

УДК: 004.942; 551.21; 523.68; 537.612; 623.454.83

Физические исследования, численное и аналитическое моделирование взрывных явлений. Обзор

Е. Л. Ступицкий^a, В. А. Андрущенко^b

Институт автоматизации проектирования Российской академии наук (ИАП РАН),
Россия, 123056, г. Москва, 2-я Брестская ул., д. 19/18

E-mail: ^astup@bk.ru, ^bandrusvictor@ya.ru

Получено 21.01.2020, после доработки — 23.02.2020.

Принято к публикации 03.03.2020.

В данном обзоре рассмотрен широкий круг явлений и задач, связанных с взрывом. Подробные численные исследования позволили обнаружить интересный физический эффект — образование дискретных вихревых структур сразу за фронтом ударной волны, распространяющейся в плотных слоях неоднородной атмосферы. Показана необходимость дальнейшего исследования такого рода явлений и определения степени их связи с возможным развитием газодинамической неустойчивости. Дан краткий анализ многочисленных работ по тепловому взрыву метеороидов при их высокоскоростном движении в атмосфере Земли. Большое внимание уделено разработке численного алгоритма для расчета одновременного взрыва нескольких фрагментов метеороидов и проанализированы особенности развития такого газодинамического течения. Показано, что разработанные ранее алгоритмы для расчета взрывов могут успешно использоваться для исследования взрывных вулканических извержений. В работе представлены и обсуждаются результаты таких исследований как для континентальных, так и для подводных вулканов с определенными ограничениями на условия вулканической активности.

В работе выполнен математический анализ и представлены результаты аналитических исследований ряда важных физических явлений, характерных для взрывов высокой удельной энергии в ионосфере. Показано, что принципиальное значение для разработки достаточно полных и адекватных теоретических и численных моделей таких сложных явлений, как мощные плазменные возмущения в ионосфере, имеет предварительное лабораторное физическое моделирование основных процессов, определяющих эти явления. Показано, что наиболее близким объектом для такого моделирования является лазерная плазма. Приведены результаты соответствующих теоретических и экспериментальных исследований и показана их научная и практическая значимость. Дан краткий обзор работ последних лет по использованию лазерного излучения для лабораторного физического моделирования процессов воздействия ядерного взрыва на астероидные материалы.

В результате выполненного в обзоре анализа удалось выделить и предварительно сформулировать некоторые интересные и весомые в научном и прикладном отношении вопросы, которые необходимо исследовать на основе уже полученных представлений: это мелкодисперсные химически активные системы, образующиеся при выбросе вулканов; маломасштабные вихревые структуры; генерация спонтанных магнитных полей из-за развития неустойчивости и их роль в трансформации энергии плазмы при ее разлете в ионосфере. Важное значение имеет также вопрос об исследовании возможного лабораторного физического моделирования теплового взрыва тел при воздействии высокоскоростного плазменного потока, который до настоящего времени имеет лишь теоретические толкования.

Ключевые слова: ударная волна, вихревые структуры, взрыв метеороида, вулканический взрыв, ядерный взрыв, спонтанное магнитное поле, лазерная плазма

UDC: 004.942; 551.21; 523.68; 537.612; 623.454.83

Physical research, numerical and analytical modeling of explosion phenomena. A review

E. L. Stupitsky^a, V. A. Andrushchenko^b

Institute of Computer Aided Design of the Russian Academy of Sciences (ICAD RAS),
19/18 2-nd Brestskaya st., Moscow, 123056, Russia

E-mail: ^astup@bk.ru, ^bandrusvictor@ya.ru

Received 21.01.2020, after completion — 23.02.2020.

Accepted for publication 03.03.2020.

The review considers a wide range of phenomena and problems associated with the explosion. Detailed numerical studies revealed an interesting physical effect — the formation of discrete vortex structures directly behind the front of a shock wave propagating in dense layers of a heterogeneous atmosphere. The necessity of further investigation of such phenomena and the determination of the degree of their connection with the possible development of gas-dynamic instability is shown. The brief analysis of numerous works on the thermal explosion of meteoroids during their high-speed movement in the Earth's atmosphere is given. Much attention is paid to the development of a numerical algorithm for calculating the simultaneous explosion of several fragments of meteoroids and the features of the development of such a gas-dynamic flow are analyzed. The work shows that earlier developed algorithms for calculating explosions can be successfully used to study explosive volcanic eruptions. The paper presents and discusses the results of such studies for both continental and under-water volcanoes with certain restrictions on the conditions of volcanic activity.

The mathematical analysis is performed and the results of analytical studies of a number of important physical phenomena characteristic of explosions of high specific energy in the ionosphere are presented. It is shown that the preliminary laboratory physical modeling of the main processes that determine these phenomena is of fundamental importance for the development of sufficiently complete and adequate theoretical and numerical models of such complex phenomena as powerful plasma disturbances in the ionosphere. Laser plasma is the closest object for such a simulation. The results of the corresponding theoretical and experimental studies are presented and their scientific and practical significance is shown. The brief review of recent years on the use of laser radiation for laboratory physical modeling of the effects of a nuclear explosion on asteroid materials is given.

As a result of the analysis performed in the review, it was possible to separate and preliminarily formulate some interesting and scientifically significant questions that must be investigated on the basis of the ideas already obtained. These are finely dispersed chemically active systems formed during the release of volcanoes; small-scale vortex structures; generation of spontaneous magnetic fields due to the development of instabilities and their role in the transformation of plasma energy during its expansion in the ionosphere. It is also important to study a possible laboratory physical simulation of the thermal explosion of bodies under the influence of high-speed plasma flow, which has only theoretical interpretations.

Keywords: shock wave, vortex structures, meteoroid explosion, volcanic explosion, nuclear explosion, spontaneous magnetic field, laser plasma

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 505–546 (Russian).

© 2020 Evgeniy L. Stupitsky, Viktor A. Andrushchenko

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Unported License.

To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/>
or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

1. Введение

В истории развития теории газовых и плазменных потоков в атмосфере, вызванных мощными взрывами, наблюдалось несколько всплесков научно-исследовательской активности. Первый произошел более семи десятилетий тому назад и был связан с созданием ядерного оружия. Он привел к созданию теории точечного взрыва, ставшей важнейшей ветвью газовой динамики с множеством геофизических и технологических приложений.

После проведения геофизических экспериментов с ядерными взрывами в ионосфере в начале 60-х годов содержание исследований мощных взрывов перешло в область физики плазмы с постоянно возрастающей ролью численного моделирования. Так как физическое описание явлений имело чрезвычайно сложный характер, то большое значение при разработке теоретических моделей имело место близкое по содержанию исследование лазерной плазмы. Многие аспекты этих работ достаточно подробно изложены в обзоре [Андрущенко, Ступицкий, 2020a].

Значительный интерес к задачам теории взрыва, вновь выдвинувшихся в ряд задач перво-степенной значимости, произошел около трех десятилетий тому назад в связи с назревшей к тому времени в сознании сначала узкого круга специалистов, а затем и широких масс населения проблемой астероидно-кометной опасности, являющейся в настоящее время, наряду с термоядерной войной, одной из основных угроз существования современной цивилизации. Работы по взрывной тематике, относящиеся к проблеме астероидно-кометной опасности, можно условно разделить на два направления. Первое — исследующее непосредственно «взрыв» самих малых космических тел (или их фрагментов) в атмосфере, начиная с первых работ, изучающих проблему в простейших постановках еще до возникновения самого понятия проблемы астероидно-кометной опасности [Покровский, 1964; Баум и др., 1968], и кончая исследованиями последних лет, изучающими ее на основе сложных комплексных методов математического моделирования [Шувалов и др., 2016; Андрущенко и др., 2018]. И второе — к которому относятся работы, рассматривающие воздействие на космические тела ядерных взрывов с целью их уничтожения (разрушения) или отклонения от столкновительной траектории с Землей [Заграфов, Шаненко, 1996; Ступицкий и др., 2019; Андрущенко и др., 2019б].

Цель данного обзора — попытаться отразить более широкий круг вопросов, непосредственно связанных с взрывными явлениями и вместе с тем имеющих самостоятельное научное и практическое значение. Это прежде всего ряд вопросов, связанных с мощными взрывными извержениями континентальных и подводных вулканов [Rampino, Self, 1982; Белоцерковский и др., 2000; Шувалов, Трубецкая, 2004; Андрущенко и др., 2019а, 2020б]. Особое внимание этой тематике уделено по двум причинам: ожидание возможного пробуждения в ближайшее время супервулкана Йеллоустоун на северо-западе США с непредсказуемыми последствиями для всего человечества [Добрецов, 2018; Елкина, 2019; Хлыстов, Клиге, 2018; Жигалин и др., 2018] и упоминавшаяся выше космическая угроза со стороны малых тел Солнечной системы [Катастрофические воздействия..., 2005; Андрущенко и др., 2007]. Единственным препятствием для реализации планов применения этих средств как в космосе, так и в атмосфере являются существующие международные договоры о запрещении использования ядерного оружия в этих средах [Кокошин и др., 2013]. Однако этот вопрос еще требует специального исследования.

Следует отметить, что рассматриваемые явления могут сопровождаться выбросом в стратосферу колоссального количества всевозможных взвесей, что приведет к возникновению многолетнего эффекта «ядерной» (в данном случае «вулканической» или «астероидной») зимы, в ходе которой вымрет вся биота, в том числе и человечество [Александров и др., 1986].

В обзоре значительное место уделено физическому моделированию взрывных плазменных процессов с помощью лазерного излучения, причем главное внимание отведено еще недостаточно изученным явлениям, к исследованию которых авторы имеют непосредственное отношение.

2. «Взрыв» малых космических тел в атмосфере планет и связанные с этим явления процессы и эффекты

2.1. Некоторые оценки возможности «взрыва» метеороидов в атмосфере.

Модель К. П. Станюковича

Представим ряд моделей, предложенных для описания взрывоподобного распада космических тел, движущихся в атмосфере с гиперзвуковой скоростью. Одной из первых стала модель теплового взрыва, предложенная в работе [Станюкович, Шалимов, 1961]. Основным фактором взрыва здесь предполагалась интенсивная тепловая волна, проникающая вглубь тела и вызывающая быстрое взрывоподобное поверхностное испарение вещества метеороида. Усовершенствованный вариант подобной модели приведен в работе [Мартынюк, 1980]. В ней был рассмотрен объемный прогрев тонкого поверхностного слоя излучением и описан возникающий при этом периодический фазовзрывной процесс в зоне метастабильного расплава. Интенсивное дробление вещества под воздействием внутренних ударных волн (УВ) завершался фазовым взрывом всего метеороида.

Другая модель теплового взрыва была предложена в работе [Шуршалов, 1982]. В случае если снежно-ледяной метеороид обладал достаточной оптической прозрачностью, то интенсивный и очень быстрый лучистый его нагрев реализовался сразу во всем объеме или в большей его части. При этом практически мгновенно происходил объемный фазовый переход, и все вещество метеороида переходило в газообразное состояние с примерно постоянными высокими значениями температуры и давления. Такое взрывоподобное явление в условиях объемного тепловыделения было изучено в работе [Искольдский и др., 1977].

Ниже за теоретическую схему, принимаемую для объяснения взрыва метеорных тел, выдвигалась концепция, предложенная К. П. Станюковичем, согласно которой взрыв осуществлялся в результате прогрева его массы извне при взаимодействии с окружающим газом. В работе [Покровский, 1964] предлагалась одна из простейших таких схем, реализующаяся в случае: 1) однородной массы метеороида; 2) более или менее равномерного обогрева его со всех сторон (что выполнялось, например, для вращающегося тела); 3) более или менее компактной формы метеороида, близкой к шаровой. Тогда при движении метеороида в соответствующих слоях атмосферы при осуществлении его интенсивного нагревания тепловая волна входила внутрь метеороида на глубину δ , определяемую из теории теплопроводности:

$$\delta = (\lambda t / c \rho)^{1/2}, \quad (1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности, c — удельная теплоемкость, ρ — плотность вещества метеороида, t — время прогрева.

Внешний прогретый слой δ , быстро расширившись, растягивал внутреннее холодное центральное ядро метеороида радиусом R , оставшееся холодным. Проведенные исследования в [Покровский, 1964] позволили установить оценки, при которых осуществлялся такой «взрыв» метеороида, когда возникающие во внутреннем ядре растягивающие напряжения σ были равны временному сопротивлению разрыва вещества метеороида σ_p (или превышали его). Критерием возможности осуществления подобного «взрыва» являлась температура прогрева $\theta_{\text{вз}}$ слоя δ , равная

$$\theta_{\text{вз}} = \sigma_p (R / \delta + 1 - 3\mu / 2) / \alpha E, \quad (2)$$

где μ — коэффициент Пуассона, E — модуль упругости, α — коэффициент линейного расширения (при нагревании) — все характеристики для вещества метеороида. Была оценена так-

же величина нижнего предела скорости v_{\min} входа в атмосферу метеорного тела, при которой был возможен взрыв рассмотренного характера:

$$v_{\min} = \left[6c\theta_{\text{вз}} / \beta \left(\alpha E \theta_{\text{вз}} / \sigma_p + 3\mu / 2 \right) \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где β — коэффициент, указывающий долю энергии движения метеороида, переходящую в теплоту, из интервала $[0, 1]$. Для железного тела из (3) $v_{\min} = 2.4$ км/с, так что при фактических скоростях входа метеороида в атмосферу в 10–50 км/с взрыв рассмотренного характера был вполне возможен.

В гипотезе С. С. Григоряна само слово «взрыв» заключалось в кавычки, поскольку это явление нельзя было назвать в прямом смысле взрывом, как, например, ядерные взрывы или взрывы различных химических реагентов. А это явление описывает разрушение метеороида (или концентрированного конгломерата его фрагментов) до мелкодисперсного состояния и мгновенной сублимации с переходом его (их) кинетической энергии во внутреннюю и кинетическую энергию окружающего малого объема газа в этот момент времени. И подобный феномен можно было трактовать как взрыв [Григорян, 1979]. На самом деле при супергиперзвуковых скоростях порядка десятка километров в секунду, присущих вторгающимся в атмосферу метеорным телам, такой быстротечный переход инициирует именно взрывные ударные волны [Добровольский, 2002]; и тогда за начальные условия задачи о взрыве метеороида можно было брать решение о сильном точечном взрыве [Седов, 1946] в неподвижной атмосфере, как это рекомендовал М. А. Лаврентьев [Войцеховский, 1980].

Наиболее полное комплексное численное исследование полета и взрыва в атмосфере метеорного тела было проведено с середины 1970-х до начала 1990-х годов группой авторов под руководством В. П. Коробейникова; данное исследование завершилось работой [Коробейников и др., 1991].

2.2. Исследование внутренней структуры области, охваченной фронтом УВ, при взрыве метеороида на начальной стадии

При численном решении двумерных задач о взрыве в неоднородной атмосфере с выделением фронта УВ в виде внешней границы был выявлен факт образования вихревых структур в охваченной УВ области газа для достаточно больших (порядка секунд) моментов времени [Андрущенко и др., 2011, 2013a]. Но позже было обнаружено, что вихревые структуры во внутреннем сферическом слое газа, примыкающем к фронту УВ, формируются уже на ранней стадии развития процесса — для времен порядка десятых долей секунды. На рис. 1 представлены линии равной завихренности $0.5 \text{rot } \mathbf{V}$ в плоскости (r, z) при $t = 0.6$ с для взрыва с энерговыделением $E = 15$ кт на высоте $z = 1$ км.

В круговом слое у фронта УВ $\left(\frac{\delta}{R} = \frac{1}{3} \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \sim 0.1 \right)$ образовались в сечении четыре вихревые

замкнутые зоны эллиптической формы, в которых направления вращения чередовались, начиная по направлению движения часовой стрелки в верхнем сечении, затем в следующем — в противоположном направлении и т. д. Этот факт означал, что для моментов времени, достаточно близких к началу взрыва, малые возмущения плотности (незначительное проявление стратификации атмосферы по высоте), возникшие только на фронте УВ, уже оказывали заметное влияние на решение системы уравнений внутри области взрыва в слое, примыкающем к фронту УВ. Поэтому было проведено теоретическое исследование решения во внутренней области сильного точечного взрыва (при пренебрежении противодавлением и гравитацией) в экспоненциальной атмосфере методом малых возмущений.

Исходная система уравнений в сферических координатах (R, ϕ, θ) для газодинамических функций ρ , P , u , v — плотности, давления, радиальной и азимутальной компоненты скорости

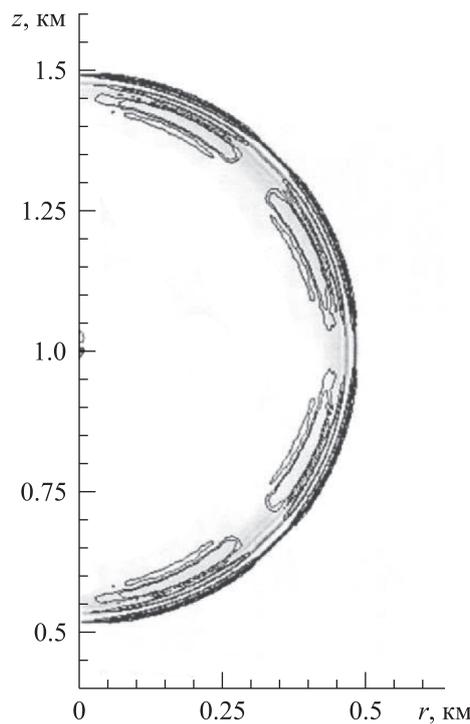


Рис. 1. Линии равной завихренности $0.5\text{rot } \mathbf{V}$ в плоскости (r, z) на момент времени $t = 0.6$ с для взрыва с энерговыделением $E = 15$ кт на высоте $z = 1$ км [Андрущенко и др., 2011, 2013а]

(c — скорость фронта УВ) — в предположении осевой симметрии (т. е. независимости функций от ϕ) имела вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\ln \rho) + u \frac{\partial}{\partial R}(\ln \rho) + \frac{v}{R} \frac{\partial}{\partial \theta}(\ln \rho) + \frac{\partial u}{\partial R} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial \theta} + 2 \frac{u}{R} - \frac{v}{R} \text{tg } \theta &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial R} + \frac{v}{R} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v^2}{R} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial R}, \quad \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial R} + \frac{v}{R} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{uv}{R} &= -\frac{1}{\rho R} \frac{\partial P}{\partial \theta}, \\ \frac{\partial}{\partial t} \ln \left(\frac{P}{\rho^\gamma} \right) + u \frac{\partial}{\partial R} \ln \left(\frac{P}{\rho^\gamma} \right) + \frac{v}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \ln \left(\frac{P}{\rho^\gamma} \right) &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнение фронта УВ:

$$R = S(\theta, t). \quad (5)$$

Уравнение движения фронта:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = c \sqrt{1 + \frac{1}{S^2} \left(\frac{\partial S}{\partial \theta} \right)^2}. \quad (6)$$

Условия на фронте:

$$\begin{aligned} u \sqrt{1 + \frac{1}{S^2} \left(\frac{\partial S}{\partial \theta} \right)^2} &= \frac{2c}{\gamma + 1}, \quad v \sqrt{1 + \frac{1}{S^2} \left(\frac{\partial S}{\partial \theta} \right)^2} = \frac{2c}{\gamma + 1} \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial \theta}, \\ P &= \rho_0 \frac{2c^2}{\gamma + 1} \exp \left(-\frac{S \sin \theta}{H} \right), \quad \rho = \rho_0 \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \exp \left(-\frac{S \sin \theta}{H} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Из закона сохранения энергии следует:

$$2\pi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos\theta d\theta \int_0^S \left\{ \rho(u^2 + v^2) + \frac{1}{\gamma-1} \left[P - P_a \exp\left(-\frac{R \sin\theta}{H}\right) \right] \right\} R^2 dR = E_0, \quad (8)$$

где E_0 — энергия взрыва, P_a — атмосферное давление на уровне моря.

