число пораженных<sup>2</sup> (тыс.) с летальным исходом при землетрясениях от ударов астероидов диаметром  $d$  при скорости столкновения  $V$**

Параметры астероида		Европейская часть	Восточная Сибирь
$V$ , км/с	$d$ , м		
10	50	100	50
	500	800	100
	1000	1500	300
50	50	200	100
	500	2500	400
	1000	4500	800

**Эффекты Челябинского болида.** По данным НАСА и других источников, зафиксированное в ряде регионов Урала 15 февраля 2013 г. и взорвавшееся космическое тело (болид), причинившее значительный ущерб населению г. Челябинска, имело следующие ориентировочные данные: характерный размер  $d \sim 17$  м, масса  $m \sim 6400 \dots 7700$  т, высота взрыва  $H \sim 20 \pm 10$  км, скорость  $V \sim 18$  км/с, тротиловый эквивалент взрыва  $Q_{\text{Э}} \sim 470$  кт ТНТ.

Примем величину  $d$  за диаметр, тогда при плотности болида  $\rho_0 \sim 3000$  кг/м<sup>3</sup> его масса составит  $m \sim 7,7$  кт. При указанной выше скорости кинетическая энергия будет равна  $Q = 1,25 \cdot 10^9$  кДж. При теплоте взрыва тротила  $q_{\text{ТНТ}} = 4,24$  МДж/кг тротиловый эквивалент механической энергии болида будет равен  $Q_{\text{ТНТ}} = 294$  кт ТНТ, что составит 63 % величины  $Q_{\text{Э}}$ . Можно предположить, что в основном

<sup>2</sup>Возможное число погибших для европейской части России превышает число погибших в Восточной Сибири за счет более высокой плотности населения.



Математическое ожидание числа пораженных с летальным исходом, чел./кв.км



**Рис. 17.** Сценарии сейсмической опасности при ударе астероида диаметром 500 м о земную поверхность со скоростью 50 км/с в районе европейской части России (а) и Восточной Сибири (б)

данная доля эквивалента приходится на энергию воздушной ударной волны.

Оценим параметры поражающих факторов взрыва болида на высоте  $H = 20$  км, приняв следующее распределение энергии (тротилового эквивалента): для огненного шара 7 % и для воздушной ударной волны 63 %, т.е. энергетическая доля огненного шара  $K_{\Pi} = 0,07$ ; энергетическая доля воздушной ударной волны  $K_{В} = 0,63$ .

**Действие огненного шара.** Доля тротилового эквивалента, приходящаяся на огненный шар, равна 32,9 кт ТНТ. Поражающее действие огненного шара определяется тепловым потоком  $q$  и импульсом теплового излучения  $Q$ , зависящими от массы теплового источника  $M_{\Theta} = K_{\Pi} m = 0,07 \cdot 7,7 \cdot 10^3 = 539$  кт. По формулам (1)–(4) получим: диаметр огненного шара  $D = 2R_S = 3,97 \sqrt[3]{539} = 323$  м и  $\beta \equiv (2R_S/H)^2 = 2,61 \cdot 10^{-4}$ . При  $\Theta = 2300$  К и  $q_{\Gamma} = 47$  МДж/кг имеем:  $F = 161,7$ ;  $b_0 G = 2,04 \cdot 10^4$ ,  $b = 6,34 \cdot 10^{10}$ ,  $b_0 = b/\sqrt[3]{q_{\Gamma}} = 175,7 \cdot 10^6$ ,  $G = 1,16 \cdot 10^{-4}$ .

Тепловой поток по формуле (3)  $q = \beta G \Theta^4 / (F + \beta) = 5,24$  кВт/м<sup>2</sup> и импульс теплового излучения в эпицентре, рассчитанный по формуле (4),  $Q_{\Gamma} = \beta b_0 G \sqrt[3]{M_{\Theta} \Theta^2} / (F + \beta) = 0,647$  кДж/м<sup>2</sup> ожоговой опасности для людей не представляют (для сравнения при воздушных ядерных взрывах мощностью 100 кт ТНТ ожоги кожи 1-й степени происходят на расстояниях до 8,5 км [24]).

**Поражающее действие воздушной ударной волны.** Доля тротилового эквивалента, приходящаяся на воздушную ударную волну, равна 63 % или 294 кт ТНТ, что соответствует расчетной массе  $m_p = 0,63 \times 7,7 = 4,85$  кт =  $4,85 \cdot 10^6$  кг. Поражающее действие ударной волны определяется давлением  $\Delta P_{\Phi}$  и временем  $\tau_+$ .

