

## **О ЗОНЕ НАЗЕМНЫХ РАЗРУШЕНИЙ ПРИ ВОЗДУШНОМ ВЗРЫВЕ КРУПНОГО МЕТЕОРИТА**

**В. П. КОРОБЕЙНИКОВ, П. И. ЧУШКИН, Л. В. ШУРШАЛОВ**

(Москва)

Проводится численное исследование зоны наземных разрушений, вызванных взрывом крупного метеорита в воздухе над поверхностью Земли. Полученные результаты применяются к случаю взрыва Тунгусского космического тела.

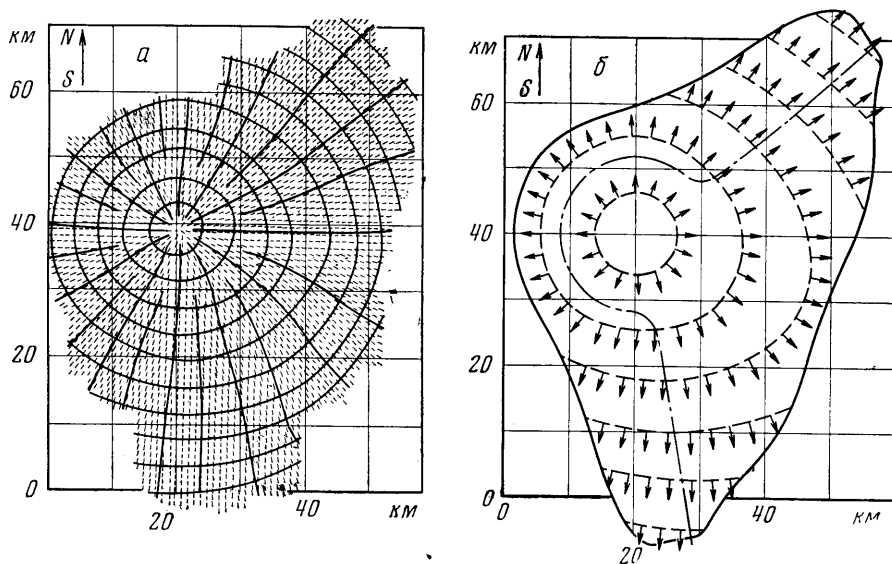
При входе метеорита в атмосферу может произойти взрывоподобный распад этого тела над поверхностью Земли. Общеизвестен случай феноменального по масштабу взрыва Тунгусского космического тела. Взрывов метеоритов меньших размеров в атмосфере в течение года отмечается несколько десятков, например, достаточно мощные высотные взрывы метеоритов Ревелсток и Вилна [1, 2].

При взрыве метеорита в атмосфере баллистическая и взрывная ударные волны могут вызвать значительные разрушения на земной поверхности, которые в случае Тунгусского космического тела имели катастрофический характер. В настоящее время собраны и опубликованы [3, 4] обширные данные о Тунгусском падении — замеры повала леса, барограммы, сейсмограммы и т. п. На фиг. 1, а приведена карта-схема поваленного лесного массива при Тунгусском взрыве [5]. Штрихами изображено поле направлений упавших деревьев, радиальные линии дают общее направление повала, а круговые линии, нормальные к последним, характеризуют распространение ударной волны по Земле. Зона разрушений практически симметрична относительно траектории полета космического тела и имеет характерную форму «бабочки» с двумя крыльями, где направление поваленных деревьев несколько отличается от радиального. По общей площади уничтоженного леса и по имеющимся барограммам энергия Тунгусского взрыва оценивается в пределах от  $10^{23}$  до  $10^{24}$  эрг. Надо отметить, что другие параметры Тунгусского космического тела (геометрические размеры, скорость полета, угол наклона траектории, высота взрыва) оцениваются также довольно приближенно.

Описанные далее расчет и исследование зоны наземных разрушений, вызванных взрывом крупного метеорита в атмосфере выполнены на основе модели для системы ударных волн при взрыве летящего метеорита, развитой авторами в [6-9]. Рассмотрено приложение к случаю Тунгусского падения, когда наиболее достоверно зарегистрировано главное последствие взрыва — повал лесного массива. В этих условиях следует решать обратную задачу, так подбирая значения определяющих параметров модельного взрыва, чтобы рассчитанная зона наземных разрушений соответствовала по форме и структуре фактически наблюдаемой в районе Тунгусского падения. Решение обратной задачи сводится по существу к многократному решению прямой задачи о взрыве метеорита, когда определяющие параметры заданы и требуется рассчитать соответствующую зону разрушений. В общем случае обратная задача может не иметь однозначного решения. Однако ввиду наличия ограничений на определяющие параметры можно ожидать, что искомое решение нужного характера будет получено.