Поставленная таким образом задача (4)–(8) исследовалась качественно методом возмущений — путем перехода к переменным $u = u_0 + \delta u$, $v = v_0 + \delta v$, $\rho = \rho_0 + \delta\rho$, $P = P_0 + \delta P$, где u_0 , v_0 , ρ_0 , P_0 — решение задачи о сильном точечном взрыве в однородной атмосфере [Седов, 1946], а δu , δv , $\delta\rho$, δP — малые возмущения при значениях параметра $\varepsilon = \gamma - 1$, близких к нулю. Было выявлено наличие вихревых движений внутри области газа, возмущенного УВ, т. е. было доказано, что уже на раннем этапе развития взрыва $\text{rot } \mathbf{V} \neq 0$ [Андрущенко и др., 2013б, 2015] (доказательство и конечный вид формулы здесь не приводятся из-за их громоздкости).

2.3. Исследование одиночного взрыва метеороида и формирования его внутренней структуры при наличии подстилающей поверхности на промежуточном этапе его эволюции

Ранее исследовалась задача об одиночном взрыве метеороида с энергосвободным $E = 25$ Мт в неоднородной атмосфере на высоте $H = 8$ км, имитирующим Тунгусское событие 1908 г. [Андрущенко и др., 1981]. В качестве математической модели нами была выбрана система нестационарных уравнений Навье–Стокса для сжимаемого газа в цилиндрической системе координат (r, z) с учетом излучения в приближении лучистой теплопроводности, при которой коэффициенты вязкости и лучистого переноса аппроксимировались степенными зависимостями от температуры и плотности (скейлинговым приближением). На рис. 2 построены два семейства изолиний, характеризующих вихревое движение (пунктиром изображены мгновенные линии тока) и тепловой режим (сплошные линии — изотермы) в облаке взрыва при $t = 26$ с. К этому

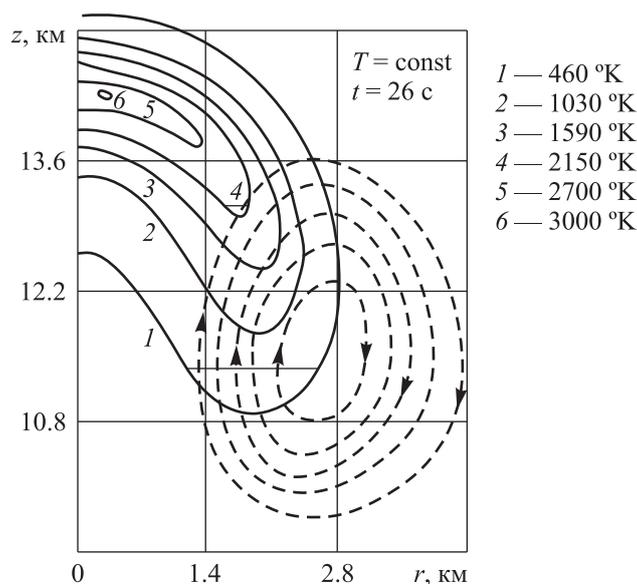


Рис. 2. Изолинии, характеризующие вихревое движение (пунктиром изображены мгновенные линии тока) и тепловой режим (сплошные линии — изотермы) в облаке взрыва на момент времени $t = 26$ с [Андрущенко и др., 1981]

моменту времени фронт УВ распространился от точки взрыва на значительное расстояние, а «огненный шар» трансформировался под воздействием гравитации в область, охваченную интенсивным конвективным движением. Центр «светящегося облака» всплыл на 4.2 км и отошел от оси симметрии на 0.3 км, тогда как центр вихревого тора поднялся на 1.5 км и отошел от оси на 2.7 км. Очевидно, что результаты моделирования получились неудовлетворительными, поскольку не произошло формирования наблюдаемого в действительности для такого мощного взрыва «полноценного» температурно-вихревого тора [Андрущенко и др., 1981]. Поэтому в последующих исследованиях нами выбиралась другая газодинамическая модель на основе уравнений Эйлера, не учитывающая диссипативные процессы, в которой этот недостаток был преодолен [Белоцерковский и др., 2000]; именно она в последующем нами и использовалась.

Рассматривалась пространственная задача о взрыве метеороида с энергосвободением $E = 60$ кт в неоднородной атмосфере с учетом противодавления и гравитации [Андрущенко и др., 2016а]. За исходную выбиралась система трехмерных эволюционных уравнений Эйлера для сжимаемого идеального газа в декартовых координатах (x, y, z) . Уравнение неразрывности заменялось на уравнение для натурального логарифма давления. В безразмерных переменных система имела вид

$$\begin{aligned}\frac{d\vec{V}}{dt} &= -\frac{T}{\gamma M^2} \vec{\nabla} p^* + \vec{E}, \\ \frac{dT}{dt} &= -(\gamma - 1)T \operatorname{div} \vec{V}, \\ \frac{dp^*}{dt} &= -\gamma \operatorname{div} \vec{V},\end{aligned}\tag{9}$$

где $p^* = \ln p$, $\vec{E} = (0, 0, -1)$, $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})$, $\operatorname{div} \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$.

Задача — трехпараметрическая, зависящая от двух безразмерных параметров (γ — показателя адиабаты, $M = (Lmg / \gamma RT)^{1/2}$ — числа Маха) и от размерного (Δ — высоты однородной атмосферы). Задача решалась в кубической области, центр взрыва совпадал с ее центром. Граничные условия следующие: на подстилающей поверхности — условия прилипания, непротекания и теплоизоляции $u = v = w = 0$, $\partial T / \partial z = 0$; $p^*(x, y, 0, t)$ находилось из третьего уравнения системы (9). На боковых и верхних гранях куба, которые достаточно далеко удалены от фронтов УВ, касательные компоненты скорости равны 0, а для нормальной компоненты производная по нормали равна 0, давление — $p = p_0 \exp(-z / \Delta)$, температура — $T = T_0$. В качестве начальных условий выбиралось решение двумерной задачи с учетом гравитации и противодавления для взрыва в экспоненциальной атмосфере с учетом противодавления до момента времени $t \approx 0.18$ с, когда радиус его фронта достигал величины $R_0 = 300$ м, а перепад давления на нем $P_\Phi / P_a \approx 10$ (начальными условиями для этой задачи бралось решение задачи о сильном взрыве Л. И. Седова). Далее отсчет велся от этого момента времени, принимаемого за $t_0 = 0.0$ с. Система дифференциальных уравнений аппроксимировалась разностными уравнениями с помощью явной двухшаговой разностной схемы — трехмерного аналога схемы Лакса–Вендроффа [Белоцерковский и др., 2000].

Задача решалась с целью выявления, как ударно-волновые и вихревые структуры взаимодействовали между собой при отражении УВ от плоскости. На рис. 3 представлена пространственная картина поверхностей равного давления и двух вертикальных плоскостей сечения с нанесенными на них линиями тока для моментов времени $t = 0.7, 0.8, 1.0$ и 1.5 с. Ясно, что при бесконечном количестве таких вертикальных плоскостей сечения линии тока образовывали топологическую вихревую структуру в виде тора с особыми точками типа фокусов, состав-

ляющих центральную осевую линию этого тора, как это было выявлено авторами ранее [Андрущенко и др., 2013a]. Из расположения поверхностей равного давления на рис. 3 было видно, что отраженная от подстилающей плоскости УВ к этим моментам времени уже прошла через центральную горячую область взрыва и устремилась вверх вслед за фронтом головной УВ. Кроме того, обнаружился факт, что сформировавшийся вихревой тор являлся весьма устойчивой структурой, сохраняющейся даже при прохождении через него достаточно интенсивной вторичной УВ (см. рис. 3).

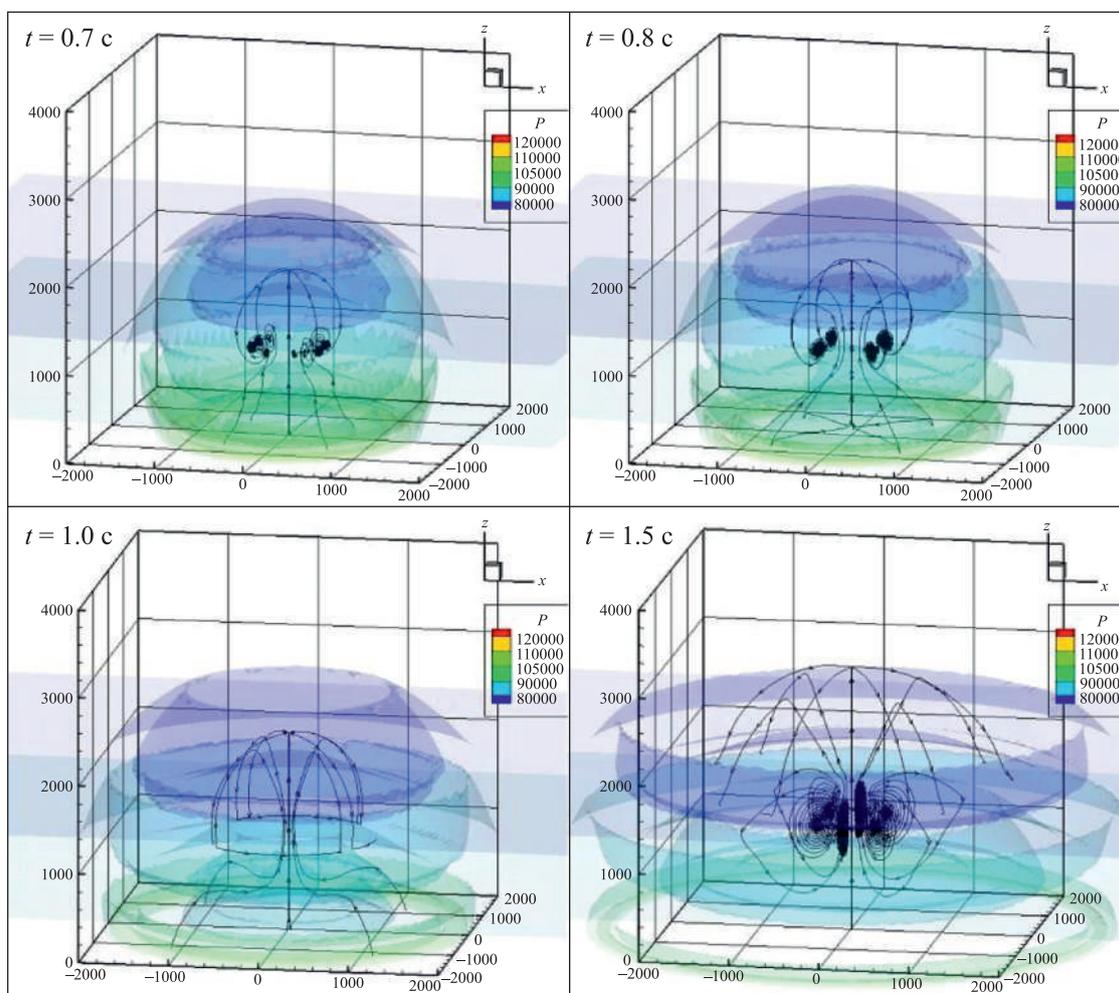


Рис. 3. Пространственная картина поверхностей равного давления и двух вертикальных плоскостей сечения с нанесенными на них линиями тока для моментов времени $t = 0.7, 0.8, 1.0$ и 1.5 с [Андрущенко и др., 2013a]

2.4. Изучение множественных взрывов фрагментов метеороида на заключительной стадии его полета

В качестве математической модели явления выбрана модель, представленная в п. 2.3, но в отсутствие нижней подстилающей плоскости и, соответственно, с выбором на ней краевых условий как на других границах [Андрущенко и др., 2018; Лукашенко и др., 2019]. Рассмотрен вариант, когда метеороид раздробился на шесть осколков массой $m = 1.17$ т каждый, как наиболее интересный случай (в вышеуказанных работах рассматривались случаи также для двух и трех осколков); осколки из-за интерференции разошлись, образовав структуру в форме правильного шестиугольника в вертикальном сечении (x, z) со сторонами $L = 130$ м (рис. 4).

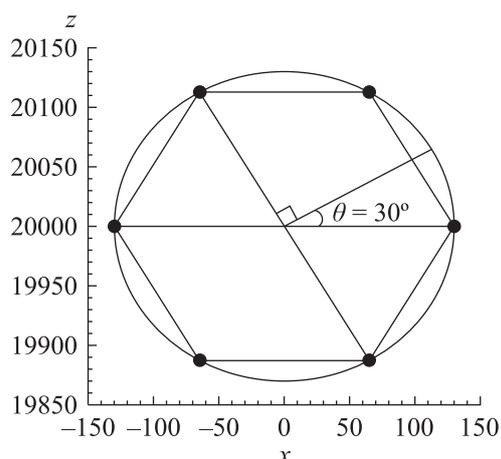


Рис. 4. Разлет фрагментов метеороида в форме правильного шестиугольника в плоскости (x, z) со сторонами $L = 130$ м [Андрущенко и др., 2018; Лукашенко и др., 2019]

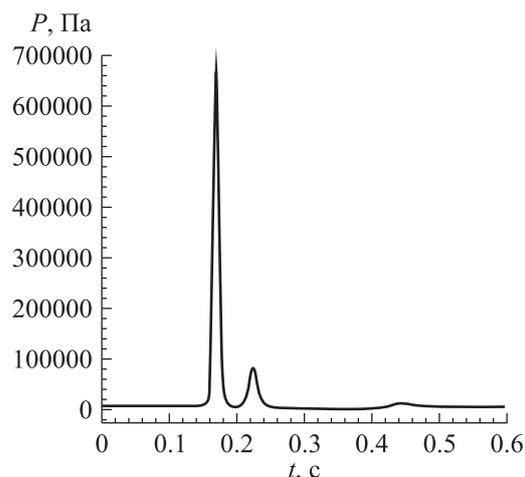


Рис. 5. Давление на момент времени $t = 0.169$ с [Андрущенко, Мурашкин, 2016б]

В этот момент они затормаживались, и их кинетическая энергия мгновенно полностью переходила в энергию индивидуальных взрывов. Задача сугубо модельная, и такая ее постановка выбрана, так как здесь оптимально проявляются все свойства, присущие множественным взрывам. За начальные условия выбирался момент времени $t = 0.031$ с, когда сферические УВ шести сильных точечных одновременных взрывов энергии $E = mv^2 / 2 = 0.84 \cdot 10^{11}$ Дж каждый [Седов, 1946] приходили в соприкосновение друг с другом на всех сторонах шестиугольника, но еще не провзаимодействовали. Именно этот момент в постановке задачи принимался за начальный $t = 0.0$ с, значения давления на их фронтах при этом были равны $p_\phi = 68$ кПа. Для момента времени $t = 0.169$ с происходила фокусировка шести УВ в центре системы, давление в нем возрастало на порядок ($p_\phi \approx 670$ кПа), и этот процесс мог уже трактоваться как кумулятивный эффект [Андрущенко, Мурашкин, 2016б] (см. рис. 5).

На рис. 6 приведены картины распределения давления и мгновенных линий тока для шести синхронных взрывов фрагментов метеороида в центральной вертикальной плоскости сечения (x, z) для двух моментов времени: $t = 0.23$ с (а), $t = 2$ с (б).

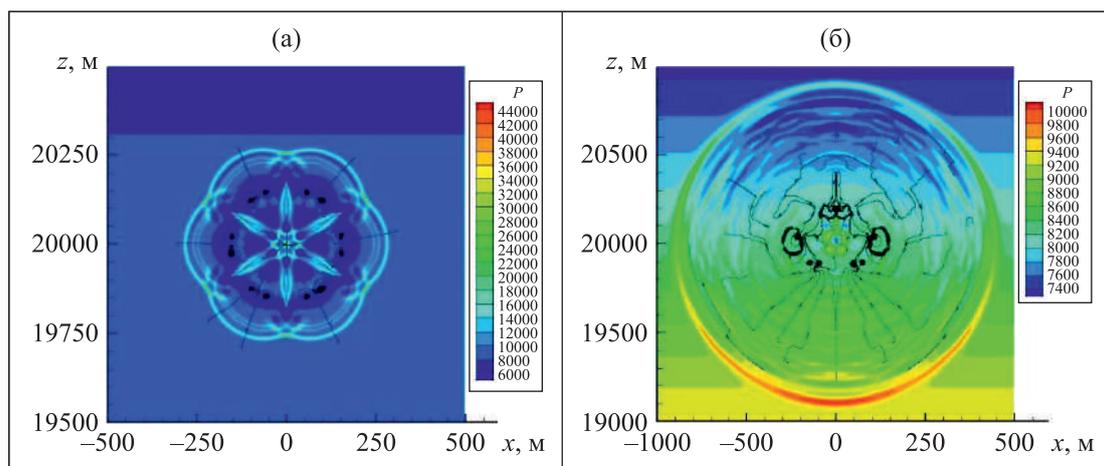


Рис. 6. Распределение давления и мгновенных линий тока для шести синхронных взрывов фрагментов метеороида в центральной вертикальной плоскости сечения (x, z) для двух моментов времени: а) $t = 0.23$ с; б) $t = 2$ с [Андрущенко, Мурашкин, 2016б]

На рис. 6, *a* хорошо видны все шесть головных и вторичных фронтов УВ и маховские конфигурации. Во внутренней области во всех шести ее частях, относящихся к каждому индивидуальному взрыву, уже сформировались вихревые структуры около шести окружностей, состоящих из особых точек типа фокусов. Неоднородность атмосферы для такого малого момента времени еще никак не проявилась, и все картины распределений симметричны относительно центра правильного шестиугольника.