При больших высотах взрыва, когда расчетные параметры по законам подобия выходят за пределы графика на рис. 6, проведем расчет по формулам (6)–(8). Давление на фронте волны, подошедшей к земной поверхности при  $\bar{H} = H/\sqrt[3]{m_p} = 2 \cdot 10^4 / \sqrt[3]{4,85 \cdot 10^6} = 118$  м/кг<sup>1/3</sup>,

$$\Delta P_{\Phi} = 0,084/118 + 0,27/118^2 + 0,7/118^3 = 7,3 \cdot 10^{-4} \text{ МПа.}$$

Длительность воздействия  $\tau_+ = 2,8$  с, и с учетом отражения волны от земной поверхности с коэффициентом  $K_{\text{отр}} = 2$  максимум давления в эпицентре составит  $\Delta P_{\text{отр}} = 1,46$  кПа.

При полученных значениях параметров поражающих факторов можно ожидать малые разрушения жилой застройки и разрушение остеклений зданий. Легкие поражения людей возможны метательным действием скоростного напора [24].

**Выводы.** Рассмотрены опасности, возникающие для населения при падении на земную поверхность космических тел, сопровождаемых ударными и взрывными воздействиями, генерирующими поражающие факторы – воздушную ударную волну, сейсмические волны и термическую радиацию.

Представленные математические модели и программные средства позволяют реализовать системный подход к прогнозированию последствий падения космических тел и планированию средств их снижения для населения, оценить последствия взрывов и падения космических тел в зависимости от параметров, сценариев катастроф, географических условий местности и уровней ее урбанизации.

Проводимая работа необходима для организации эффективного взаимодействия между специалистами и ведомствами по созданию средств защиты Земли от астероидно-кометной опасности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Котляревский В.А., Ларионов В.И., Суцев С.П.* Взрывные и ударные воздействия. // Энциклопедия безопасности. Строительство, промышленность, экология. Том 1. М.: Наука, 2005.
2. *Boslough Mark B.E.* The Tunguska meteorite. The computer program of modeling of a new generation of Mark Boslough. Dep. of Comp. Phys. and Mech. Sandia Nat. Lab. Albuquerque, 2007. 120 p.
3. *Базилевский А.Т., Иванов Б.А.* Обзор достижений механики кратерообразования // Механика образования воронок при ударе и взрыве: Сб. статей "Механика". М.: Мир. 1977. № 12. С. 172–227.
4. *Бейкер Н., Кокс П., Уэстайн П.* и др. Взрывные явления. Оценка и последствия / пер. с англ. М.: Мир, 1986.
5. *Действие ядерного оружия.* М.: Воениздат, 1963.
6. *Геринг Дж.* Высокоскоростной удар с инженерной точки зрения // Высокоскоростные ударные явления. М.: Мир, 1973. С. 468–516.
7. *Иванов Б. А.* Успехи механики кратерообразования // Удар. Взрыв. Разрушение. Сб. статей "Механика". М.: Мир, 1981. С. 204–238.
8. *Лаврентьев М. А., Титов В.М., Фадеенко Ю.И.* и др. Исследование соударения твердых тел в космическом диапазоне скоростей. // Фундаментальные исследования. Физмат. и техн. науки. Новосибирск: Наука, 1977. С. 255–258.
9. *Маршалл В.* Основные опасности химических производств / пер. с англ. М.: Мир, 1989.
10. *Русаков М.М., Шайдулин Б.К.* Соотношения между параметрами кратера и ударника из опытов по удару со скоростями до 30 км/с // Космические исследования, 1979. Том 17. С. 172–175.
11. *Brode H.L.* Numerical solutions of spherical blast waves // *App. Phys.*, 1955. No. 26. P. 766–775.
12. *Понд Р., Глас А.* Металлофизические исследования и распределение энергии // Высокоскоростные ударные явления / пер. с англ. М.: Мир, 1973. С. 428–467.
13. *Eichelberger R.J., Gehring J.W.* // *Jr. Rocketry.* 1962. No. 10. P. 13–18.
14. *Herrmann W., Jones A.H.* Proc. Simp. Hipervelocity Impact. 5th Denver, Colorado, oct. 1961.
15. *Котляревский В.А., Чистов А.Г.* Численный анализ дифракции волн в упруговязких средах при плоской деформации // Изв. АН СССР, МТТ. 1976. № 3. С. 120–132.
16. *Котляревский В.А., Румянцева Р.А., Чистов А.Г.* Расчеты удара штампа по грунтовому массиву с использованием различных моделей упругопластических сред в условиях плоской деформации // Изв. АН СССР, МТТ. 1977. № 5. С. 132–146.
17. *Котляревский В.А., Румянцева Р.А., Шишкин А.И.* Волны в мягком грунте как упруговязкой среде // Физика горения и взрыва. 1977. № 2. С. 229–238.
18. *Сагомоян А.Я.* Проникание. М.: Изд-во МГУ, 1974.