В ранних попытках теоретического рассмотрения Тунгусского явления учитывалось действие либо только взрывной, либо только баллистической волны. Совместный эффект взрывной и баллистической волн был впервые изучен в работе [10], где проведено экспериментальное моделирование Тунгусского взрыва с помощью шнуровых зарядов. Однако ни в этой, ни в последующих работах [11, 12] не было получено требуемых количественных результатов относительно зоны разрушений.

Для системы ударных волн, образующихся при полете и взрыве метеоритов в воздухе, авторами [8-9] была построена теоретическая модель, ко-



Фиг. 1

торая дает приемлемое качественное и количественное описание явления. Эта система волн моделируется системой ударных волн, возникающих при взрыве полубесконечного цилиндрического заряда с переменной по длине удельной энергией, причем ось заряда ориентируется вдоль траектории, а его передняя точка располагается в той точке атмосферы, где метеорит взорвался. Данная модель дает возможность, не вникая в физические процессы, связанные с превращением и выделением энергии в метеоритном теле, определить при его полете и взрыве движение воздуха и рассчитать воздействие ударных волн на поверхность Земли.

Важно установить соответствие между характеристиками полета и взрыва метеорита и распределением энергии в модельном цилиндрическом взрыве. Для оценки (без учета абляции и излучения) удельной энергии в хвостовой части полубесконечного цилиндрического заряда, отвечающей удельной энергии баллистической волны  $E_1$ , используется известная аналогия (см., например, [13]) между гиперзвуковым стационарным течением около тонкого затупленного цилиндра и движением газа при цилиндрическом взрыве, согласно которой

$$E_1 = 1/8 \pi c_x \rho_\infty V_\infty^2 d^2$$

где  $c_x$  и  $d$  — коэффициент волнового сопротивления и диаметр поперечного сечения затупления тела,  $\rho_\infty$  — плотность окружающего воздуха,  $V_\infty$  — ско-

рость полета метеорита на квазистационарном участке траектории перед взрывом. Величина энергии в головной части полубесконечного цилиндрического заряда, отвечающая энергии взрывной волны  $E_2$ , оценивается на основе суммарных эффектов взрыва, зарегистрированных в форме картин наземных разрушений, сейсмограмм, барограмм и т. п. В расчетах принимались различные законы распределения удельной энергии по длине заряда, причем предпочтение было отдано ступенчатому закону, при котором удельная энергия в головной части заряда была на порядок выше удельной энергии в хвостовой части. По-видимому, определенные суждения о распределении удельной энергии при модельном взрыве можно сделать по измерениям и анализу свечения метеоритов.

Математическая задача, соответствующая рассматриваемой модели, формулируется следующим образом. Пусть имеется полупространство, ограниченное твердой плоской границей и заполненное покоящимся воздухом, в котором давление и плотность распределены так же, как в реальной атмосфере. В воздухе помещен полубесконечный цилиндрический объем, внутри которого находится сжатый газ с давлением, изменяющимся в соответствии с принятым распределением удельной энергии вдоль оси. Расположение головной точки и оси цилиндрического объема берется согласно параметрам траектории метеорита в момент его взрыва. Предполагается, что в этот момент ( $t=0$ ) сжатый газ начинает расширяться, создавая систему ударных волн в окружающем воздухе. Задача заключается в расчете возникающего движения воздуха и системы ударных волн и в определении их воздействия на твердую границу полупространства, имитирующую поверхность Земли. Разработанный метод решения этой сложной трехмерной нестационарной задачи включает в себя несколько этапов, где применяются как точный численный подход, так и аналитические приближения.