В момент времени $t = 2$ с внешняя конфигурация общего головного фронта стала практически сферической (рис. 6, *b*). И для этого момента времени ударно-волновую фазу множественного взрыва можно было считать законченной (внизу — перепад давления на головном фронте УВ $p_{\phi}/p_a \approx 1.065$, а сверху — 1.11). Здесь фронт вторичной УВ догнал в верхней части возмущенной области головной фронт, несколько увеличив его интенсивность, а таковой в нижней части следовал за головным цугом (рис. 6, *b*). Полученные конфигурация внешнего фронта и вихревая структура внутри возмущенной области были идентичны таковым для одиночного взрыва на высоте 20 км с суммарной энергией шести взрывов.

3. Взрывные вулканические извержения

Проявление вулканизма — это совокупность сложных физических процессов, достаточно подробное количественное исследование которых стало возможным лишь в последние десятилетия в связи с мощным развитием вычислительной техники. Однако при оценке их влияния на окружающую среду следует иметь в виду, что из всех наблюдаемых геофизических и геологических явлений поток тепла через поверхность Земли с энергетической точки зрения наиболее значителен, так как связанная с ним отдача энергии в единицу времени (для всей Земли) в 10–100 раз больше, чем вся энергия, высвобождающаяся при землетрясении и вулканической деятельности. То есть тепловой поток из земных недр характеризует основной масштаб энергетики планеты. Остальные процессы, протекающие в земных недрах, в частности вулканы, с энергетической точки зрения являются как бы побочными, сопровождающими тепловую эволюцию планеты, но, по-видимому, способными вносить существенные региональные изменения в климатические, геологические и географические характеристики нашей планеты [Белоцерковский и др., 2000; Адушкин и др., 2008; Андрущенко и др., 2012].

3.1. Эксплозивные извержения континентальных вулканов

Здесь рассмотрены газодинамические аспекты, присущие извержениям вулканов, это процессы распространения в атмосфере при эксплозии интенсивных взрывных УВ и эруптивных облаков [Андрущенко и др., 2012].

3.1.1. Аналитическая модель мощного вулканического взрыва

В [Myagkov, 1998; Белоцерковский и др., 2000] приведена аналитическая модель сильного взрыва вулкана, имитирующая интенсивное кальдерообразующее извержение вулканической смеси пепла и газа. Предполагалось, что модель описывала точечный взрыв энергии E_0 , инициирующий сильную УВ, причем структура взрывной области состояла из самой УВ, облака вулканической смеси, следующей за ней, и источника массы (извергающего эту смесь) в центре. При этом модель рассматривалась в приближении, предложенном Г. Г. Черным, когда почти вся масса воздуха и смеси, сжатых УВ, концентрировалась в тонком слое у фронта УВ, в котором газодинамические функции были постоянны и равны их значениям на фронте u_f и P_f . Также предполагалось, что давление P_c внутри области, ограниченной этим слоем, и в облаке (через

контактную поверхность «воздух–облако») постоянно. Тогда уравнения, описывающие процесс эксплозии, таковы [Myagkov, 1998]:

$$\begin{aligned} d(Mu_f) / dt &= 4\pi R^2 P_c, \\ M &= 4 / 3\pi R^3 \rho_0, \\ 4 / 3\pi (R^3 - r_s^3) P_c / (\gamma - 1) + Mu_f^2 / 2 &= E_0 + \int_0^t P_c \cdot 4\pi r_s^2 r_s dt, \\ u_f &= 2\dot{R} / (\gamma - 1), \quad \rho_c = P_c / nAT, \end{aligned} \quad (10)$$

где t — время; $R(t)$, $r_s(t)$ — радиусы фронта УВ и контактной поверхности; γ , ρ_0 — показатель адиабаты и плотность невозмущенного воздуха; T — температура магмы в магматической камере; n — общая массовая доля летучей фракции; A — газовая постоянная.

Система (10) дополнялась уравнением для источника массы:

$$dm / dt = Q(t), \quad m = 4 / 3\pi r_s^3 \rho_c, \quad (11)$$

где $Q(t) > 0$ — поток массы из жерла. Система уравнений (10)–(11) замкнута, если $Q(t)$ известно. Из нее определялось давление на фронте УВ:

$$P_f = \frac{2}{\gamma + 1} \rho_0 \dot{R}_2 = \left(\frac{81(9\gamma - 4)\sqrt{2(\gamma + 1)}\rho_0}{200\pi(8\lambda - 1)} nATQ_m \right)^{2/3} R^{-4/3}. \quad (12)$$

Последнее выражение получалось при постоянном потоке массы из жерла Q_m , когда второй член в правой части закона сохранения энергии в системе (10) намного больше первого, что реализуется при $t > 9(\gamma - 1)E_0 / (\gamma nATQ_m)$. Видно, что в этом случае давление на фронте УВ как функция расстояния падало слабее ($R_f \sim R^{-4/3}$), чем для сильного точечного взрыва, моделировавшего ядерный взрыв ($R_f \sim R^{-3}$) [Седов, 1946]. Приняв кинетику извержения массы в виде

$$m(t) = \begin{cases} Q_m \cdot t, & 0 < t < t_s, \\ m_s, & t \geq t_s, \end{cases}$$

где $m_s = Q_m \cdot t$ — общая масса, выброшенная в течение взрывной фазы извержения. Далее, с использованием (12), закона сохранения энергии из (10) и еще некоторых упрощающих предположений было получено, что эффективную энергию, переданную воздушной УВ, можно было оценить как

$$E_{eff} = E_0 + (9\gamma - 4) / 5(\gamma - 1)nATm_s. \quad (13)$$

Действие УВ, определенное через анализ разрушений, позволяло приблизительно восстановить величину эффективной энергии E_{eff} . Тогда, зная E_{eff} и предполагая, что E_0 в правой части выражения (13) мала по сравнению со вторым членом, можно было оценить массу, выброшенную в течение взрывной фазы:

$$m_s \approx \frac{5(\gamma - 1)E_{eff}}{(9\gamma - 4)nAT}. \quad (14)$$

Оценка (14) справедлива, если длительность взрывной фазы извержения меньше характерного времени затухания УВ (или равна ему).

Если в (14) подставить определенную по разрушениям в результате катастрофического извержения вулкана Кракатау в 1883 году величину эффективной энергии $E_{eff} \approx 420$ Мт ТНТ и положить $\gamma = 1.4$, $n = 0.05$, $T = 1000$ К, то полученная оценка выброшенной массы ингредиентов при извержении окажется равной $m_s \approx 1.77 \cdot 10^{13}$ кг (или ≈ 7.08 км³ эквивалента плотной горной породы). Общий же объем отложений после извержения Кракатау, согласно [Rampino, Self, 1982], грубо оценен в 9–10 км³ эквивалента плотной горной породы. Полученная здесь оценка отвечает, по-видимому, наиболее сильному взрыву (а их было несколько) в ходе извержения Кракатау.

3.1.2. Численное моделирование различных аспектов вулканических извержений

Вулканические взрывы, имеющие характер глобальных катастроф, — явления достаточно редкие; так, взрыв типа взрыва вулкана Кракатау (Индонезия, 1883 г., с характеристиками: энергия — 100–1000 Мт; объем вещества, выброшенного в атмосферу, — 18 км³; высота пепло-аэрозольной колонны — 70–80 км) повторяется раз в 100 лет. Однако последствия таких извержений настолько значительны [Адушкин и др., 2008; Андрущенко и др., 2012], что, естественно, представляла интерес попытка ретроспективного воспроизведения хотя бы их газодинамической стадии, с приблизительной оценкой начальных параметров.

Такая задача по моделированию взрыва вулкана Кракатау исследовалась численно в предельно упрощенной осесимметричной постановке [Козлов и др., 1994]. В начальный момент времени вся энергия взрыва была заключена во внутренней энергии газа $E_0 = 374$ Мт, занимавшего полусферический объем радиусом $R_0 = 4800$ м, примыкавший к земной поверхности и имевший начальные температуру $T_0 = 1700$ К и давление $p_0 = 420$ атм, согласно оценке энергии, приведенной в работе [Rampino, Self, 1982].

Распространение фронта УВ вулканического взрыва происходило следующим образом. При $t = 30$ с радиус фронта был равен по всем направлениям ~ 30 км. При $t = 90$ с радиус фронта по оси z достиг величины $z_\phi \approx 90$ км, по оси r — $r_\phi \approx 50$ км, а давление на нем на земной поверхности составляло $p(r_\phi) \approx 1.2$ атм. При $t = 210$ с $z_\phi \approx 400$ км, $r_\phi \approx 80$ км, а $p(r_\phi) \approx 1.15$ атм. При $t = 300$ с $z_\phi \approx 600$ км, $r_\phi \approx 120$ км, а $p(r_\phi) < 1.1$ атм. Согласно наблюдениям [Rampino, Self, 1982] на расстоянии ~ 100 миль (~ 160 км) от места взрыва были выбиты стекла, для чего, как известно, требуется избыточное давление ~ 0.07 атм [Baker et al., 1983]; таким образом, результаты расчета подтвердились наблюдениями, что стало свидетельством удачного выбора в постановке задачи начальной энергии E_0 взрыва вулкана.

Для визуализации распространения продуктов выброса вулкана в начале расчета они окружались маркерами, которые в ходе развития процесса переносились потоком газа [Козлов и др., 1994]. Пространственно-временная эволюция облака частиц выброса для четырех моментов времени представлена на рис. 7.

К моменту $t = 30$ с уже произошел отрыв облака взрыва — термика от поверхности, и начиналось его заметное всплывание в атмосфере (см. конфигурацию 1 на рис. 7). При $t = 90$ с верхняя кромка облака продуктов выброса достигла высоты 20 км, а при 70–75 с она пересекла тропопаузу и проникла в стратосферу. При $t = 210$ с уже все облако оказалось в стратосфере, а его верхняя граница достигла почти 40 км. Уже к моменту времени $t = 200$ с на высоте примерно 100 км течение газа перестроилось — возник интенсивный поток воздушных масс, поднятых взрывом, в направлении к земной поверхности. Этот процесс привел уже при $t = 450$ с к опусканию пылевого облака до высоты примерно 30 км, что также привело к согласию с наблюдавшейся свидетелями высотой выброса в 18 миль [Rampino, Self, 1982] (см. конфигурацию 4 на рис. 7). Векторное поле скоростей в окрестности пылевого облака и его контур приведены на рис. 8 ($t = 360$ с).

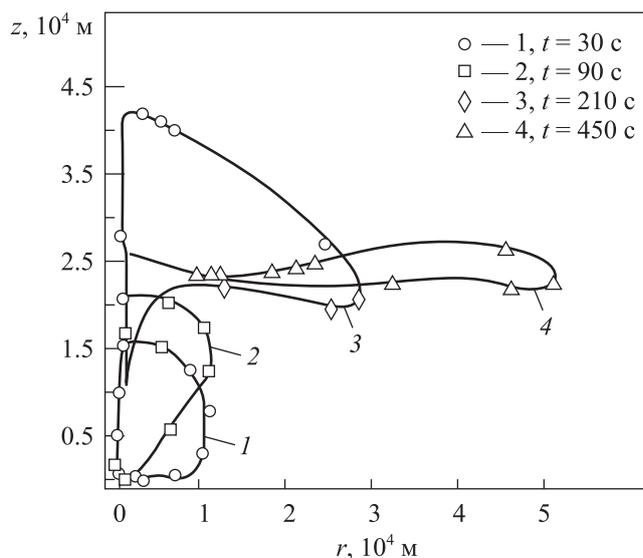


Рис. 7. Движение пылевого облака в атмосфере на различные моменты времени [Козлов и др., 1994]

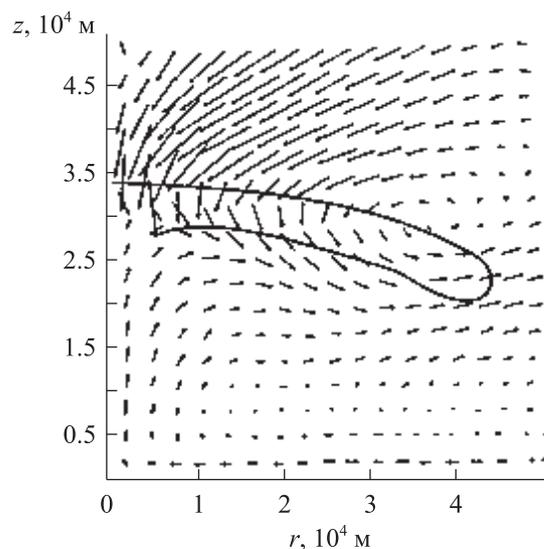


Рис. 8. Векторное поле скоростей в окрестности пылевого облака и его контур [Козлов и др., 1994]

Течение эволюционировало следующим образом. На ранней стадии взрыва огромные массы плотного горячего воздуха за фронтом УВ выбрасывались на большую высоту, где они расширялись и сильно охлаждались. В дальнейшем воздух под действием силы тяжести начинал стремительно опускаться вниз, развивая при этом скорости порядка километра в секунду, и наталкивался на малоподвижные нижние более плотные слои воздуха. Падавшие массы воздуха отражались от них с образованием интенсивной УВ, которая, распространяясь вверх, прогревала уже охлажденные верхние слои воздуха. И такое колебательное движение повторялось несколько раз с уменьшающейся из-за диссипации амплитудой колебания и в итоге затухало.

В работе [Кудряшов и др., 2002] подобная задача рассматривалась в более сложной постановке. В приближении двумерной динамики монодисперсной бесстолкновительной газозвеси моделировалась начальная стадия взрывного извержения вулкана, в результате которой короткий взрывной импульс разрушал купол и генерировал интенсивную УВ, распространяющуюся в атмосфере, а вслед за ней из очага извержения подымался газопылевой столб.

Взрыв вулкана рассматривался в приближении мгновенного разрушения перегородки (купола), отделявшей нагретую до температуры магмы газозвесь $T_1^0 = 1400$ К с плотностью $\rho_1^0 = 50$ кг/м³ [Wood, Bower, 1995], находившуюся в цилиндрическом жерле (радиусом $r_0 = 300$ м и глубиной $D = 6$ км), от невозмущенной атмосферы. Таким образом, фактически решалась задача о распаде разрыва, который генерировал УВ давления, распространяющуюся по невозмущенной атмосфере, и риманову волну разрежения, опускающуюся вглубь вулканического жерла. Размер частиц выбирался менее 1 мм, частицы подхватывались смесью газов при истечении в атмосферу [Wood, Bower, 1995]. Более подробно постановка задачи приведена в [Кудряшов и др., 2002].

Расчеты распределения скоростей и давления показали, что при $t = 60$ с после взрывного извержения фронт УВ имел форму, близкую к полусферической, и в направлении по вертикальной оси z достиг высоты порядка 20 км. Распределения давления p возмущенной области на земной поверхности ($z = 0$), а также огибающие их амплитуд для нескольких моментов времени при двух начальных значениях объемной концентрации пыли α_1 и α_2 показаны на рис. 9, а. На рис. 9, б представлены те же распределения и их огибающие при варьировании величиной начальной плотности газа в жерле ρ_1^0 (для всех графиков p в атм, r в км).

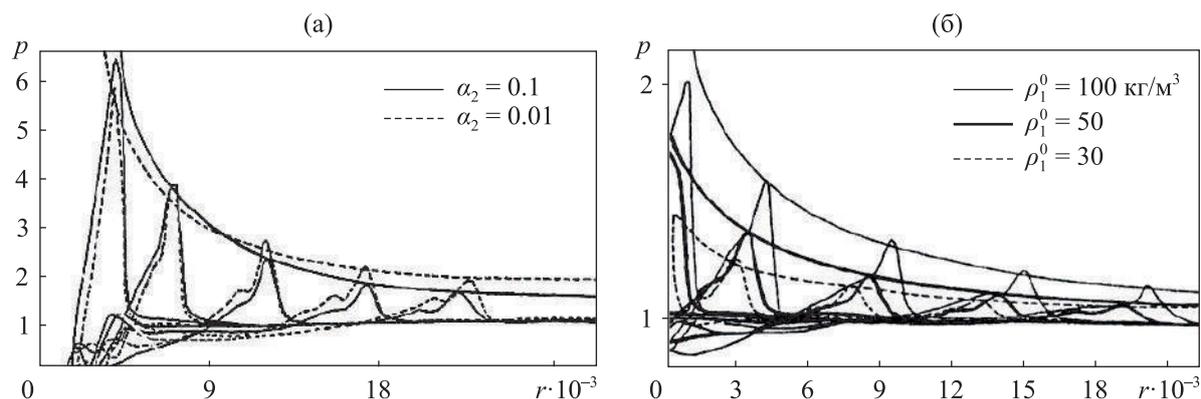


Рис. 9. Распределение давления p возмущенной области на земной поверхности ($z = 0$), а также огибающие их амплитуд: а) для нескольких моментов времени при двух начальных значениях объемной концентрации пыли α_1 и α_2 ; б) при варьировании величиной начальной плотности газа в жерле ρ_1^0 . Для всех графиков p в атм, r в км [Кудряшов и др., 2002]

Результаты расчетов в рамках предложенной модели показали, что на начальной стадии извержения истечение газов из жерла-канала происходило со сверхзвуковой скоростью (при приведенных выше начальных условиях скорость истечения превышала скорость звука более чем втрое), а в ходе развития течения газозвеси в ней образовывались вихри.

Процесс роста пылевого облака, возникшего в ходе извержения для трех моментов времени, изображен на рис. 10, а–в, на нем насыщенность цвета пропорциональна логарифму объемной концентрации пыли [Кудряшов и др., 2002].



Рис. 10. Процесс роста пылевого облака, возникшего в ходе извержения [Кудряшов и др., 2002]

Рост центрального газопылевого столба продолжался несколько минут, после чего началось оседание пыли. Проведенные расчеты показали, что более 90 % пыли, выброшенной взрывом в атмосферу, попали в стратосферу. При приведенных выше размерах жерла и начальной концентрации пыли $\alpha_2 = 0.1$ масса пыли, выброшенной взрывом в атмосферу, составила около $4 \cdot 10^4$ т. В отсутствие ветра на расстоянии 4–5 км от эпицентра слой выброшенной при взрыве пыли на земной поверхности составлял 20–25 см, а на расстоянии 8–10 км — только 1–2 см. Расчет вертикального распределения объемной концентрации пыли в атмосфере при $t = 60$ с для различных значений начальной плотности газа в жерле вулкана показал, что пыль, первоначально равномерно распределенная по высоте жерла, формировала своеобразный «снаряд» с концентрацией, близкой к исходной; это скопление пыли поднималось далее до максимальной высоты как единое целое. И большая часть пыли, выброшенной в стратосферу, попало туда на начальной стадии извержения под действием течения, возникшего в результате распада разрыва (как бы «прорыва» купола). Скорость же оседания выброшенной пыли достигала значений порядка 10 м/с.

При применении формулы для оценки взрыва вулкана по УВ, возникшей в предложенной модели начальной стадии извержения, получилось, что при рассмотренных начальных услови-

ях взрыв вулкана был эквивалентен ядерному взрыву с энергией $E \approx 400$ Мт ТНТ (величина, близкая по порядку оценки взрыва вулкана Кракатау в 1883 г. [Rampino, Self, 1982]).