19. *Котляревский В.А.* Удар по пластинке, находящейся на поверхности жидкости // Изв. АН СССР, МЖГ. 1978. № 3. С. 143–145.
20. *Рини Т.* Высокоскоростные ударные воздействия / пер. с англ. М.: Мир, 1973. С. 164–219.
21. *Balmer H.A.* Mass. Inst. Techn. Rept. ASRL TR-128-3. Aug. 1965.
22. *Harlow F.H.* Alamos Scientific Laboratory report LA-2301, 1959.
23. *Wilkins M.L., Giroux R.* Lawrence Radiation Laboratory report UCRL-7322. April. 1963.
24. *Котляревский В.А.* К оценке травматизма людей при авариях // Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Кн. 5. М.: Изд-во АСВ, 2001. С. 283–306.
25. *Котляревский В.А., Ларионов В.И., Суцнев С.П.* и др. Землетрясения // Энциклопедия безопасности. Строительство, промышленность, экология. Том 3. Сейсмостойкость и теплозащита сооружений. М.: Изд-во АСВ, 2010. С. 2–24.
26. *Ларионов В.И., Фролова Н.И.* Особенности оценки уязвимости для сейсмических воздействий // Природные опасности России. М.: Изд-во КРУК, 2003. С. 120–129.

## REFERENCES

1. *Kotlyarevskiy V.A., Larionov V.I., Sushchev S.P.* Explosive and shock impacts. *Entsiklopediya bezopasnosti. Stroitel'stvo, promyshlennost', ekologiya. Tom 1.* [Encyclopedia of public safety. Construction, industry, the environment. Vol 1.]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 687 p.
2. *Boslough Mark B.E.* The Tunguska meteorite. The computer program of modeling of a new generation of Mark Boslough. Dep. of Comp. Phys. and Mech. Sandia Nat. Lab. Albuquerque, 2007. 120 p.
3. *Bazilevskiy A.T., Ivanov B.A.* Review of the achievements of crater formation mechanics. *Mekhanika obrazovaniya voronok pri udare i vzryve. Sb. statey "Mekhanika"* [Mechanics of crater formation upon impact and explosion. Coll. Pap. "Mechanics"], Moscow, 1977, no. 12, pp. 172–227.
4. *Baker W.N., Cox P.S., Westine P.S., Kulesz J.J., Strehlow R.A.* Explosion hazards and evaluation. Elsevier, 1983. 286 p. (Russ. ed.: Beyker N., Koks P., Uestayn P. i dr. Vzryvnye yavleniya. Otsenka i posledstviya. Moscow, Mir Publ., 1986. 319 p.).
5. *Deystvie yadernogo oruzhiya* [The effects of nuclear weapons]. Moscow, Voenizdat Publ., 1963. 683 p.
6. *Gering D.J.* High-speed blow from an engineering point of view. *High-velocity impact phenomena. Ed. R. Kinslow.* New York–London, Acad. Press, 1970. 536 p. (Russ. ed.: Gering D. Vysokoskorostnoy udar s inzhenernoy tochki zreniya. Vysokoskorostnyye udarnye yavleniya. Moscow, Mir Publ., 1973, pp. 468–516.).
7. *Ivanov B.A.* Achievements of crater formation mechanics. *Udar. Vzryv. Razrushenie. Sb. statey "Mekhanika"* [Blow. Explosion. Destruction. Coll. Pap. "Mechanics"]. Moscow, 1981, pp. 204–238.
8. *Lavrent'ev M.A., Titov V.M., Fadeenko Yu.I., et al.* Study of collisions of rigid bodies in space velocity range. *Fundamental'nye issledovaniya. Fizmat. i tekhn. nauki* [Fundam. Res. Phys. Math. Tech. Sci.]. Novosibirsk, 1977, pp. 255–258.
9. *Marshall V.C.* Major chemical hazards. Chichester, Ellis-Horwood, 1987. 587 p. (Russ. ed.: Marshall V. Osnovnyye opasnosti khimicheskikh proizvodstv. Moscow, Mir Publ., 1989. 672 p.).
10. *Rusakov M.M., Shaydulin B.K.* Relations between the parameters of a crater and a striker according to impact experiments at speeds up to 30 km/s. *Kosmich. issled.* [Cosmic Res.], 1979, vol. 17, pp. 172–175 (in Russ.).
11. *Brode H.L.* Numerical solutions of spherical blast waves. *App. Phys.*, 1955, no. 26, pp. 766–775.