На первом этапе неоднородность атмосферы не принимается во внимание и решается двумерная нестационарная задача о взрыве полубесконечного цилиндрического заряда с переменной удельной энергией в однородной среде. На начальной стадии взрыва, пока ударная волна является еще достаточно сильной, она рассчитывается с помощью конечно-разностного метода [14]. Полученные численные результаты позволяют выяснить основные особенности рассматриваемого течения и продолжить решение с помощью секторного приближения до более поздних времен. В случае ступенчатого распределения энергии при использовании метода секторного приближения фактически проводятся следующие процедуры: аппроксимация головной части ударной волны полусферой и расчет течения в этой области по формулам для сферически-симметричного взрыва; расчет хвостовой области по формулам для одномерного цилиндрического взрыва; введение переходной области, где форма ударной волны и ее параметры определяются с помощью интерполяции.

На втором этапе решения модельной задачи рассматривается влияние неоднородности атмосферы в рамках квазиодномерной лучевой теории и гипотезы плоских сечений. Здесь используется то обстоятельство [15-18], что в слоистой атмосфере для расстояний порядка характерной высоты стандартной атмосферы  $H_0 = 8$  км давление и плотность, отнесенные к соответствующим локальным значениям в точке, которой достигла ударная волна, слабо зависят от неоднородности атмосферы.

Третий этап решения заключается в расчете воздействия системы воздушных ударных волн на поверхность Земли. Остановимся более подробно на методике такого расчета и обсудим некоторые результаты, полученные для зоны наземных разрушений при взрыве крупного метеорита в атмосфере.

При воздушных взрывах разрушения на Земле определяются действием потока воздуха за ударной волной, отраженной от земной поверхности. Параметры отраженной ударной волны зависят от интенсивности и угла наклона падающей ударной волны, форма и все характеристики которой находятся на первом и втором этапах решения задачи. Полный расчет отражения ударных волн в точной постановке представляет значительные трудности. Однако в ряде случаев при определении зоны наземных разрушений нет необходимости получать полное решение. Например, при Тунгусском взрыве падение деревьев было вызвано в основном воздушным потоком за ударной волной сразу после ее отражения от поверхности Земли, и поэтому в данном случае достаточно найти лишь начальные параметры отраженной волны.

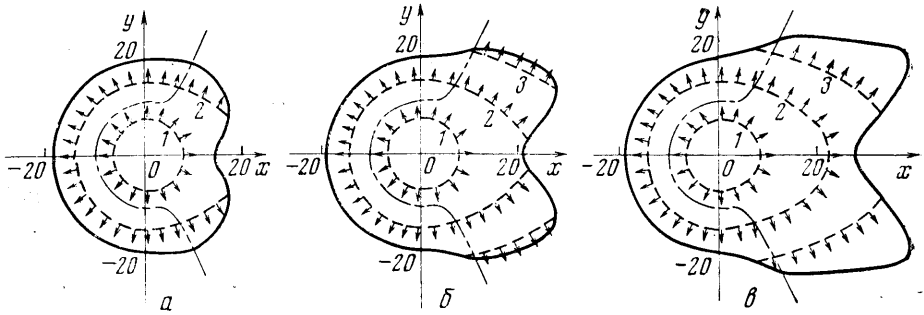
Для расчета начальной стадии отражения ударных волн была разработана следующая методика. По известной форме падающей ударной волны строятся линии ее пересечения с земной поверхностью, которая предполагается плоской. Воздушный поток непосредственно за отраженной волной направлен по нормальям к таким линиям пересечения. В любой точке этих линий можно найти угол наклона элемента падающей ударной волны к поверхности Земли. Зная этот угол и параметры падающей волны, легко установить, какой характер будет иметь отражение — регулярный или нерегулярный. В случае регулярного отражения параметры отраженной волны вычисляются по известным точным формулам. Для приближенного расчета нерегулярного отражения используются данные из работы [17], где приведены графики избыточного давления за отраженной ударной волной в зависимости от угла наклона и избыточного давления падающей волны. Таким образом, в любом случае можно найти величины избыточного давления и динамического напора за отраженной волной, которые и определяют разрушения на поверхности Земли. При повале деревьев основным фактором является динамический напор  $q$ , вычисляемый по горизонтальной составляющей скорости потока  $u$  ( $q = \rho u^2$ ).