В работе [Козлов и др., 1999] исследовалась эволюция вулканического взрыва с учетом переноса и оседания частиц выброса различного диаметра (15 дискретных размеров — от 0.27 мкм до 1.5 мм) в атмосфере в трехмерной постановке в приближении, основанном на отдельном описании процесса переноса частиц и процесса развития области, возмущенной газодинамическим движением. Предполагалось, что первоначально вся энергия вулканического взрыва заключена в тепловой энергии газа температуры 1700 К, находившегося в полусферической области с радиусами R_0 (1, 10 и 50 км) и с величинами энерговыделения в полусфере E_0 (800 кт, 800 Мт и 100 Гт). В ходе численного эксперимента исследовалась зависимость формирования и переноса пылевого облака в стандартной атмосфере от величины энерговыделения (расчеты для каждого из трех вариантов проводились до 30 мин реального времени). Ниже приведены некоторые данные по эволюции пылевого облака для варианта $R_0 = 10$ км, $E_0 = 800$ Мт. Первичный рост и формирование облака завершились к $t = 1$ мин, при этом верхняя кромка достигла высоты $z_{об} \approx 13$ км, и его радиус увеличился до $r_{об} \approx 13$ км. Далее, при $t = 1.7$ мин $z_{об} \approx 25$ км, $r_{об} \approx 15$ км; при $t = 3.7$ мин $z_{об} \approx 55$ км, $r_{об} \approx 31$ км. С течением времени всплывавшая горячая область — термик — стала остывать, вертикальные компоненты скорости газодинамического течения, увлекавшие частицы, уменьшились, и последние под действием гравитации начали оседать в атмосфере, сконцентрировавшись вблизи нижней кромки границы, которая в целом тоже стала опускаться. На более поздней стадии процесс аккреции усилился, и к моменту $t \approx 18$ мин наиболее крупные частицы пыли начали интенсивно выпадать на земную поверхность. Это проиллюстрировано на рис. 11, на котором показана временная зависимость высот нижней (1) и верхней (2) границ облака пыли.

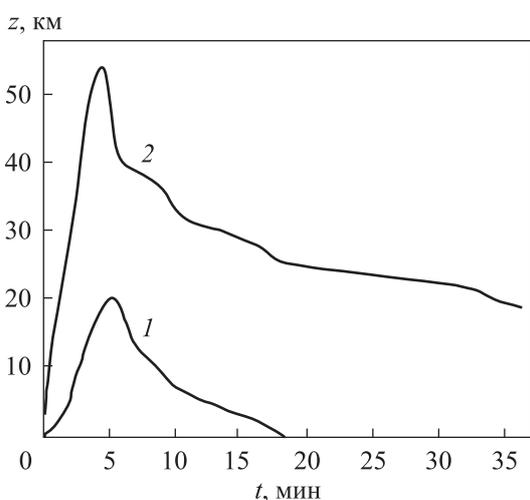


Рис. 11. Временная зависимость высот нижней (1) и верхней (2) границ облака пыли [Козлов и др., 1999]

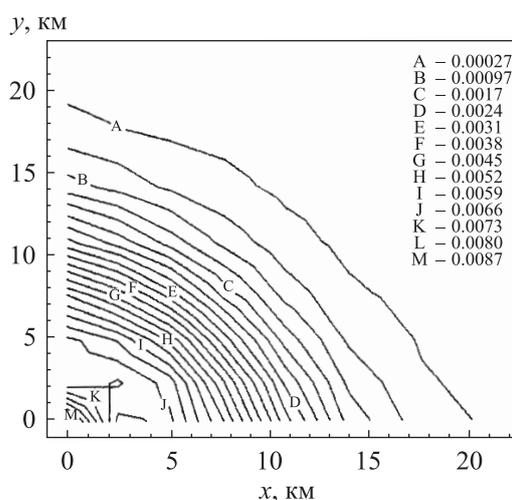


Рис. 12. Распределение выпавшей массы пыли на земную поверхность при $t = 35.2$ мин [Козлов и др., 1999]

Таким образом, в поздние моменты времени пылевое облако состояло в основном из частиц пыли малых размеров, при этом наблюдалась сепарация по высоте частиц пыли различных диаметров. Так, например, при $t = 35.2$ мин частицы пыли размером от 0.27 до 68 мкм оставались на высоте более 15 км (т. е. в стратосфере), а группа частиц размером 1.5 мм уже полностью выпала на земную поверхность. Распределение выпавшей массы пыли на земную поверхность при $t = 35.2$ мин представлено на рис. 12 (процент ее выпавшей массы составил 13.5 %; относительные доли массы пыли (нормированные на суммарную массу выпавшей пыли) на единицу площади приведены в правой верхней части рис. 12). Расчеты показали, что

при $t = 30$ мин площадь выпадения пыли более чем в два раза превысила размер области исходного выброса, но при этом ее основная масса осела в зоне взрыва.

В работе [Шувалов, Трубецкая, 2004] был проведен обзор наблюдательных данных и приведены некоторые результаты численного моделирования сверхмощного извержения вулкана Тамборы в 1815 г. как для начальной (взрывной), так и для поздней (распространение пирокластических потоков) стадий.

В работе [Косарев, 2010] исследовалась нестационарная многокомпонентная модель мощного извержения гипотетического вулкана в субтропических условиях при учете следующих компонент в его выбросе: пепловые (силикатные) частицы, водяной пар и вулканические газы. Результаты расчетов показали, что процессы, контролировавшие эволюцию воды в вулканическом плюме, оказывали значительное влияние на ход микрофизических процессов, а также на развитие плюма как целого и на процесс оседания частиц.

Нами исследовались относительно слабые взрывные извержения [Андрущенко и др., 1985; Андрущенко, 1989, 1993; Белоцерковский и др., 2000] на примере извержений вулкана Карымский [Фирстов и др., 1978] и других вулканов Камчатки. В частности, нами изучались особенности процесса подъема плюмов извержений вулканов в поле горизонтального ветра [Андрущенко, 1993; Белоцерковский и др., 2000]. (Аналогичная задача, но в значительно более сложной постановке с учетом газопепловой смеси в эруптивной колонне извержения исландского вулкана Эйяфьятлайокудль в 2010 г. рассматривалась в работе [Хазинс, Шувалов, 2010].)

Кроме того, нами исследовались процессы подъема пар плюмов-облаков, выброшенных последовательно из жерла вулкана, и были выявлены особенности их движения: верхний двигался по закону для одиночного термика $h \sim t^{1/2}$, а нижний, поднимавшийся в спутном потоке верхнего, всплывал по закону $h \sim t^2$. После слияния объединенное облако поднималось по закону одиночного термика $h \sim t^{1/2}$ [Андрущенко и др., 1985; Белоцерковский и др., 2000].

В работе [Андрущенко, 1989] рассматривалась осесимметричная задача о взаимодействии всплывшего выброса вулкана в виде облака-плюма с полусферической УВ, инициированной взрывом, произошедшим в вулкане через некоторое время после первичного выброса. В отличие от очень сильных извержений это взаимодействие сопровождалось рядом процессов и эффектов, выявленных ранее в ходе лабораторных экспериментов, что было нами изложено в предыдущем обзоре [Андрущенко, Ступицкий, 2020a].

3.2. Извержения подводных вулканов

3.2.1. Теоретическое исследование разрушения лавового купола подводного вулкана

В [Андрущенко и др., 2019a] методом линейной теории упругости исследовался вклад неоднородного температурного поля и внешнего давления со стороны горячей магмы и верхнего слоя холодной воды в процесс разрушения лавового купола подводного вулкана как возможного триггера его эксплозивного извержения. Пусть $T(r, t)$ — распределение температуры в упругом шаровом слое с внешней и внутренней границами при $r = R_1$ и R_2 соответственно (рис. 13).

Задача термоупругости для определения напряженно-деформированного состояния в шаровом слое рассматривалась в пренебрежении волновыми процессами, а время t трактовалось как параметр. Так как из-за сферической симметрии имели место только радиальные перемещения $u(r)$, то уравнение и граничные условия для них таковы:

$$(\lambda + 2G) \left[\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{du}{dr} - \frac{2}{r^2} u \right] = (3\lambda + 2G) \alpha \frac{dT}{dr},$$

$$\sigma_r = 0 \text{ при } r = R_1 \text{ и } R_2, \quad (15)$$

где λ , G — постоянные Ламе, α — коэффициент температурного расширения.

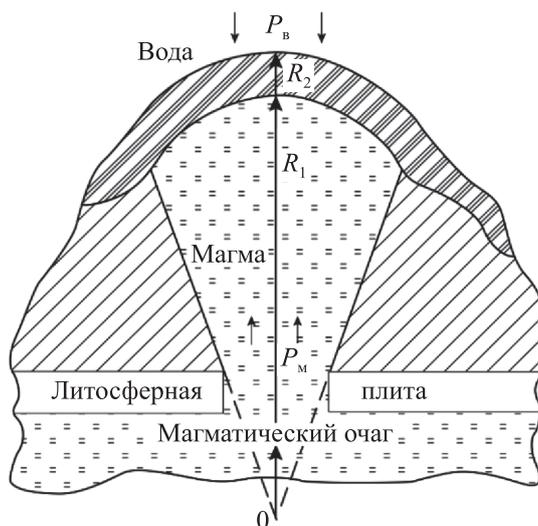


Рис. 13. Схема разрушения купола подводного вулкана: P_B — внешнее давление со стороны воды; P_M — внутреннее давление магмы; R_1 и R_2 — внутренний и внешний радиусы шарового купола [Андрущенко и др., 2019а]

Из анализа решения уравнения (15) и условия малости толщины нагретого шарового слоя $\sqrt{2\alpha t} / R_2 \ll 1$ представляющие наибольшую опасность максимальные сдвиговые напряжения, с использованием параметров: E — модуль Юнга и ν — коэффициент Пуассона, таковы:

$$\tau_m = E\alpha T / 2(1-\nu). \quad (16)$$

Согласно статистической теории прочности зависимость предела прочности от размера объекта оценивалась формулой [Фадеенко, 1967]

$$\tau_m = \tau_*(l_*/l)^{1/m}, \quad (17)$$

где τ_m и τ_* — предельные значения прочности объекта при значениях характерных длин l и l_* . Масштабный фактор m для базальта равен 6 при растяжении и 12 при сжатии. Если в качестве размера в (17) бралась высота прогретого слоя лавового купола $l \approx \sqrt{at}$, то при достижении им критической величины реализовывалось его разрушение. При $T = 1000$ °С и характеристиках базальта $E = 7250$ МПа, $\alpha = 1.2 \cdot 10^{-5}$ (град) $^{-1}$, $\nu = 0.3$ $\tau_m \approx 6.3 \cdot 10^7$ Па, а при $m = 6$ — $\tau_* \approx 2.4 \cdot 10^8$ Па, тогда

$$l_p = \sqrt{at_p} = l_*(\tau_*/\tau_m), \quad (18)$$

$$t_p = 4 \cdot 10^{-4} R^2 / a.$$

При $R = R_1 = 6000$ м, $a = 0.001$ м 2 /с толщина разрушенного слоя получалась равной $l_p = 120$ м, а время его разрушения — $t_p = 4000$ с (≈ 1.11 ч).

Если температурные градиенты внутри лавового купола нулевые, а граничные условия имели вид $\sigma_r = P_M$ при $r = R_1$, $\sigma_r = P_B$ при $r = R_2$, где P_M — давление магмы, P_B — давление воды, а R_1 и R_2 — внутренний и внешний радиусы шарового купола (см. рис. 13), то из (15) для τ_m получалось выражение:

$$\tau_m = \frac{3}{4} R_1^3 R_2^3 (P_M - P_B) / r^3 (R_2^3 - R_1^3). \quad (19)$$

При малой толщине купола $(R_2 - R_1) \ll R_2$ (19) переписывалось в виде

$$\tau_m = (P_M - P_B) / 4(1 - \delta), \quad (20)$$

где $\delta = R_1 / R_2$.

В [Слезин, 1998] была приведена оценка возможного давления в магматическом очаге — 40–60 МПа. Из-за всевозможных потерь в процессе подъема магмы от очага до устья вулкана давление падало до 4–15 МПа. В этих пределах рассматривались оценки для двух пар значений P_M и P_B : $P_M = 5$ МПа, $P_B = 1$ МПа и $P_M = 13$ МПа, $P_B = 1$ МПа. $P_B = 1$ МПа отвечало глубине погружения устья купола на 100 м. Из (20) получались $\tau_m = 12$ МПа и $\tau_m = 36$ МПа для этих случаев соответственно при $\delta = 11/12$.

Из (16) для базальта получалась следующая оценка напряженного состояния при учете температурных напряжений при перепаде температур $T = 1000$ °С: $\tau_m = 62$ МПа. При допустимых напряжениях в испытаниях на сжатие, лежавших в пределах от 25 до 150 МПа, и в силу неоднородности температурного поля максимальные напряжения попадают в этот диапазон. Таким образом, анализ степени вклада неоднородности распределения температуры и давления со стороны магмы и слоя воды позволили сделать вывод о необходимости учета температурных напряжений при прочностных расчетах лавового купола.

3.2.2. Математическое моделирование подводных извержений

Рассматривалась динамика движения магматической бомбы под воздействием взрыва от жерла подводного вулкана до океанической поверхности [Андрущенко и др., 2020б]. При знании времени подъема к поверхности можно было оценить критическое напряженное состояние тела (бомбы), при котором происходило его разрушение из-за неравномерности распределения температуры, из закона его движения:

$$m \frac{dV}{dt} = -mg - CS\rho V^2 / 2, \quad \frac{dH}{dt} = V, \quad (21)$$

где m — масса тела, V — его скорость, S — площадь его поперечного сечения, H — расстояние, пройденное им от точки старта, C — коэффициент сопротивления воды, ρ — ее плотность. При начальных условиях при $t = 0$ — $V = V_0$, $H = H_0$ — решение системы (21) таково:

$$V = [\operatorname{tg}(B - Agt)] / A, \quad H = 2mg \ln[\cos(B - Agt) / \cos B], \quad (22)$$

где $A = \sqrt{CS\rho / 2mg}$, $B = \operatorname{arctg}(AV_0)$, а коэффициент C определялся из натурных наблюдений за скоростью выхода тела на поверхность океана.

Пусть в некоторый момент времени $t = t_*$ тело затормозилось до скорости 0, тогда из системы (22) следует

$$t_* = B / Ag, \quad H_* = -2m \ln(\cos B) / CS\rho. \quad (23)$$

Если глубина устья жерла вулкана меньше H_* , то магматическая бомба выстреливалась в атмосферу. В природе выбросы пирокластических материалов из воды наблюдались в случаях, если глубина устья не превышала 400 м. Но это для обычных вулканов, для супервулканов же продукты выбросов могут преодолеть с высокими скоростями значительно более мощные толщи воды. Величины коэффициента сопротивления воды по натурным наблюдениям таковы: $C = 0.17 - 0.25$. По известным значениям скорости вылета бомбы в атмосферу и размеру толщи воды из (22)–(23) определялись время ее движения в воде и начальная скорость вылета из жерла вулкана в воду.

В работе [Андрущенко и др., 2020б] была также исследована фрагментация в результате действия температурного градиента выброшенной в воду в ходе извержения подводного вулкана магматической бомбы и было выявлено влияние на ее разрушение процесса квазистатического вращения.

4. Использование лазерного излучения для исследования явлений, сопровождающих взрыв высокой удельной энергии

4.1. Основные физические явления, сопровождающие взаимодействие мощного импульса лазерного излучения с веществом

Взаимодействие мощного импульса лазерного излучения (ЛИ) с твердотельными мишенями характеризуется необычайно большим спектром явлений, наблюдаемых в самых различных областях физики. Комбинация таких явлений едва ли встречалась при других ситуациях. К тому же эти явления происходят в объеме с размером в несколько сотен микрон и временем жизни от нескольких сотен пикосекунд до нескольких десятков наносекунд. Результат воздействия лазерного излучения на вещество зависит, помимо длины волны лазера λ и длительности лазерного импульса Δt_n , главным образом от поверхностной плотности потока излучения $q = Q / (S \Delta t_n)$, где Q — энергия лазерного излучения в импульсе, S — площадь пятна на поверхности твердотельной мишени, на которую фокусируется излучение лазера. Величина q может изменяться на много порядков, от 10^5 до 10^{18} Вт/см².

Явлений без фазовых изменений материала мишени можно ожидать только на уровне обычных импульсных лазеров при $q < 10^7$ Вт/см². При этом наблюдается термоэмиссия электронов (или ионов), включая многофотонную эмиссию и десорбцию нейтралей. В этих явлениях также могут играть роль другие лазерные параметры, такие как модовая структура, форма лазерного импульса, ширина полосы излучения и т. д.

С ростом плотности потока излучения поверхность металла нагревается до все более высоких температур. В результате начинается плавление и испарение материала. Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что при заданной форме и длительности импульса существует достаточно определенная критическая плотность потока излучения $q = 10^6 - 10^7$ Вт/см² (зависящая от теплофизических характеристик облучаемого вещества), начиная с которой происходит интенсивное испарение вещества. Физическая картина разрушения кристаллической структуры вещества (плавления, испарения) подробно изложена в монографиях [Рэди, 1974; Анисимов и др., 1979]. Отметим лишь, что $q \sim 10^7$ Вт/см² является тем самым уровнем плотности излучения современных лазеров, который используется в настоящее время для лазерного обжига ионно-имплантированных полупроводников и обработки материалов.

При $q \cong 10^9$ Вт/см² происходит образование волн напряжения большой амплитуды в твердом теле. Аналогично ударным волнам (УВ) такие волны напряжения изменяют микроструктуру, т. е. дислокационную решетку. Этим изменяют механические свойства вещества, что успешно применяется для увеличения прочности и твердости некоторых металлов и сплавов и для увеличения их предела усталости. При плотностях, больше чем $q \sim 10^9$ Вт/см², получаемых от лазеров с модулированной добротностью или пикосекундных лазеров, получение плазмы является основным эффектом. При увлечении плотности потока растет температура начального сгустка, что сопровождается увеличением излучения лазерной плазмы (ЛП), прежде всего в рентгеновском диапазоне спектра. При дальнейшем росте плотности потока q доминирующим процессом поглощения плазмой ЛИ становится процесс нелинейного поглощения и возникают эффекты деформации распределения параметров плазмы помедотормными силами, порог этого эффекта определяется как $q\lambda^2 > 10^{15}$ Вт/см² (здесь численное значение λ выражено в мкм). Для $\lambda \sim 1$ мкм длительность лазерного импульса $\Delta t_n \sim 1$ нс, и для площади фокусиров-

ки $S = \pi R_0^2 = 10^{-4} \text{ см}^2$ это требует энергии в импульсе $Q = 100 \text{ Дж}$. Диапазон $q\lambda^2 > 10^{15} \text{ Вт/см}^2$ принадлежит области исследований по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС) [Дюдерштадт, Мозес, 1984].