12. Pond R., Glas A. Metal-physical research and distribution of energy. *High-velocity impact phenomena*. Ed. R. Kinslow. New York–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.).
13. Eichelberger R.J., Gehring J.W. *J. Rocketry*, 1962, no. 10, pp. 13–18.
14. Herrmann W., Jones A.H. Correlation of hypervelocity impact data. *Proc. 5th Simp. on Hypervelocity Impact*. Denver, Colorado, Oct. 1961.
15. Kotlyarevskiy V.A., Chistov A.G. Numerical analysis of diffraction of waves in viscoelastic media under plane strain. *Izv. Akad. Nauk SSSR. Mekh. Tverdogo Tela* [Proc. Acad. Sci. USSR. Mech. Solids]. 1976, no. 3, pp. 120–132 (in Russ.).
16. Kotlyarevskiy V.A., Rumyantseva R.A., Chistov A.G. Calculations of stamp strikes on the ground using different models of elastoplastic media under plane strain. *Izv. Akad. Nauk SSSR. Mekh. Tverdogo Tela* [Proc. Acad. Sci. USSR. Mech. Solids]. 1977, no. 5, pp. 132–146 (in Russ.).
17. Kotlyarevskiy V.A., Rumyantseva R.A., Shishikin A.I. Waves in the soft ground treated as a viscoelastic medium. *Fiz. Goreniya i Vzryva* [Combust. Explos. Shock Waves]. 1977, no. 2, pp. 229–238 (in Russ.).
18. Sagomonyan A.Ya. Pronikanie [Penetration]. Moscow, Mosk. Gos. Univ. Publ., 1974. 236 p.
19. Kotlyarevskiy V.A. Impact on a plate lying on the surface of a liquid. *Izv. Akad. Nauk SSSR. Mekh. Zhidk. i Gaza* [Proc. Acad. Sci. USSR. Fluid Dyn.], 1978, no. 3, pp. 143–145 (in Russ.).
20. Rini T. Numerical modeling of phenomena in high-velocity impact. *High-velocity impact phenomena*. Ed. R. Kinslow. New York–London, Acad. Press, 1970. 536 p. (Russ. ed.: Rini T. Chislennoe modelirovanie yavleniy pri vysokoskorostnom udare. *Vysokoskorostnye udarnye yavleniya*. Moscow, Mir Publ., 1973, pp. 164–219.
21. Balmer H.A. Mass. Inst. Tech. Rep. ASRL TR-128-3. Aug. 1965.
22. Harlow F.H. Alamos Sci. Lab. Rep. LA-2301. 1959.
23. Wilkins M.L., Giroux R. Lawrence Radiation Lab. Rep. UCRL-7322. Apr. 1963.
24. Kotlyarevskiy V.A. Estimation of personal injuries in accidents. *Avarii i katastrofy. Preduprezhdenie i likvidatsiya posledstviy*. Kn. 5 [Accidents and disasters. Prevention and mitigation. Vol. 5]. Moscow, ASV Publ., 2001, pp. 283–306.
25. Kotlyarevskiy V.A., Larionov V.I., Sushchev S.P., et al. Zemletryaseniya [Earthquakes]. *Entsiklopediya bezopasnosti. Stroitel'stvo, promyshlennost', ekologiya. Tom 3* [Encyclopedia of public safety. Construction, industry, environment. Vol. 3]. Moscow, ASV Publ., 2010, pp. 2–24.
26. Larionov V.I., Frolova N.I. Features of vulnerability assessment for seismic effects. *Prirodnye opasnosti Rossii* [Russia natural hazards]. Moscow, KRUK Publ., 2003, pp. 120–129.

Статья поступила в редакцию 26.03.2013

Анатолий Александрович Александров — д-р техн. наук, профессор, ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 100 научных работ в области ресурсо- и природо-сбережения 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, Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

A.A. Aleksandrov — Dr. Sci. (Eng.), professor. Rector of the Bauman Moscow State Technical University. Author of about 100 publications in the field of the resource and nature saving in storage and transportation of liquid hydrocarbon fuel using of cryogenic technology, theory of risks, fracture mechanics, industrial safety and exploitation of dangerous production objects.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russia.

Владимир Абрамович Котляревский — 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, Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

V.A. Kotlyarevskii — 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, theory of risks of 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, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russia.

Валерий Иванович Ларионов — 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, Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

V.I. Larionov — 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, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russia.

Сергей Петрович Сушев — д-р техн. наук, профессор, директор Научно-образовательного центра экстремальных ситуаций МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области теории рисков, механики разрушения, промышленной безопасности и эксплуатации опасных производственных объектов.

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

S.P. Sushchev — Dr. Sci. (Eng.), professor. Director of the Scientific-Educational Center for Study of Extreme Situations of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of theory of risks, fracture mechanics, industrial safety and exploitation of dangerous production objects.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russia.