Изложенная методика была применена для расчета зоны поваленного леса при взрыве Тунгусского метеорита. Помимо динамического напора  $q$  картина таких наземных разрушений зависит от удельной энергии баллистической волны  $E_1$ , энергии взрывной волны  $E_2$ , угла наклона  $\alpha$  траектории метеорита к поверхности Земли и высоты  $H$  конечной точки траектории, где произошел взрыв. Четыре последних параметра определяют исходные данные для соответствующего модельного взрыва полубесконечного цилиндрического заряда. Таким образом, обратная задача является многопараметрической и отыскание ее решения с хорошей точностью требует расчета большого количества вариантов. Сначала исследуем относительное влияние отдельных параметров на конфигурацию, размеры и структуру зоны поваленного леса.

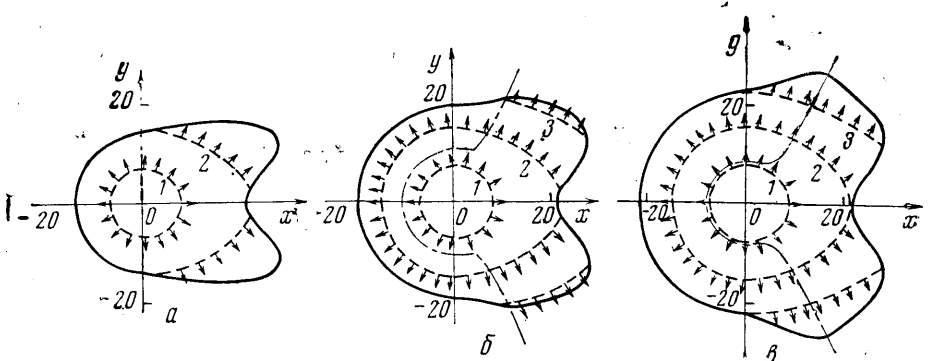
Влияние удельной энергии баллистической ударной волны  $E_1$  на картину разрушения лесного массива иллюстрирует фиг. 2, где  $E_1$  последовательно принимает значения  $2 \cdot 10^{16}$ ,  $4 \cdot 10^{16}$ ,  $6 \cdot 10^{16}$  эрг/см, а остальные параметры равны:  $E_2 = 5 \cdot 10^{22}$  эрг,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $H = 5$  км. На этой фигуре (а также на фигурах, приведенных далее) зона разрушений очерчена линией постоянного динамического напора  $q = 0.008$  кг/см<sup>2</sup>, соответствующего падению примерно 5% всех деревьев (см. [19]). Штриховыми кривыми изображены линии прихода ударной волны на поверхность Земли для времен  $t$  (цифры 1—4 относятся соответственно к  $t = 20, 40, 60$  и 35 сек); стрелками показаны направления падения деревьев, штрихпунктирной линией — граница между областями регулярного и нерегулярного отражения, причем последняя область располагается слева от этой границы. Значения на осях  $x, y$  даны в км. Как следует из данных резуль-

татов, увеличение энергии баллистической волны вызывает рост хвостовой части зоны разрушений и некоторое удлинение крыльев «бабочки», где направление упавших деревьев еще больше отклоняется от радиального.

Изменение формы и структуры зоны разрушенного леса в зависимости от энергии взрывной волны  $E_2$  представлено на фиг. 3. Здесь значения  $\alpha$  и  $H$  выбраны такими же, как в предыдущем случае,  $E_1 = 4 \cdot 10^{16}$  эрг/см, а величина  $E_2$  последовательно равняется  $2.5 \cdot 10^{22}$ ,  $5 \cdot 10^{22}$ ,  $10^{23}$  эрг. Уве-