Для $q\lambda^2 > 10^{18} \text{ Вт/см}^2$ скорость электронов в поле ЛИ становится сравнимой со скоростью света, и релятивистские эффекты становятся доминирующими. Однако большинство наиболее интересных эффектов и применений ЛП связано с диапазоном $q\lambda^2$ от 10^9 до 10^{14} Вт/см^2 .

При фокусировке ЛИ на твердой массивной мишени количество испаряемого вещества обычно составляет порядка 10^{-6} г , и его дальнейший разогрев определяется длительностью лазерного импульса и его энергией. При этом могут существовать два режима разогрева ЛП: режим импульсного удержания и режим стационарного облучения.

Разлет горячей плазмы осуществляется за времена $t \sim R_0/c$, где R_0 — начальный размер плазмы, c — скорость звука в плазме (характерные величины: $R_0 \sim 100 \text{ мкм}$, $c \sim 10^7 \text{ см/с}$, $t \sim 10^{-9} \text{ с}$). Если длительность импульса $\Delta t_{\text{л}} < 10^{-9} \text{ с}$, то энергия лазера вкладывается в плазму до начала ее разлета. Если $\Delta t_{\text{л}} > 10^{-9} \text{ с}$, то разлет плазмы и ее нагрев осуществляется одновременно.

Таким образом, в первом случае поведение ЛП по содержанию и последовательности физических процессов во многом аналогично поведению возмущенной плазменной области ядерного взрыва (ЯВ). Движение ударной волны, образованной плазменным факелом, аналогично сильному точечному взрыву в однородной нижней атмосфере.

Асимптотическое распределение газодинамических величин в области, охваченной движением, описывается известным решением Л. И. Седова [Седов, 1946]. Однако эксперимент показывает, что радиус фронта УВ в направлении луча лазера больше значения, даваемого формулой

$$R = \xi_0 \left(\frac{2E}{\rho} \right)^{1/5} \cdot t^{2/5},$$

за счет небольшого отклонения формы фронта от сферического, образующегося уже в процессе формирования плазменного факела [Басов, Крохин, 1970], но на большое время ($\geq 200 \text{ нс}$) режим движения приближается к асимптотическому. Следует также отметить, что при давлениях больше 50 мм рт. ст. исследование структуры УВ таким способом невозможно, так как перед мишенью возникает пробой воздуха, и ЛИ не может достигнуть поверхности мишени. Однако, как показано в работе [Андрущенко, Ступицкий, 2020а], к настоящему времени развитие взрыва в нижней атмосфере на стадии развития УВ достаточно хорошо исследовано, в том числе и с учетом излучения. Разработаны двух- и трехмерные численные методики, описывающие как одиночные, так и взаимодействие двух или даже нескольких взрывов. Поэтому нет необходимости в специальном лабораторном моделировании самого процесса развития взрыва в ударно-волновой стадии, и практический интерес представляет лишь вопросы воздействия таких взрывов на различные объекты [Физика ядерного взрыва, 2009, 2010].

4.2. Физическое и численное моделирование явлений, сопровождающих космический ядерный взрыв, с помощью лазерной плазмы

Под космическим ядерным взрывом (КЯВ) обычно понимают взрыв на высотах более $100\text{--}120 \text{ км}$, когда жесткое излучение практически беспрепятственно покидает центральную разогретую область взрыва за короткое время ($10^{-7}\text{--}10^{-5} \text{ с}$).

Хорошо известно понятие математического моделирования, подразумевающее равенство безразмерных критериев подобия для рассматриваемых аналогичных по содержанию явлений. В настоящее время при рассмотрении сложных явлений часто используют понятие физического или ограниченного моделирования, подразумевая под этим исследование близких по физиче-

скому содержанию и временной последовательности процессов, определяющих развитие двух аналогичных явлений [Подгорный, Сагдеев, 1969; Физика ядерного взрыва, 2013].

По отношению к КЯВ наиболее подходящими для «ограниченного моделирования» являются два подхода: использование лабораторных экспериментов с ЛП и крупномасштабных экспериментов с выбросом в верхнюю атмосферу легкоионизируемых газовых сгустков (например, бария) или плазменных струй. В обоих случаях математически строгое моделирование даже отдельных стадий развития взрыва указанными способами невозможно, однако последовательность и физическое содержание процессов во многом аналогичны, что важно для формулировки достаточно адекватных физических моделей.

Ясно, что все основные особенности в физике развития возмущенной области КЯВ на высотах $\sim 100\text{--}1000$ км, а также его теоретическое и численное моделирование связаны главным образом с очень низкой плотностью воздуха и влиянием геомагнитного поля на течение плазмы продуктов взрыва (ППВ) [Физика ядерного взрыва, 2009; Ступицкий, Холодов, 2012а, 2012б, 2019], так и на динамику быстрых электронов, рожденных рентгеновским излучением [Кудрявцев и др., 1974], и бета-электронов [Ступицкий, 2008]. К фундаментальным и достаточно сложным по физическому содержанию и математическому моделированию относятся: вопросы формирования и динамики токов быстрых электронов, имеющих глобальный характер; неравновесные ионизационно-температурные и излученческие процессы; взаимодействие плазмы и разреженной ионосферы и формирование ударно-волновой структуры; структура взаимодействия фронта плазмы и геомагнитного поля; развитие неустойчивости на фронте плазмы и формирование крупномасштабного струйного течения на поздней стадии динамики плазмы [Ступицкий, Холодов, 2019].

Как показал анализ экспериментальных исследований [Бойко и др., 1972], температура лазерной плазмы в начальной стадии развития факела при умеренных интенсивностях ядерного импульса ($\sim 5 \cdot 10^{11} \div 10^{14}$ Вт/см²) можно приближенно аппроксимировать выражением

$$T = 6.3 \cdot 10^{-4} q^{4/9}, \quad (24)$$

где T — яркостная температура, эВ; q — интенсивность ЛИ, Вт/см². Для указанного диапазона q получаем $T \cong 100\text{--}1000$ эВ, что соответствует скорости фронта для плазмы из алюминия $v = 6 \cdot 10^6 \div 2 \cdot 10^7$ см/с, а для углерода $v = 9 \cdot 10^6 \div 3 \cdot 10^7$ см/с.

Таким образом, лазерная плазма по своим основным энергетическим характеристикам, содержанию и последовательности физических процессов является наиболее подходящим лабораторным объектом для «ограниченного моделирования» физических явлений при КЯВ. Такой подход существенно дополняет исследования по обоим столь разномасштабным плазменным явлениям, как КЯВ и ЛП, и позволил обнаружить и объяснить некоторые новые явления.

По физическому содержанию и временной последовательности весь процесс разлета и передачи энергии от ППВ окружающей среде можно приближенно разделить на несколько стадий. Самая ранняя радиационно-газодинамическая стадия представляет интерес прежде всего как фактор геофизического воздействия, выделяющегося при взрыве жесткого ионизирующего излучения, на разреженную ионосферу. Это тепловое рентгеновское излучение (РИ) с характерной температурой порядка 10^3 эВ.

Основная часть РИ поглощается в D -слое ионосферы, образуя так называемую нижнюю область повышенной ионизации на высотах $h \cong 40 \div 80$ км [Физика ядерного взрыва, 2009]. В этой области плотность воздуха еще достаточно высока, чтобы можно было рассматривать рассеяние энергии, образующимися под действием РИ фотоэлектронами, в локальном приближении, когда $\lambda_e \ll \Delta$, где λ_e , Δ — средняя длина свободного пробега фотоэлектрона и высота однородной атмосферы. Однако на $h \geq 100 \div 120$ км приближение локального энерговыделения неприменимо, и необходимо рассматривать динамику фотоэлектронов в геомагнитном поле с учетом разреженного газа. Ясно, что фотоэлектронные токи приводят не только к ионизации, но и к возбуждению низкочастотных электромагнитных возмущений, которые в настоящее

время привлекают большое внимание в связи с их обнаружением при работе радионагревных стенов [Cohen et al., 2010].

В 70-е годы при исследовании ЛП был обнаружен эффект генерации так называемых спонтанных магнитных полей (СМП), возникающих при формировании и разлете ЛП и непосредственно не связанных с внешним магнитным полем [Stamper et al., 1971]. Так как этот вопрос мог представлять значительный интерес для понимания физических процессов при КЯВ, то в 80-е годы, по существу, впервые был выполнен ряд работ по теоретическому и численному исследованию ЛП с целью использовать полученные результаты при физическом моделировании наиболее сложных процессов при КЯВ. В работах [Stamper et al., 1971; Ананьин и др., 1983] была экспериментально получена четкая двойная структура изменения СМП во времени на всех расстояниях (рис. 14) и впервые предложена теоретическая модель формирования первого максимума магнитного поля, полностью определяющая его зависимость от различных условий эксперимента. Расчеты показали, что в результате действия жесткого излучения из факела ЛП, даже при сравнительно небольшой температуре излучения (24), например при $T \sim 72$ эВ, фотоэлектронный спектр содержит значительное число электронов с энергиями 100–400 эВ [Ступицкий, 1983], имеющих значительный пробег в разреженном газе и ответственных за формирование пространственной токовой системы (рис. 15) [Ананьин и др., 1983].

Электромагнитное поле определяется системой уравнений Максвелла с соответствующими начальными и граничными условиями. Для ЛП можно выделить следующие характерные времена, соответствующие условиям эксперимента: $\tau \approx 30$ нс — время действия жесткого излучения; $\tau_\phi \approx 0.1$ нс — время движения фронта фотоионизирующего излучения; $\tau_l \approx 4$ нс — время пробега фотоэлектронов; $\tau_k \approx 10^{-6}$ с — время ионизации.

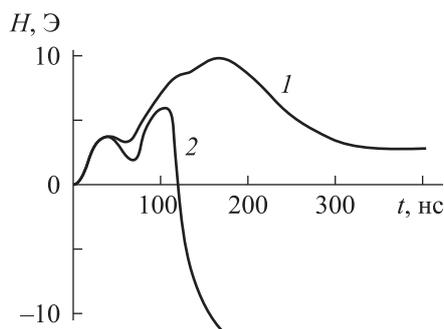


Рис. 14. Спонтанное магнитное поле для углеродной мишени при $P = 2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст., $R = 1$ см, $H_0 = 0$ (1) и 980 Э (2) [Ананьин и др., 1983]

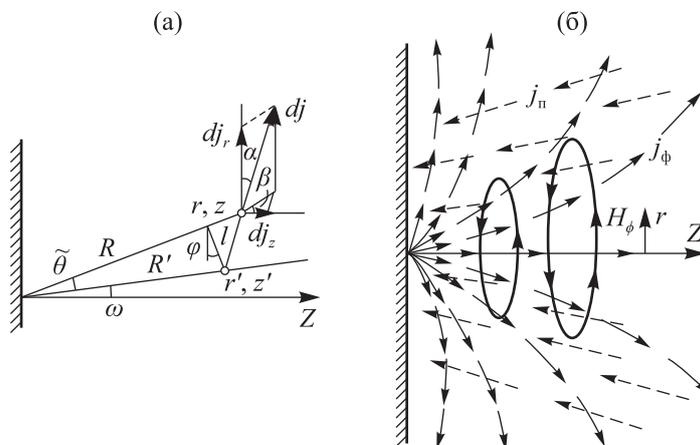


Рис. 15. Схема расчета (а) и качественная картина образования токовой системы (б) [Ананьин и др., 1983]

Таким образом, $\tau_k \gg \tau \gg \tau_l \gg \tau_\phi$, и задачу можно рассматривать в квазистационарном или даже стационарном приближении, где время входит как параметр (диффузия магнитного поля в фоновой среде происходит за время ~ 10 нс, поэтому применимо стационарное приближение). В стационарном двумерном случае уравнения Максвелла в сферической системе координат имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \sin \theta H_\phi &= \frac{4\pi}{c} [\sigma(R) E_R(\theta, R) - j_R(\theta, R)], \\ -\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (R H_\phi) &= \frac{4\pi}{c} [\sigma(R) E_\theta(\theta, R) - j_\theta(R, \theta)], \\ \frac{\partial R E_\theta}{\partial R} &= \frac{\partial E_R}{\partial \theta}. \end{aligned} \quad (25)$$

Здесь учтены ток проводимости σE_R , σE_θ и фотоэлектронный ток j_R , j_θ . Разлет фотоэлектронов компенсируется токами проводимости, часть которых замыкается на проводящий экран. Возникает система токов тороидального типа, внутри которой существует магнитное поле. Качественная картина токов и магнитного поля показана на рис. 15.

В работах [Ананьин и др., 1983; Ступицкий, 1983] получены подробные выражения для расчета токов и ионизации воздуха перед фронтом плазмы. Так как проводимость металла ($\sim 10^{17} \text{ с}^{-1}$) на много порядков выше проводимости частично ионизованного воздуха ($\leq 10^{13} \text{ с}^{-1}$), то для простоты будем считать границу полупространства $\theta = \pi/2$ сверхпроводящей, т. е. $E_R(R, \theta = \pi/2) = 0$. Для E_θ , очевидно, должно выполняться условие $E_R(R=0, \theta) = 0$, что соответствует предельному условию на границе проводящей сферы при стремлении ее радиуса к нулю. Кроме того, при $R \rightarrow \infty$ поле должно вести себя так, чтобы интеграл энергии $\int \sigma E^2 dV$ оставался конечным.

Решение системы (25) находилось в виде разложения полей по нечетным полиномам Лежандра, так как при этом автоматически выполняется условие зеркального отражения токов относительно плоскости $\theta = \pi/2$. Некоторые результаты расчетов магнитного поля показаны на рис. 16. Оно зависит от давления P и R , так же как фототок, то есть медленно падает с расстоянием и имеет максимум в зависимости от P . Амплитуда поля удовлетворительно согласуется с экспериментом.

Выполненные расчеты компонент поля H_ϕ , E_R , E_θ показали, например, что при $R = 1.4 \text{ см}$ $E_R = 380 \text{ В/м}$, т. е. много меньше 10 кВ/м , поэтому пренебрежение вкладом поля в торможение фотоэлектронов, по сравнению с ионизационными потерями, оправдано.

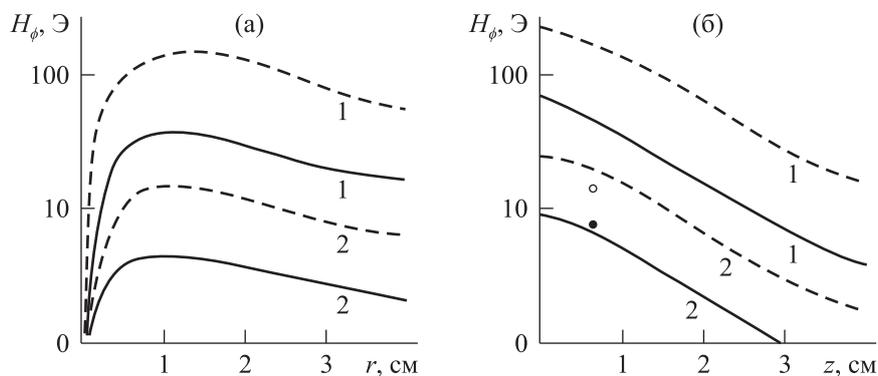


Рис. 16. Напряженность спонтанного магнитного поля в зависимости от расстояния r при $z = 1$ (а) и z при $r = 1$ (б) для $q = 10^{12}$ (сплошные кривые) и 10^{13} Вт/см^2 (пунктир), $P = 0.1$ (1) и 0.01 мм рт. ст. (2). Точки соответствуют $q = 5 \cdot 10^{11} \text{ Вт/см}^2$, $R = 1 \text{ см}$, $\theta = 45^\circ$ и $P = 0.1$ (светлая) и 0.01 мм рт. ст. (темная) [Ананьин и др., 1983; Ступицкий, 1983]

Для фотоэлектронных токов от РИ КЯВ временные соотношения существенно иные:

$$\tau_k \gg \tau_l \gg \tau_\phi \gg \tau.$$

Поэтому эта задача существенно нестационарна, ее можно решать в предположении мгновенного воздействия РИ. Кроме того, на $h \geq 120$ км значительную роль играет неоднородность атмосферы, а следовательно, есть необходимость учета реального спектра фотонов и фотоэлектронов, которые сильно меняются с высотой [Физика ядерного взрыва, 2009]. В настоящее время такие численные исследования проводятся в связи с решением общей проблемы ионосферных возмущений. В основе решения этой задачи лежат подходы и результаты, изложенные выше применительно к лазерной плазме.

Один из главных физических процессов, определяющих развитие КЯВ, — это передача энергии от разреженной плазмы взрыва разреженной ионосфере в процессе их взаимопроникновения и действия геомагнитного поля. Характер этого взаимодействия в значительной степени зависит от ионного состава плазмы, который формируется на инерционной стадии ее разлета в результате электронной рекомбинации и перезарядки на нейтралах воздуха. Для этой стадии разлета ЛП и ППВ КЯВ разработан достаточно подробный математический аппарат, позволяющий рассчитывать ионизационный состав, линейчатое излучение и температуры электронов и тяжелых частиц в условиях сильной неравновесности [Ступицкий и др., 1985].

Численная методика решения системы

$$\frac{\partial n_z}{\partial t} + \operatorname{div}(n_z \vec{v}) = S_z, \quad (26)$$

$$\frac{3}{2} n \frac{\partial T}{\partial t} + n T \operatorname{div}(\vec{v}) = Q, \quad (27)$$

$$\frac{3}{2} n_e \frac{\partial T_e}{\partial t} + n_e T_e \operatorname{div}(\vec{v}) = S_{ee} + Q_e, \quad (28)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \nabla \vec{v} \right) = -\nabla P \quad (29)$$

реализована в лагранжевых координатах и основана на методе расщепления температур по физическим процессам. Правые части уравнений и численная схема решения даны в [Ступицкий и др., 1985; Ступицкий, Холодов, 2019]. Полученные решения хорошо согласуются с экспериментальными результатами по ионизационному составу, линейчатому излучению и электронной температуре для ЛП. Для ППВ сравнение с экспериментом по неравновесному излучению в некоторых линиях также дало хорошее согласие.

В результате численных исследований были обнаружены новые физические явления, имеющие фундаментальный характер: лазерный эффект при разлете ионизованной неравновесной плазмы взрыва [Ступицкий и др., 1985]; отсутствие полной закалки степени ионизации и, как следствие, медленное падение $T_e \sim 1/t$ по сравнению с адиабатическим ($1/t^2$) [Ступицкий и др., 1985]; процесс стратификации при разлете плазмы с существенно различными по молекулярной массе компонентами [Ступицкий, Харкунов., 2012], а также ряд других менее значимых эффектов, например выход на одинаковые асимптотические значения степеней ионизации всех компонент смеси [Коженкова и др., 2013].