Фиг. 2



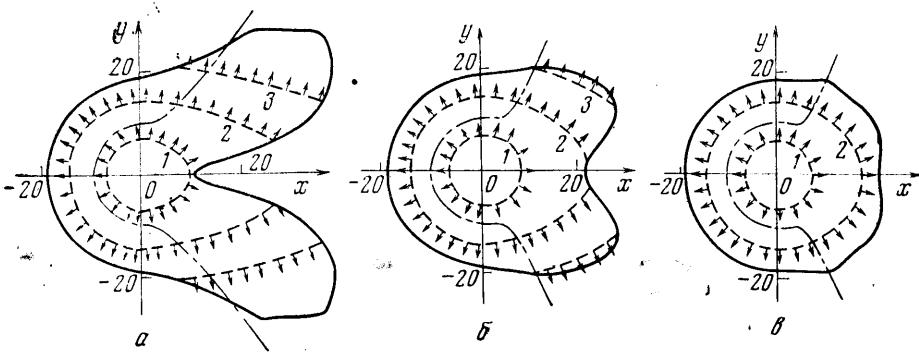
Фиг. 3

личение энергии взрывной волны приводит не только к росту головной части зоны разрушений, но также к расширению крыльев бабочки, что объясняется усилением ударной волны на ее переходном участке. С уменьшением энергии  $E_2$  растет область регулярного отражения, так как для более слабых ударных волн нерегулярное отражение наступает при больших углах наклона, т. е. при больших временах. При  $E_2 = 2.5 \cdot 10^{22}$  эрг ударная волна в рассчитанной зоне отражается только регулярно.

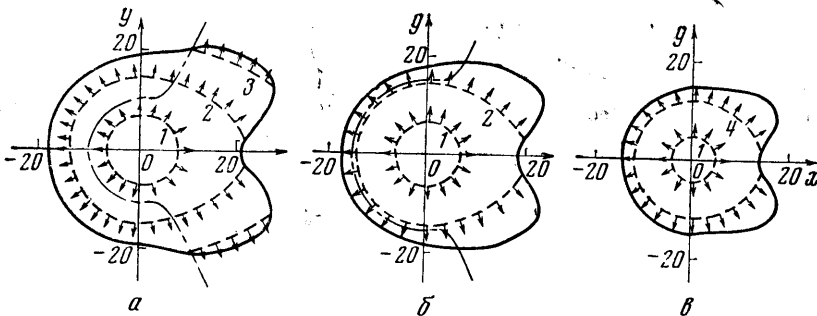
На фиг. 4 показано, как область поваленного леса зависит от угла наклона траектории  $\alpha$ , который принимает значения  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $40^\circ$ ; при этом  $E_1 = 4 \cdot 10^{16}$  эрг/см,  $E_2 = 5 \cdot 10^{22}$  эрг,  $H = 5$  км. Видно, что угол  $\alpha$  весьма сильно влияет на форму и размеры хвостовой части зоны разрушений. При уменьшении  $\alpha$  крылья бабочки сильно вытягиваются и между ними образуется глубокая выемка. Это вызвано тем, что вблизи оси  $x$  при малых  $\alpha$  падающая и отраженная ударные волны почти параллельны поверхности Земли и, значит, горизонтальная скорость и динамический напор  $q$  здесь невелики. Оказывается, что уже при умеренных величинах угла  $\alpha$  ( $\alpha \approx 40^\circ$ ) линии пересечения ударной волны с поверхностью Земли, оп-

ределяющие направления падения деревьев, близки к окружностям, что отвечает практически радиальному повалу леса.

Очевидно, что размеры наземных разрушений в большой степени определяются высотой взрыва  $H$ . Влияние этого фактора рассматривается на фиг. 5, где приводятся результаты для  $H=5,6$  и  $7,5$  км; в этом случае остальные параметры:  $E_1=4 \cdot 10^{16}$  эрг/см,  $E_2=5 \cdot 10^{22}$  эрг,  $\alpha=30^\circ$ . При изменении высоты взрыва в узких пределах форма зоны поваленного леса меняется почти геометрически подобно. Увеличение  $H$  приводит к отно-



Фиг. 4



Фиг. 5

сительному расширению области регулярного отражения (при  $H=7,5$  км волна всюду отражается регулярно). Это обстоятельство связано с тем, что при больших  $H$  для одинаковых времен  $t$  углы наклона ударной волны к земной поверхности уменьшаются, способствуя переходу к регулярному отражению.

Важно установить расположение на Земле изолиний динамического напора  $q$ , которые отвечают различной степени разрушений. Расчеты показали, что изолинии  $q$  не являются подобными, наиболее сильно изменяясь по форме в хвостовой части зоны разрушений. Максимальное значение  $q$  получается на некотором расстоянии от эпицентра, где, очевидно,  $q=0$ .