Процессы передачи энергии плазмы ионосфере в процессе взаимопроникновения и взаимодействие с геомагнитным полем также исследовались как экспериментально, так и численно на основе исследуемой ЛП. В работах [Ананьин и др., 1983, 1990, 1997] главным образом на основе спектральных исследований линейчатого излучения фонового газа и плазмы получена достаточно подробная картина их взаимодействия в стадии взаимопроникновения, что является определяющей основой для создания теоретической модели и численного алгоритма описания этого процесса в отсутствие внешнего магнитного поля и для анализа всего процесса формиро-

вания ударно-волновой структуры при повышении давления фонового газа [Ананьин и др., 1983, 1997]. Следует отметить, что, как показал эксперимент [Ананьин и др., 1991], в определенном диапазоне давлений (~ 0.1 –1 тор) фонового газа на границе плазмы и фона возникает турбулентность, которая, как показал теоретический анализ, связана с развитием рэлей-тейлоровской неустойчивости [Ананьин и др., 1991].

Как показал геофизический эксперимент при взрывах на $h \sim 150$ –300 км разлет плазмы взрыва приводит к формированию в воздухе ионизирующей ударной волны. Подробный анализ ионизационной структуры ударных волн на этих высотах и их особенностей дан в работах [Физика ядерного взрыва, 2009; Ступицкий, Холодов, 2012а, 2012б, 2019]. Роль геомагнитного поля в развитии всей структуры возмущенной взрывом области существенно возрастает с высотой из-за уменьшения столкновительного взаимодействия как на стадии интенсивного торможения, так и на более поздней стадии формирования восходящей струи, и на высотах $h > 300$ км оно играет определяющую роль. На стадии интенсивного торможения на фронте плазмы формируется так называемая лонгмайровская магнитная стенка, в которой происходит передача импульса ионами фона геомагнитным полем, вытесняемым плазмой взрыва. Достаточно подробный анализ этого механизма дан в работах [Ступицкий, Холодов, 2012а, 2012б, 2019].

Однако, как показали эксперименты с лазерной плазмой, на ее фронте, в отсутствие внешнего магнитного поля, формируется так называемое спонтанное магнитное поле, имеющее достаточно сложную структуру (рис. 14). Как показано выше, первая часть сигнала связана с фотоэлектронными токами от жесткого излучения, возникающими так же, как при КЯВ. Вторая (более интенсивная) часть сигнала связана с переходами ЛП в точку измерения, и во всех экспериментах время его возникновения примерно соответствовало R/u , где R — расстояние до центра мишени, u — скорость фронта плазмы. Измерения проводились в отсутствие внешнего магнитного поля ($H_0 = 0$). Подробный экспериментальный и теоретический анализ всей структуры СМП, возникающего на фронте ЛП, дан в работе [Ананьин и др., 1984].

Чтобы рассмотреть начальный процесс генерации СМП, будем исходить из упрощенного уравнения для магнитного поля [Брагинский, 1963]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{c}{en_e} [\nabla T_e \times \nabla n_e] - \frac{c}{e} \operatorname{rot} \left(\frac{R_0}{n_e} \right), \quad (30)$$

где T_e , n_e — температура и концентрация электронов, R_0 — термосила [Брагинский, 1963]. Как следует из уравнения (30), поле не может возникнуть, если $\nabla T_e \parallel \nabla n_e$.

Однако, как показано в [Большов, 1974], такое состояние оказывается неустойчивым по отношению к случайным малым источникам поля. Дело в том, что слабое магнитное поле (возмущение) создает холловский тепловой поток в перпендикулярном полю направлении, который приводит к появлению компоненты ∇T_e в этом направлении. Этот дополнительный градиент температуры, перпендикулярный градиенту плотности, определяет рост магнитного поля. Амплитуда поля при этом определяется профилем плотности и температуры плазмы [Альтеркоп и др., 1974]:

$$H = H_1 (n_{1e} / n_e)^{9/4} (v_1 / v), \quad (31)$$

где H_1 , n_{1e} — значение поля и электронной концентрации в некоторой начальной точке, откуда происходит развитие возмущения СМП; v имеет смысл скорости сноса поля за счет основного градиента температуры:

$$v = 6.81 \frac{\tau_e}{m_e} \frac{dT_{e0}}{dr}, \quad (32)$$

здесь τ_e — время столкновительной релаксации электронов.

В результате детальных исследований пространственно-временной структуры СМП, выполненных в работе [Ананьин и др., 1984], был обнаружен не обсуждавшийся ранее экспериментальный факт, состоящий в том, что с ростом давления в камере кроме положительной части сигнала в более глубоких слоях плазмы появляется отрицательная составляющая поля (рис. 17).

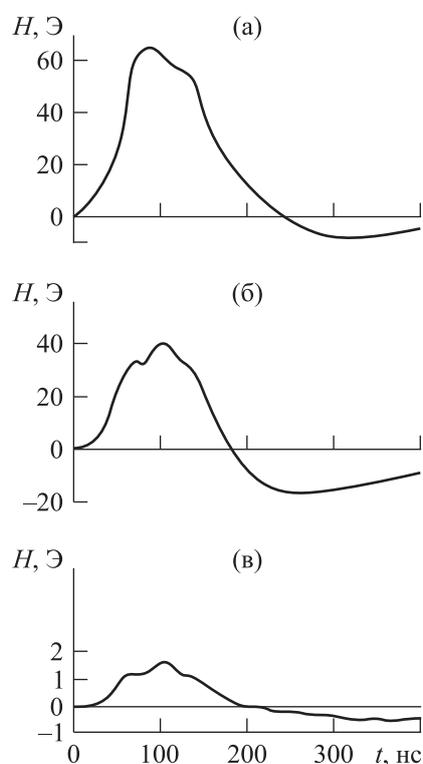


Рис. 17. Проявление отрицательной составляющей спонтанного магнитного поля: а) $R = 5$ мм, $P = 0.5$ тор; б) $R = 10$ мм, $P = 0.6$ тор; в) $R = 15$ мм, $P = 0.5$ тор. Внешнего магнитного поля нет [Ананьин и др., 1984]

В таблице приведены приближенные экспериментальные значения давления воздуха, при которых на заданном расстоянии R появляется отрицательная составляющая СМП.

P , мм рт. ст.	0.4	0.2	0.13	0.09	0.05
R , мм	5	10	15	20	25

Если при малом давлении сигнал имеет одну полярность (считаем ее положительной), то с ростом P положительная составляющая сигнала не исчезает, а лишь сокращается во времени; позже появляется отрицательная составляющая сигнала.

Чтобы понять, как влияют условия эксперимента на поведение магнитного поля на фронте плазмы, рассмотрим поведение электронной температуры и концентрации в ЛП, расширяющейся в фоновую среду. При расширении средняя концентрация и температура электронов падают. В результате столкновительного взаимодействия плазмы передает свой импульс окружающему воздуху и тормозится. Характерный радиус торможения:

$$R_x = (M / \frac{4}{3} \pi \rho)^{1/3}, \quad (33)$$

где $M \approx 1$ мкг — начальная масса разлетающейся плазмы, ρ — плотность воздуха в камере. Оценки по формуле (33) дают $R_x = 25, 11$ и 5 мм при $\rho = 0.01, 0.1$ и 1 мм рт. ст. соответствен-

но, т. е. значения, по порядку величины совпадающие с теми, при которых появляется отрицательная составляющая СМП, причем зависимость близка к экспериментальной. Как показывают расчеты, в стадии интенсивного торможения плазмы, т. е. на расстояниях $\sim R_x$, профили плотности и температуры плазмы становятся резко немонотонными. Основная масса плазмы формируется вблизи фронта, где достигаются максимальные значения плотности и температуры. Таким образом, возникновение отрицательной составляющей СМП при определенных R и ρ соответствует возникновению немонотонного профиля $n(r)$, $T(r)$ в результате торможения и поджатия плазмы вблизи фронта.

Весь процесс генерации и формирования пространственного распределения СМП можно представить следующим образом. Начальное возмущение поля приносится из фоновой среды в процессе расширения плазмы. На фронте плазмы, где $dT_{e0}/dr < 0$, $dn_{e0}/dr < 0$, это поле создает поток тепла и электронов $\sim [\vec{H} \times \nabla T_{e0}]$, перпендикулярный основным градиентным потокам $(-\nabla T_{e0})$. Таким образом, возникает дополнительный градиент температуры, перпендикулярный ∇n_{e0} , который в соответствии с уравнением (30) возбуждает магнитное поле на фронте плазмы. Токи электронов, возникающие в области $dT_{e0}/dr < 0$ (в первую очередь азимутальная составляющая тока), параллельны $[\vec{H} \times \nabla T_{e0}]$. В результате вязкости электронов создаются токовые возмущения того же направления и в области, где $dT_{e0}/dr > 0$. Эти токи в области $dT_{e0}/dr > 0$ генерируют СМП уже обратного знака. Распространяясь далее со скоростью v к центру плазмы, поле усиливается. Усиление поля происходит лишь в области, где существуют градиенты температуры и плотности (в области $dT_{e0}/dr > 0$, $dn_{e0}/dr > 0$). Смена знака СМП происходит в области, где dT_{e0}/dr и dn_{e0}/dr близки к нулю. Амплитуду поля по порядку величины можно оценить из уравнения (30):

$$H \approx cT_e / e\Delta^2 \approx cT_e R_x / eu\Delta^2, \quad (34)$$

где $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с, $e = 4.8 \cdot 10^{10}$ ед. СГСЕ, $\Delta \approx 0.5R_x$ — пространственный масштаб градиентов плотности и температуры. Подставляя в (34) $T_e \approx 1$ эВ, $R_x = 1$ см, $u = 2 \cdot 10^7$ см/с (характерные значения в эксперименте), получаем $H = 20$ Э. Таким образом, амплитуда СМП удовлетворительно согласуется с экспериментальными значениями.

Спонтанное магнитное поле, возникающее на фронте ЛП, не оказывает непосредственного влияния на ее торможение, так как сам фронт, с развивающимися на нем неустойчивостями, является генератором этого поля. Однако если ЛП разлетается в разреженный ионизованный газ, то с помощью СМП могут происходить захват ионов фонового газа и передача импульса, что приводит к торможению самой плазмы. Такой процесс может представлять существенный интерес при решении астрофизических задач и вопросов, связанных с плазменными экспериментами в разреженной ионосфере. На рис. 18 показаны взятые из монографии [Физика ядерного взрыва, 2009] фотографии ранней стадии развития ядерного взрыва в D - и E -слоях ионосферы, где плотность воздуха различается в $1.5 \cdot 10^5$ раз. При взрыве в D -слое между плазмой взрыва и воздухом реализуются условия для развития обычной рэлей-тейлоровской неустойчивости. Для взрыва в разреженном воздухе E -слоя ионосферы четко видно развитие мелкомасштабной турбулентности на фронте разлетающейся плазмы, в то время как действие геомагнитного поля еще не проявилось в торможении плазмы на этой ранней стадии.

Таким образом, с помощью лазерной плазмы удалось обнаружить достаточно фундаментальное физическое явление, которое может сыграть существенную роль в адекватном описании многих крупномасштабных плазменических процессов и создании соответствующих теоретических и численных моделей.

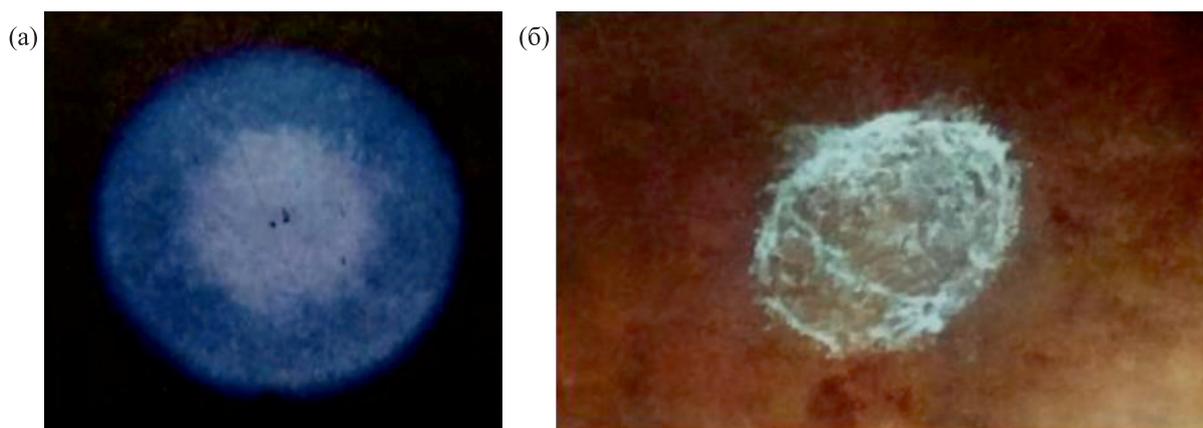


Рис. 18. Ядерный взрыв в *D*-слое (а) и *E*-слое (б) ионосферы [Физика ядерного взрыва, 2009]

5. Использование лазерной плазмы в исследованиях проблемы астероидной опасности

В последние десятилетия значительное внимание научной общественности ведущих стран привлекает проблема предотвращения возможного столкновения с Землей крупных космических тел — астероидов и комет. Астрономические наблюдения, геологические данные, информация об эволюции биосферы и результаты космических исследований планет и их спутников убедительно показали, что катастрофические столкновения этих тел с планетами были не только в далеком прошлом, но и вполне вероятны в современную эпоху.

Земная атмосфера в целом полностью защищает нас от ударов тел размером до нескольких метров. Действительную опасность для Земли представляет столкновения с достаточно крупными телами — астероидами и кометами размером в несколько десятков метров. Именно такие столкновения и составляют смысл понятия «астероидно-кометная опасность» (АКО).

Книга [Астероидно-кометная..., 1996] является, по-видимому, одной из первых в отечественной научной литературе попыткой изложить в виде обзора работ, выполненных к тому времени, проблему АКО. Многие из работ по этой тематике были представлены на проведенной в России международной конференции «Проблемы защиты Земли от опасных космических объектов (SPE-94)».

В проблеме АКО можно выделить следующие основные направления исследований [Андрющенко и др., 2007].

1. Получение на основе совершенствования наблюдательной базы достаточно полных представлений о свойствах малых тел Солнечной системы, об их эволюции и о способах обнаружения и мониторинга. В работе [Астероидно-кометная..., 2010] даны классификация, основные кинематические характеристики метеоров, астероидов и комет, а также краткая качественная картина последствий столкновения с Землей и оценка модельных схем противодействия с помощью ядерного взрыва. В работе [Votavicka et al., 2013] проанализированы параметры Челябинского астероида.

2. Физические и численные исследования движения метеоров различного размера и состава в атмосфере Земли и их воздействия на ее материковую и океаническую поверхность. Всесторонний анализ этого круга вопросов проведен в монографии [Катастрофические воздействия..., 2005] и в работах [Ceplecha, Revelle, 2005; McInnes, 2004].

3. Анализ возможностей современных ракетно-ядерных средств наведения и воздействия для создания системы защиты Земли от опасных космических объектов (ОКО) дан в работах [Коблов и др., 1997; Родионов и др., 1997; Дегтярь, Волков, 2013]. Следует отметить, что взгляд на этот вопрос существенно изменился за последние двадцать лет исследований проблемы. В работе [Астероидно-кометная..., 1996] сделан вывод о том, что состояние наблюдательной

базы не дает возможности осуществить защиту от астероидно-кометной опасности. Однако проанализированные в [Дегтярь, Волков, 2013] результаты выполненных за период с 1996 по 2013 гг. работ свидетельствует о том, что создание системы защиты Земли на основе современных ракетно-ядерных средств практически исключает риск столкновения с планетой астероидов диаметром до 1 км.

4. Значительное количество работ посвящено важным и интересным физическим и численным исследованиям различных способов воздействия ядерного взрыва на астероид и возникающих при этом эффектов. Ясно, что результат действия ядерного взрыва определяет в итоге всю конкретную схему защиты от ОКО [Андрущенко и др., 2019б].

В указанных обзорах кратко обсуждаются и альтернативные методы защиты от астероидно-кометной опасности. В частности, в работе [Ивашкин, 2004] исследуется возможность использования лазерного воздействия на небесный объект, сближающийся с Землей (ОСЗ), — астероид, комету — для предотвращения их столкновения.

Предполагается, что лазер находится на космической станции, базе вблизи Земли, например на Луне (или вблизи орбиты Земли), на ней есть также астрономическая и энергетическая станции. Последняя преобразует солнечную энергию в электрическую, она используется для работы астрономической и лазерной станций. Телескопы обсерватории осуществляют поиск ОСЗ и могут обнаружить потенциально опасный объект. Полагается, что в таком случае лазер воздействует на этот объект, чтобы отклонить его от Земли или разрушить. Идея такой станции была выдвинута и поддержана на Международном симпозиуме «On Deep Space Exploration Technology and Application», Qingdao, Китай, 2002 год.

Выполненный для астероидов радиусом 0.1–0.5 км анализ варианта системы лазерного воздействия с сообщением импульса скорости 0.2 м/с показал, что необходимая энергия отклонения тела оценивается величиной $\sim (0.1 \div 12.3) \cdot 10^{15}$ Дж $\approx (0.02 \div 3)$ Мт ТНТ. При этом средняя мощность лазерного излучения и электрическая мощность энергетической станции составляют $\sim (13 \div 180)$ ГВт, время воздействия $\sim (8 \div 70) \cdot 10^3$ с, наибольшая дальность воздействия $\sim (0.6 \div 2) \cdot 10^6$ км. Начальный диаметр пучка оценен в 10–100 м, а конечный — в 60–300 м. Площадь солнечных батарей составляет 90–1300 км².

Приведенные оценки показывают, что реализация такой системы по ряду основных параметров является практически нерешаемой научно-технической проблемой.

Из показанного выше краткого анализа состояния вопроса по проблеме астероидной опасности следует, что единственным реальным средством защиты Земли от потенциально опасных космических тел в настоящее время может служить только ядерный взрыв. Но сам процесс воздействия ядерного взрыва на астероид требует всестороннего рассмотрения, включая исследования в лабораторных условиях структурных и физических свойств астероида и их реакцию на воздействие поражающих факторов ядерного взрыва.

Как показано в работах последних лет [Белов и др., 2017; Аристов и др., 2018; Бурдонский и др., 2019; Аристова и др., 2019], наиболее подходящим средством лабораторного физического моделирования является лазерное излучение. Возможности концентрации энергии ЛИ как на единицу поверхности мишени, так и на единицу ее массы, а также эффективность трансформации энергии в энергию ударной волны схожи для случаев использования интенсивного лазерного излучения и ядерного взрыва. В работе [Белов и др., 2017] были выполнены предварительные исследования разрушения образцов искусственного хондрита лазерным излучением энергией ~ 500 – 1000 Дж. В работе [Аристов и др., 2018] лазерные эксперименты сопровождались двумерным численным моделированием как стадии взаимодействия ЛИ с мишенью, так и последующей стадии газодинамического течения материала мишени. Для обеспечения лазерных экспериментов была разработана технология искусственного вещества каменных астероидов с заданными свойствами: по химическому составу, физическим характеристикам и с соблюдением структурного подобия. Эксперименты проводились на нескольких установках. Во всех случаях получено примерное равенство полной энергии, требуемой для заведомого разрушения мини-

макетов вне зависимости от количества и энергетике единичных выстрелов лазера, т. е. с точки зрения интегрального критерия разрушения несколько более слабых импульсов не дают заметного преимущества по сравнению с однократным импульсом суммарной мощности. Сделанная расчетным путем оценка точности газодинамического подобия (при разнице в массе между реальным астероидом и его лабораторным аналогом в 14–15 порядков) удельная энергия, необходимая для полного разрушения астероида, почти в два раза меньше, чем удельная энергия, необходимая для подобного разрушения мини-макета. Таким образом, полученные в работе результаты имеют важное значение для построения модели фрагментации астероида при действии ядерного взрыва. С учетом масштабного фактора и результатов лабораторных экспериментов показана возможность заведомого разрушения ядерным взрывом с энергией свыше 3 Мт астероида хондритного типа диаметром 200 м. Однако существенное значение имеет вопрос о размерах фрагментов [Андрущенко и др., 2019б], требующий дополнительного рассмотрения.

В работе [Бурдонский и др., 2019] выполнены измерения удельного импульса хондритовой мишени после воздействия на нее ЛИ с энергией ~50 Дж. Однако использование полученных результатов для оценки приращения скорости астероида при действии ЯВ не удовлетворяет приемлемой точности. В работе [Аристова и др., 2019], которая является определенным предположением исследований, выполненных в [Бурдонский и др., 2019], рассматривались мишени из различных веществ и различной формы. Из результатов работы можно сделать некоторые выводы об оптимальном воздействии ЯВ на астероиды различной формы.

Заключение

В обзоре приведены и проанализированы результаты теоретических, численных и некоторых экспериментальных работ, связанных с исследованиями мощных взрывов, геофизических явлений, взрывного типа и возможностью использования мощных взрывов для решения научных и практических задач. В обзоре выделены некоторые еще не до конца исследованные вопросы, связанные со взрывом: вихревые детерминированные структуры за фронтом ударных волн; генерация спонтанного магнитного поля на фронте разлетающейся плазмы; токовые системы в ионосфере, образованные жестким излучением взрыва; некоторые вопросы, связанные с загрязнением атмосферы при взрывных вулканических извержениях. Так как эти и целый ряд других вопросов, связанных со взрывом, имеют сложное физическое содержание и вместе с тем большое фундаментальное и прикладное значение, то на основе выполненного в работе анализа показаны возможность и необходимость их лабораторного физического моделирования, в частности с помощью лазерного излучения и создаваемой им лазерной плазмы. По-видимому, для создания достаточной полной физической модели теплового взрыва метеоров, входящих в атмосферу, использование лабораторного моделирования с помощью плазменных генераторов также может иметь существенное значение.

Авторы выражают благодарность за оказанную помощь при подготовке обзора Моисеевой Д. С.

Список литературы (References)

Адушкин В. В., Хазинс В. М., Шувалов В. В. Влияние вулканизма на окружающую среду / Изменения окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы: монография. В 8 т. / под ред. кол. Н. П. Лаверова. — РАН. — М.: ИФЗ РАН, 2008. — Т. 2. — С. 237–261.

Adushkin V. V., Hazins V. M., Shuvalov V. V. Vliyanie vulkanizma na okruzhayushchuyu sredu [The effect of volcanism on the environment] / Izmeneniya okruzhayushchej sredy i klimata: prirodnye i svyazannye s nimi tekhnogennye katastrofy: monografiya. V 8 t. [Changes in the environment and climate: natural and related technological disasters: a monograph. In 8 vol.] / pod red. kol. N. P. Laverova. — RAN. — Moscow: IFZ RAN, 2008. — Vol. 2. — P. 237–261 (in Russian).

- Александров Г. А., Александров Г. А., Армант А. Д. и др.* Математические модели экосистем. Экологические и демографические последствия / под ред. А. А. Дородницына. — М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1986.
- Aleksandrov G. A., Aleksandrov G. A., Armant A. D. et al.* Matematicheskie modeli ekosistem. Ekologicheskie i demograficheskie posledstviya [Mathematical models of ecosystems. Ecological and demographic consequences] / pod red. A. A. Dorodnicyna. — Moscow: Nauka, Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury, 1986 (in Russian).
- Альтеркоп Б. А., Мишин Е. В., Рухадзе А. А.* К теории магнитной неустойчивости лазерной плазмы // Письма в ЖЭТФ. — 1974. — Т. 19. — С. 291–294.
- Al'terkop B. A., Mishin E. V., Rukhadze A. A.* Contribution to the theory of the magnetic instability of a laser plasma // JETP Letters. — 1974. — Vol. 19, No. 5. — P. 170–171. (Original Russian paper: *Al'terkop B. A., Mishin Ye. V., Rukhadze A. A.* К теории magnitnoy neustoychivosti lazernoy plazmy // Pis'ma v ZhETF. — 1974. — Vol. 19. — P. 291–294.)
- Ананьин О. Б., Быковский Ю. А., Еремин Ю. В., Ступицкий Е. Л., Новиков И. К., Фролов С. П.* Исследования разлета лазерной плазмы в фоновый газ с помощью высокоскоростной фотографии // Квантовая электроника. — 1991. — Т. 18, № 7. — С. 869–872.
- Anan'in O. B. et al.* Investigation of laser plasma expansion in an ambient gas by high-speed photography // Soviet Journal of Quantum Electronics. — 1991. — Vol. 21, No. 7. — P. 787–789. (Original Russian paper: *Anan'in O. B., Bykovskiy Yu. A., Yeregin Yu. V., Stupitsky E. L., Novikov I. K., Frolov S. P.* Issledovaniya razleta lazernoy plazmy v fonovuyu gaz s pomoshch'yu vysokoskorostnoy fotografii // Kvantovaya elektronika. — 1991. — Vol. 18, No. 7. — P. 869–872.)
- Ананьин О. Б., Быковский Ю. А., Замышляев Б. В., Гузь А. Г., Ступицкий Е. Л., Худавердян А. М.* Спектральные исследования углеродной лазерной плазмы, разлетающейся в фоновую среду // Физика плазмы. — 1983. — Т. 9, № 2. — С. 319–325.
- Anan'in O. B., Bykovskiy Yu. A., Zamyshlyayev B. V., Guz' A. G., Stupitsky E. L., Khudaverdyan A. M.* Spektral'nyye issledovaniya uglevodnoy lazernoy plazmy, razletayushcheyesa v fonovuyu sredu [Spectral studies of a carbon laser plasma flying into a background medium] // Fizika plazmy. — 1983. — Vol. 9, No. 2. — P. 319–325 (in Russian).
- Ананьин О. Б., Быковский Ю. А., Замышляев Б. В., Новиков И. К., Ступицкий Е. Л.* Воздействие лазерного импульса на мишень. Ч. 1. Фотоэлектронный механизм генерации спонтанного магнитного поля // Квантовая электроника. — 1983. — Т. 10, № 3. — С. 523–534.
- Anan'in O. B., Bykovskiy Yu. A., Zamyshlyayev B. V., Novikov I. K., Stupitsky E. L.* Interaction of a laser pulse with a target. I. Photoelectron mechanism of generation of a spontaneous magnetic field // Soviet Journal of Quantum Electronics. — 1983. — Vol. 13, No. 3. — P. 307–314. (Original Russian paper: *Anan'in O. B., Bykovskiy Yu. A., Zamyshlyayev B. V., Novikov I. K., Stupitsky E. L.* Vozdeystviye lazernogo impul'sa na mishen'. Ch. 1. Fotoelektronnyy mekhanizm generatsii spontannogo magnitnogo polya // Kvantovaya elektronika. — 1983. — Vol. 10, No. 3. — P. 523–534.)
- Ананьин О. Б., Быковский Ю. А., Новиков И. К., Ступицкий Е. Л.* Магнитное поле на фронте лазерной плазмы, разлетающейся в фоновую среду // Квантовая электроника. — 1984. — Т. 11, № 7. — С. 1471–1473.
- Anan'in O. B., Bykovskiy Yu. A., Novikov I. K., Stupitsky E. L.* Magnetic field in the front of a laser plasma expanding into the ambient medium // Soviet Journal of Quantum Electronics. — 1984. — Vol. 14, No. 7. — P. 995–996. (Original Russian paper: *Anan'in O. B., Bykovskiy Yu. A., Novikov I. K., Stupitsky E. L.* Magnitnoye pole na fronte lazernoy plazmy, razletayushcheyesa v fonovuyu sredu // Kvantovaya elektronika. — 1984. — Vol. 11, No. 7. — P. 1471–1473.)
- Ананьин О. Б., Быковский Ю. А., Ступицкий Е. Л., Худавердян А. И.* Формирование ударно-волновой структуры при разлете лазерной плазмы в разреженный газ // Квантовая электроника. — 1987. — Т. 14, № 11. — С. 2313–2316.
- Anan'in O. B., Bykovskiy Yu. A., Stupitsky E. L., Khudaverdyan A. M.* Formation of a shock wave structure under conditions of expansion of a laser plasma in a low-density gas // Soviet Journal of Quantum Electronics. — 1987. — Vol. 17, No. 11. — P. 1474–1475. (Original Russian paper: *Anan'in O. B., Bykovskiy Yu. A., Stupitsky E. L., Khudaverdyan A. M.* Formirovaniye udarno-volnovoy struktury pri razlete lazernoy plazmy v razrezhenny gaz // Kvantovaya elektronika. — 1987. — Vol. 14, No. 11. — P. 2313–2316.)
- Ананьин О. Б., Новиков И. К., Ступицкий Е. Л. и др.* О захвате лазерной плазмой разреженного фонового газа // Квантовая электроника. — 1990. — Т. 17, № 5. — С. 614–618.
- Anan'in O. B., Novikov I. K., Stupitsky E. L. et al.* Trapping of low-density ambient gas by a laser plasma // Soviet Journal of Quantum Electronics. — 1990. — Vol. 20, No. 5. — P. 544–548. (Original Russian paper: *Anan'in O. B., Novikov I. K., Stupitsky E. L. et al.* O zakhvate lazernoy plazmoy razrezhen-nogo fonovogo gaza // Kvantovaya elektronika. — 1990. — Vol. 17, No. 5. — P. 614–618.)

- Андрущенко В. А., Головешкин В. А., Султанов И. А., Шевелев Ю. Д.* Кометно-астероидная опасность и возможность ее предотвращения. Состояние вопроса. Обзор // Проблемы вычислительной и прикладной механики. Автоматизация моделирования: сборник. — Вып. 1. — М.: МАКС Пресс, 2007. — С. 51–81.
- Andrushchenko V. A., Goloveshkin V. A., Sultanov I. A., Shevelev Yu. D.* Kometno-asteroidnaya opasnost' i vozmozhnost' yeye predotvrashcheniya. Sostoyaniye voprosa. Obzor [Comet-asteroid hazard and the possibility of its prevention. Status of the issue. Overview] // Problemy vychislitel'noy i prikladnoy mekhaniki. Avtomatizatsiya modelirovaniya. Sbornik [Collection "Problems of Computational and Applied Mechanics. Simulation Automation"]. — Iss. 1. — Moscow: MAKS Press, 2007. — P. 51–81 (in Russian).
- Андрущенко В. А.* Дрейф термика и пары термиков в поле стратифицированного ветра // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 1993. — Т. 29, № 5. — С. 616–620.
- Andrushchenko V. A.* Dreyf termika i pary termikov v pole stratifitsirovannogo vetra [Thermal drift and thermal pairs in a stratified wind field] // Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana. — 1993. — Vol. 29, No. 5. — P. 616–620 (in Russian).
- Андрущенко В. А. и др.* Качественный анализ начального этапа возникновения вихревого движения внутри области взрыва в неоднородной атмосфере // Проблемы вычислительной и прикладной механики. Автоматизация моделирования. — Вып. 3. — М.: Изд. МГУ, 2013б. — С. 79–86.
- Andrushchenko V. A. et al.* Kachestvennyy analiz nachal'nogo etapa vznikenoviya vikhrevogo dvizheniya vnutri oblasti vzryva v neodnorodnoy atmosfere [Qualitative analysis of the initial stage of the appearance of vortex motion inside the explosion region in a heterogeneous atmosphere] // Problemy vychislitel'noy i prikladnoy mekhaniki. Avtomatizatsiya modelirovaniya [Qualitative analysis of the initial stage of the appearance of vortex motion inside the explosion region in a heterogeneous atmosphere]. — Iss. 3. — Moscow: Izd. MGU, 2013b. — P. 79–86 (in Russian).
- Андрущенко В. А. и др.* О формировании вихревых структур внутри области сильного взрыва в неоднородной атмосфере / XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механике. — Аннот. докл. — Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2015. — С. 17.
- Andrushchenko V. A. et al.* O formirovanii vikhrevykh struktur vnutri oblasti sil'nogo vzryva v neodnorodnoy atmosfere [On the formation of vortex structures inside a region of a strong explosion in an inhomogeneous atmosphere] / XI Vseros. s'yezd po fundamental'nym probleme-mam teoreticheskoy i prikladnoy mekhanike [XI All-Russian Congress on fundamental problems of theoretical and applied mechanics]. — Annot. dokl. — Kazan: Izd-vo Akademii nauk RT, 2015. — P. 17 (in Russian).
- Андрущенко В. А. и др.* Проявления вулканизма (обзор) // Проблемы вычислительной и прикладной механики. Автоматизация моделирования. — Вып. 2. — М.: МАКС Пресс, 2012. — С. 86–133.
- Andrushchenko V. A. et al.* Proyavleniya vulkanizma (obzor) [Manifestations of volcanism (review)] // Problemy vychislitel'noy i prikladnoy mekhaniki. Avtomatizatsiya modelirovaniya [Problems of computational and applied mechanics. Simulation Automation]. — Iss. 2. — Moscow: MAKS Press, 2012. — P. 86–133 (in Russian).
- Андрущенко В. А.* О прохождении сферических ударных волн через термик // Инженерно-физический журнал. — 1989. — Т. 57, № 2. — С. 33–40.
- Andrushchenko V. A.* Passage of spherical shock waves through thermals // Journal of engineering physics. — 1990. — Vol. 57, No. 2. — P. 938–942. (Original Russian paper: *Andrushchenko V. A.* O prokhozhdanii sfericheskikh udarnykh voln cherez termik // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. — 1989. — Vol. 57, No. 2. — P. 33–40.)
- Андрущенко В. А., Головешкин В. А., Мурашкин И. В.* Численное решение задачи о взрыве малого космического тела в переменных Лагранжа // Вестник Нижегородского ун-та им. Н. И. Лобачевского. — 2011. — № 4 (3). — С. 628–630.
- Andrushchenko V. A., Goloveshkin V. A., Murashkin I. V.* Chislennoye resheniye zadachi o vzryve malogo kosmicheskogo tela v peremennykh Lagranzha [Numerical solution of the problem of the explosion of a small cosmic body in Lagrange variables] // Vestnik Nizhegorodskogo un-ta im. N. I. Lobachevskogo. — 2011. — No. 4 (3). — P. 628–630 (in Russian).
- Андрущенко В. А., Головешкин В. А., Мурашкин И. В., Холин Н. Н.* Математическое моделирование динамики и разрушения магматических бомб, образующихся при извержении подводных вулканов // Инженерно-физический журнал. — 2020б — Т. 93, № 5. — С. 661–673.

- Andrushchenko V. A., Goloveshkin V. A., Murashkin I. V., Kholin N. N.* Matematicheskoye modeli-rovaniye dinamiki i razrusheniya magmaticheskikh bomb, obrazuyushchikhsya pri izverzhenii podvodnykh vulkanov [Mathematical modeling of the dynamics and destruction of magma bombs formed during the eruption of underwater volcanoes] // *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. — 2020b. — Vol. 93, No. 5. — P. 661–673.
- Андрущенко В. А., Головешкин В. А., Мурашкин И. В., Холин Н. Н.* Разрушение лавового купола подводного вулкана // *Прикладная математика и механика*. — 2019a. — Т. 83, № 4. — С. 635–641.
- Andrushchenko V. A., Goloveshkin V. A., Murashkin I. V., Kholin N. N.* Razrusheniye lavovogo kupola podvodnogo vulkana [The Destruction of the Lava Dome of the Underwater Volcano] // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. — 2019a. — Vol. 83, No. 4. — P. 635–641 (in Russian).
- Андрущенко В. А., Кестенбойм Х. С., Чудов Л. А.* Движение газа, вызванное точечным взрывом в неоднородной атмосфере // *Известия АН СССР. Механика жидкости и газа*. — 1981. — № 6. — С. 144–151.
- Andrushchenko V. A., Kestenboim K. S., Chudov L. A.* Motion of gas due to a point explosion in an inhomogeneous atmosphere // *Fluid Dynamics*. — 1981. — Vol. 16, No. 6. — P. 921–927. (Original Russian paper: *Andrushchenko V. A., Kestenboim Kh. S., Chudov L. A.* Dvizheniye gaza, vyzvannoye tochechnym vzryvom v neodnorodnoy atmosfere // *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza*. — 1981. — No. 6. — P. 144–151.)
- Андрущенко В. А., Кестенбойм Х. С., Чудов Л. А.* Расчет подъема и взаимодействия термик в атмосфере (осесимметричная и пространственная задачи) // *Турбулентные струйные течения*. — Таллин: АН ЭССР, 1985. — С. 227–231.
- Andrushchenko V. A., Kestenboim Kh. S., Chudov L. A.* Raschet pod'yema i vzaimodeystviya termikov v atmosfere (osesimmetrichnaya i prostranstvennaya zadachi) [Calculation of the rise and interaction of thermals in the atmosphere (axisymmetric and spatial problems)] // *Turbulentnyye struynyye techeniya* [Turbulent jet flows]. — Tallin: AN ESSR, 1985. — P. 227–231.
- Андрущенко В. А., Лукашенко В. Т., Максимов Ф. А. и др.* Комплексное математическое исследование падения болидов в атмосфере с завершающим множественным взрывом // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. — 2018. — Т. 58, № 8. — С. 97–112.
- Andrushchenko V. A., Lukashenko V. T., Maksimov F. A. et al.* Comprehensive mathematical analysis of fall of bolides in atmosphere with final multiple explosion // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. — 2018. — Vol. 58, No. 8. — P. 1294–1308. (Original Russian paper: *Andrushchenko V. A., Lukashenko V. T., Maksimov F. A. et al.* Kompleksnoye matematicheskoye is-sledovaniye padeniya bolidov v atmosfere s zavershayushchim mnozhestvennym vzryvom // *Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoy fiziki*. — 2018. — Vol. 58, No. 8. — P. 97–112.)
- Андрущенко В. А., Моисеева Д. С., Моторин А. А., Ступицкий Е. Л.* Моделирование физических процессов воздействия мощного ядерного взрыва на астероид // *Компьютерные исследования и моделирование*. — 2019б. — Т. 11, № 5. — С. 861–877.
- Andrushchenko V. A., Moiseeva D. S., Motorin A. A., Stupitsky E. L.* Modelirovaniye fizicheskikh protsessov vozdeystviya moshchnogo yadernogo vzryva na asteroid [Modeling the physical processes of a powerful nuclear explosion on an asteroid] // *Computer research and modeling*. — 2019b. — Vol. 11, No. 5. — P. 861–877 (in Russian).
- Андрущенко В. А., Мурашкин И. В., Шевелев Ю. Д.* Численное исследование взаимодействий множественных сферических ударных волн друг с другом и подстилающей поверхностью // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. — 2016а. — Т. 56, № 6. — С. 1115–1121.
- Andrushchenko V. A., Murashkin I. V., Shevelev Yu. D.* Numerical investigation of interactions of multiple spherical shock waves between themselves and with the underlying surface // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. — 2016a. — Vol. 56, No. 6. — P. 1096–1101. (Original Russian paper: *Andrushchenko V. A., Murashkin I. V., Shevelev Yu. D.* Chislennoye issledovaniye vzaimodeystviy mnozhestvennykh sfericheskikh udarnykh voln drug s drugom i podstilayushchey poverkhnost'yu // *Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoy fiziki*. — 2016a. — Vol. 56, No. 6. — P. 1115–1121.)
- Андрущенко В. А., Мурашкин И. В.* Численное исследование задачи о шести точечных взрывах // *Материалы XX Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ' 2016)*. — М.: Изд-во МАИ, 2016б. — С. 169–171.
- Andrushchenko V. A., Murashkin I. V.* Chislennoye issledovaniye zadachi o shesti tochechnykh vzryvakh [Numerical study of the problem of six point explosions] // *Mater. XX Mezhdunar. konf. po neravnovesnym protsessam v soplakh i struyakh (NPNJ' 2016)* [XX International conf. on nonequilibrium processes in nozzles and jets (NPNJ '2016)]. — Moscow: Izd-vo MAI, 2016b. — P. 169–171 (in Russian).