Искомое решение обратной задачи для Тунгусского метеорита определялось в большой серии расчетов. В наилучшем варианте для основных параметров были получены такие значения:  $E_1=6,3 \cdot 10^{16}$  эрг/см,  $E_2=5,8 \cdot 10^{22}$  эрг,  $\alpha=40^\circ$ ,  $H=6,5$  км. Для этого случая рассчитанная зона наземных разрушений, ограниченная изолинией  $q=0,008$  кг/см<sup>2</sup>, приведена на фиг. 1, б. Линии прихода ударной волны на Землю построены для мо-

ментов  $t=20\div 120$  сек с интервалом в 20 сек. Видно, что между модельной и реальной картинками поваленного леса имеется достаточно хорошее количественное соответствие в отношении как формы и размеров, так и внутренней структуры. Оказывается также, что энергия баллистической волны, вызвавшей повал леса, примерно вдвое больше энергии взрывной волны и, следовательно, они давали сравнимый эффект. Более строгий учет структуры изолиний  $q$  и неоднородности атмосферы может несколько увеличить величины энергий, не меняя их соотношения.

Поступила 29 IV 1973

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Follinsbee R. E., Douglas J. A. V., Maxwell J. A.* Revelstoke, a new type I carbonaceous chondrite. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1967, vol. 31, No. 10.
2. *Follinsbee R. E., Bayrock L. A., Cumming G. L., Smith D. G. W.* Vilna meteorite — camera, visual, seismic and analitic records. *J. Roy. Astron. Soc. Canada*, 1969, vol. 63, No. 2.
3. Проблема Тунгусского метеорита. Тр. Томского отделения Географического общества СССР, т. 5. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963.
4. Проблема Тунгусского метеорита, вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967.
5. *Фаст В. Г.* Вывал леса, произведенный Тунгусским метеоритом, Сб. «Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Материалы совещания 14–16 апреля 1971 г.». Новосибирск, Изд-во Томск. ун-та, 1971.
6. *Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В.* О гидродинамических эффектах при полете и взрыве в атмосфере метеоритных тел. Сб. «Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Материалы совещания 14–16 апреля 1971 г.». Новосибирск, Изд-во Томск. ун-та, 1971.
7. *Korobeynikov V. P., Chushkin P. I., Shurshalov L. V.* Gas dynamics of flight and explosion of meteorite bodies in the Earth's atmosphere. *Fluid Dynamics Trans.*, vol. 6, pt. 2, Warszawa, PWN, 1971.
8. *Korobeynikov V. P., Chushkin P. I., Shurshalov L. V.* Gas dynamics of the flight and explosion of meteorites. *Astronaut. Acta*, 1972, vol. 17, No. 4, 5.
9. *Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В.* О гидродинамических эффектах при полете и взрыве в атмосфере Земли крупных метеоритных тел. *Метеоритика*, 1973, вып. 33.
10. *Зоткин И. Т., Цикулин М. А.* Моделирование взрыва Тунгусского метеорита. Докл. АН СССР, 1966, т. 167, № 1.
11. *Золотов А. В.* Проблема Тунгусской катастрофы 1908 г. Минск, «Наука и техника», 1969.
12. *Бронштэн В. А.* Воздушные волны Тунгусского метеорита. *Астрон. вестн.*, 1969, т. 3, № 4.
13. *Черный Г. Г.* Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью. М., Физматгиз, 1959.
14. *Годунов С. К., Забродин А. В., Прокопов Г. П.* Разностная схема для двумерных нестационарных задач газовой динамики и расчет отбегания с отошедшей ударной волной. *Ж. вычислит. матем. и матем. физ.*, 1961, т. 1, № 6.
15. *Коробейников В. П., Карликов В. П.* Определение формы и параметров фронта ударной волны при взрыве в неоднородной атмосфере. Докл. АН СССР, 1963, т. 148, № 6.
16. *Korobeynikov V. P.* Gas dynamics of explosion. *Annual Rev. Fluid Mech.*, Palo Alto, Calif., 1971, vol. 3.
17. *Brode H. L.* Review of nuclear weapons effects. *Annual Rev. Nucl. Sci.*, Palo Alto, Calif., 1968, vol. 18. (Рус. перев.: Действие ядерного взрыва. М., «Мир», 1971.)
18. *Lutzky M., Lehto D. L.* Shock propagation in spherically symmetric exponential atmospheres. *Phys. Fluids*, 1968, vol. 11, No. 7.
19. The effects of nuclear weapons. Ed. S. Glasstone. Rev. ed. Wash., GPO (U. S. Atomic energy comm.), 1964.