- Андрущенко В. А., Мурашкин И. В., Шевелев Ю. Д. Численное решение задачи о взрыве в атмосферах планет в переменных Лагранжа // Известия РАН Механика жидкости и газа. — 2013а. — № 3. — С. 148–156.
Andrushchenko V. A., Murashkin I. V., Shevelev Yu. D. Numerical solution of the problem of explosion in planetary atmospheres in the Lagrangian variables // Fluid Dynamics. — 2013a. — Vol. 48, No. 3. — P. 416–423. (Original Russian paper: *Andrushchenko V. A., Murashkin I. V., Shevelev Yu. D.* Chislennoye resheniye zadachi o vzryve v atmosferakh planet v peremennykh Lagranzha // Izvestiya RAN. Mehanika jidkosti i gaza. — 2013a. — No. 3. — P. 148–156.)
- Андрущенко В. А., Ступицкий Е. Л. Численные исследования структуры возмущенных областей, образованных мощными взрывами на различных высотах. Обзор // Компьютерные исследования и моделирование. — 2020а. — Т. 12, № 1. — С. 97–140.
Andruschenko V. A., Stupitsky E. L. Chislennye issledovaniya struktury vozmushchennykh oblastei, obrazovannykh moshchnymi vzryvami na razlichnykh vysotakh. Obzor [Numerical studies of the structure of perturbed regions formed by powerful explosions at various heights. A review] // Computer Research and Modeling. — 2020a. — Vol. 12, No. 1. — P. 97–140 (in Russian).
- Анисимов С. И., Имас Я. А., Романов Г. С., Ходыко Ю. В. Действие излучения большой мощности на металл. — М.: Наука, 1979.
Anisimov S. I., Imas Ya. A., Romanov G. S., Khodyko Yu. V. Deystviye izlucheniya bol'shoi moshch-nosti na metall [The effect of radiation of high power on the metal]. — Moscow: Nauka, 1979 (in Russian).
- Аристов Е. Ю., Лушев А. А., Баранов В. К. и др. Лазерное моделирование разрушительного воздействия ядерных взрывов на опасные астероиды // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2018. — Т. 153, вып. 1. — С. 157–172.
Aristova E. Yu., Aushev A. A., Baranov V. K. et al. Laser simulations of the destructive impact of nuclear explosions on hazardous asteroids // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2018. — Vol. 126, Iss. 1. — P. 132–145. (Original Russian paper: *Aristova E. Yu., Aushev A. A., Baranov V. K. et al.* Lazernoye modelirovaniye razrushitel'nogo vozdeystviya yadernykh vzryvov na opasnyye asteroidy // Zhurnal eksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki. — 2018. — Vol. 153, Iss. 1. — P. 157–172.)
- Аристова А. Ю., Белов И. А., Гаранин Р. В. и др. Лазерное моделирование разрушительного воздействия ядерного взрыва на каменные, ледяные и железно-никелевые астероиды // Заббахинские научные чтения: сб. материалов XIV Международной конференции, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, 2019. — С. 35.
Aristova A. Yu., Belov I. A., Garanin R. V. et al. Lazernoye modelirovaniye razrushitel'nogo vozdeystviya yadernogo vzryva na kamennyye, ledyanyye i zhelezno-nikelevyye asteroid [Laser modeling of destructive effect of nuclear explosion onto Stone, Icy and Iron-Nickel asteroids] // Zababakhinskiye nauchnyye chteniya: sb. materialov XIV Mezhdunarodnoy konferentsii [Zababakhin scientific talks. XIV International Conference], RFYATS-VNIITF — Snezhinsk, 2019. — P. 35 (in Russian).
- Астероидно-кометная опасность / под ред. Сокольского А. Г. — СПб.: ИТА РАН, 1996.
Asteroidno-kometnaya opasnost' [Asteroid-comet hazard] / pod red. A. G. Sokol'skogo. — St. Petersburg: ITA RAN, 1996 (in Russian).
- Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / под ред. Б. М. Шустова, Л. В. Рыхловой. — М.: Физматлит, 2010.
Asteroidno-kometnaya opasnost': vchera, segodnya, zavtra. [Asteroid-comet hazard: yesterday, today, tomorrow] / pod red. B. M. Shustova, L. V. Ryhlovoj. — Moscow: Fizmatlit, 2010 (in Russian).
- Басов Н. Г., Крохин О. Н., Склизов Г. В. Исследования динамики нагревания и разлета плазмы, образующейся при фокусировании мощного излучения лазера на вещество // Труды ФИАН им. П. Н. Лебедева. — 1970. — Т. 52.
Basov N. G., Krokhig O. N., Sklizkov G. V. Issledovaniya dinamiki nagrevaniya i razleta plazmy, obrazuyushcheysya pri fokusirovani moshchnogo izlucheniya lazera na veshchestvo [Studies of the dynamics of heating and expansion of a plasma formed by focusing high-power laser radiation on matter] // Trudy FIAN im. P. N. Lebedeva. — 1970. — Vol. 52 (in Russian).
- Баум Ф. А., Каплан С. А., Станюкович К. П. Введение в космическую газодинамику. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1968.
Baum F. A., Kaplan S. A., Stanyukovich K. P. Vvedenie v kosmicheskuyu gazodinamiku [Introduction to the cosmic gas dynamics]. — Moscow: Gos. izd-vo fiz.-mat. lit., 1968 (in Russian).
- Белов И. А., Бельков С. А., Ворошин А. Ю. и др. Исследование на лазерной установке «Луч» критериев разрушения астероидоподобных тел из хондрита при воздействии на них мощ-

- ного импульсного излучения // X Всероссийская школа по лазерным технологиям. — Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. — С. 322.
- Belov I. A., Bell'kov S. A., Voroshin A. Yu. et al.* Issledovaniye na lazernoy ustanovke "Luch" kriteriyev razrusheniya asteroidopodobnykh tel iz khondrita pri vozdeystvii na nikh moshchnogo impul'snogo izlucheniya [Study on the Luch laser unit of the criteria for the destruction of asteroid-like bodies from chondritis when exposed to powerful pulsed radiation] // X Vserossiyskaya shkola po lazernym tekhnologiyam [X All-Russian School of Laser Technology]. — Sarov: FGUP "RFYATS-VNIIEF", 2017. — P. 322 (in Russian).
- Белоцерковский О. М., Андрущенко В. А., Шевелев Ю. Д.* Динамика пространственных вихревых течений в неоднородной атмосфере. Вычислительный эксперимент. — М.: Янус-К, 2002.
- Belocerkovskiy O. M., Andrushchenko V. A., Shevelev Yu. D.* Dinamika prostranstvennykh vih-revykh techeniy v neodnorodnoy atmosfere. Vychislitel'nyy eksperiment [Dynamics of spatial vortex flows in an inhomogeneous atmosphere. Computational experiment]. — Moscow: Yanus-K, 2002 (in Russian).
- Бойко В. А. и др.* Спектры Sc XIY и Sc XY в области 100-200А, излучаемые лазерной плазмой. — М.: Препринт ФИАН, 1972. — № 4.
- Boyko V. A. et al.* Spektры Sc XIY i Sc XY v oblasti 100-200A, izluchayemye lazernoy plaz-moy [Spectra Sc XIY and Sc XY in the region of 100-200A emitted by a laser plasma]. — Moscow: Preprint FIAN, 1972. — No. 4 (in Russian).
- Большов Л. А., Дрейзин Ю. А., Дыхне А. М.* О самопроизвольном замагничивании электронной теплопроводности в лазерной плазме // Письма в ЖЭТФ. — 1974. — Т. 19. — С. 288–291.
- Bol'shov L. A., Dreizin Yu. A., Dykhne A. M.* Spontaneous magnetization of electronic thermal conductivity in a laser plasma // JETP Letters. — 1974. — Vol. 19, No. 5. — P. 168–170. (Original Russian paper: *Bol'shov L. A., Dreizin Yu. A., Dykhne A. M.* O samoproizvol'nom zamagnichivaniy elektronnoy teploprovodnosti v lazernoy plazme // Pis'ma v ZhETF. — 1974. — Vol. 19. — P. 288–291.)
- Брагинский С. И.* Явления переноса в плазме // Вопросы теории плазмы: сборник. Вып. 1. — М.: Госатомиздат, 1963.
- Braginskiy S. I.* Yavleniya perenosa v plazme [Transport phenomena in plasma] // Voprosy teorii plazmy: sbornik. Iss. 1. — Moscow: Gosatomizdat, 1963 (in Russian).
- Бурдонский И. Н., Леонов А. Г., Макаров К. Н., Юфа В. Н.* Измерение удельного импульса отдачи для моделирования воздействия лазерного излучения на потенциально опасные астероиды // Заббахинские научные чтения: сб. материалов XIV Международной конференции, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск. — 2019. — С. 42.
- Burdonskiy I. N., Leonov A. G., Makarov K. N., Yufa V. N.* Izmereniye udel'nogo impul'sa otdachi dlya modelirovaniya vozdeystviya lazernogo izlucheniya na potentsial'no opasnyye asteroidy [Measurement of the specific recoil momentum to simulate the effects of laser radiation exposure on potentially dangerous asteroids] // Zababakhinskiye nauchnyye chteniya: sb. materialov XIV Mezhdunarodnoy konferentsii [Zababakhin scientific talks. XIV International Conference]. — RFYATS-VNIITF, Snezhinsk, 2019. — P. 42 (in Russian).
- Войцеховский Б. В.* К проблеме Тунгусского метеорита // Физика горения и взрыва. — 1980. — № 5. — С. 5–8.
- Voitsekhovskiy B. V.* K probleme Tungusskogo meteorite [To the problem of the Tunguska meteorite] // Fizika goreniya i vzryva. — 1980. — No. 5. — P. 5–8 (in Russian).
- Григорян Г. Г.* О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // Космические исследования. — 1979. — Т. 17, № 6. — С. 875–893.
- Grigoryan G. G.* O dvizhenii i razrushenii meteoritov v atmosferakh planet [On the movement and destruction of meteorites in the atmospheres of planets] // Kosmicheskiye issledovaniya. — 1979. — Vol. 17, No. 6. — P. 875–893 (in Russian).
- Дегтярь В. Г., Волков В. А.* Ракетная концепция системы противоастероидной защиты Земли. — М.: Машиностроение, 2013.
- Degtyar' V. G., Volkov V. A.* Raketnaya koncepciya sistemy protivooasteroidnoy zashchity Zemli [Rocket concept of the Earth's anti-steroid defense system]. — Moscow: Mashinostroenie, 2013 (in Russian).
- Добрецов Н. Л.* Катастрофические извержения вулкана — готово ли к ним человечество? // Наука из первых рук. — 2018. — № 5/6 (80). — С. 74–79.
- Dobretsov N. L.* Katastroficheskiye izverzheniya vulkana — gotovo li k nim chelovechestvo? [Catastrophic volcanic eruptions — is humanity ready for them?] // Nauka iz pervykh ruk. — 2018. — No. 5/6 (80). — P. 74–79 (in Russian).

- Добровольский О. В.* Взрывная волна, связанная с движением метеорного тела // *Аэромеханика и газовая динамика*. — 2002. — № 2. — С. 91–94.
Dobrovolskiy O. V. Vzryvnaya volna, svyazannaya s dvizheniyem meteornogo tela [The blast wave associated with the motion of a meteoroid] // *Aeromekhanika i gazovaya dinamika*. — 2002. — No. 2. — P. 91–94 (in Russian).
- Дюдерштадт Дж., Мозес Г.* Инерциальный термоядерный синтез. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
Duderstadt J., Moses G. Inertial confinement fusion. — New York: John Wiley and sons, 1982. (Russ. ed.: *Dyuder-shtadt Dzh., Mozes G.* Inercial'nyj termoyadernyj sintez. — Moscow: Energoatomizdat, 1984.)
- Елкина С.* Йеллоустоун: апокалипсис приближается? // *Тайны XX века*. — 2019. — № 30. — С. 6–7.
Yelkina S. Yelloustoun: apokalipsis priblizhayetsya? [Yellowstone: Apocalypse approaching?] // *Tayny XX veka*. — 2019. — No. 30. — P. 6–7 (in Russian).
- Жарков В. Н.* Внутреннее строение Земли и планет. — М.: Наука; Физматлит, 1978.
Zharkov V. N. Vnutrenneye stroeniye Zemli i planet [The internal structure of the Earth and planets]. — Moscow: Nauka; Fizmatlit, 1978 (in Russian).
- Жигалин А. Д., Архипова Е. В., Харькина Н. А.* Подводный вулканизм как одна из причин циклонической активности центральной части Тихого океана // *Вестник Международного ун-та природы, общества и человека «Дубна»*. — 2018. — № 4 (41). — С. 14–21.
Zhigalin A. D., Arkhipova E. V., Khar'kina N. A. Podvodnyy vulkanizm kak odna iz prichin tsiklonicheskoy aktivnosti tsentral'noy chasti Tikhogo okeana [Underwater volcanism as one of the causes of cyclonic activity in the central part of the Pacific Ocean] // *Vestn. Mezhdunar. un-ta prirody, obshchestva i cheloveka "Dubna"* [Omsk State University Journal. Int. University of nature, society and man "Dubna"]. — 2018. — No. 4 (41). — P. 14–21 (in Russian).
- Ивашкин В. В.* О возможности использования лазерного воздействия на сближающиеся с Землей небесные тела // *Доклады академии наук*. — 2004. — Т. 397, № 4. — С. 486–489.
Ivashkin V. V. O vozmozhnosti ispol'zovaniya lazernogo vozdeystviya na sblizhayushchiesya s Zemley nebesnyye tela [The possibility of using laser exposure on celestial bodies approaching the Earth] // *Dokladi akademii nauk*. — 2004. — Vol. 397, No. 4. — P. 486–489 (in Russian).
- Искольдский А. М., Нестерихин Ю. Е., Паташынский А. З. и др.* Градиентный взрыв кипящей капли в условиях объемного тепловыделения // *Доклады академии наук СССР*. — 1977. — Т. 236, № 5. — С. 1109–1111.
Iskol'dskiy A. M., Nesterikhin Yu. E., Patashynskiy A. Z. et al. Gradiyentnyy vzryv kipyashchey kapli v usloviyakh ob'yemnogo teplovydeleniya [Gradient explosion of a boiling drop under conditions of volumetric heat release] // *Dokladi akademii nauk SSSR*. — 1977. — Vol. 236, No. 5. — P. 1109–1111 (in Russian).
- Катастрофические воздействия космических тел / под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова.* — М.: ИКЦ «Академкнига», 2005.
Katastroficheskiye vozdeystviya kosmicheskikh tel [The catastrophic effects of space bodies] / pod red. V. V. Adushkina, I. V. Nemchinova. — Moscow: IKC "Akademkniga", 2005 (in Russian).
- Коблов П. И., Симоненко В. А., Иванов Ю. А. и др.* Основные требования к ядерному взрывному устройству (ЯЗУ) для использования в системе защиты Земли (СЗЗ) от астероидов и комет // *Известия ВНИИТФ, г. Снежинск*. — 1997. — Ч. 1. — С. 182–186.
Koblov P. I., Simonenko V. A., Ivanov Yu. A. et al. Osnovnyye trebovaniya k yadernomu vzryvnomu ustrojstvu (YaZU) dlya ispol'zovaniya v sisteme zashchity Zemli (SZZ) ot asteroidov i komet [Basic requirements for a nuclear explosive device (NED) for use in the Earth's protection system (EPS) against asteroids and comets] // *Izvestiya VNIITF, g. Snezhinsk*. — 1997. — Ch. 1. — P. 182–186 (in Russian).
- Коженкова О. А., Моторин А. А., Ступицкий Е. Л.* Инерционная стратификация разлетающегося ионизированного многокомпонентного плазменного сгустка // *Геоматизм и аэронаука*. — 2013. — Т. 53, № 5. — С. 620–634.
Kozhenkova O. A., Motorin A. A., Stupitskiy E. L. Inertial stratification of an expanding highly ionized multicomponent plasma bunch // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2013. — Vol. 53, No. 5. — P. 580–594. (Original Russian paper: *Kozhenkova O. A., Motorin A. A., Stupitskiy E. L.* Inertsionnaya stratifikatsii razletayushchegosya ionizirovannogo mnogokomponentnogo plazmennogo sgustka // *Geomagnetizm i aeronomiya*. — 2013. — Vol. 53, No. 5. — P. 620–634.)
- Козлов И. М., Милошевский Г. В., Романов Г. С., Суворов А. Е.* Численное моделирование на основе TVD-схем газодинамических процессов и динамики пылевых частиц при катастрофических вулканических взрывах // *Инженерно-физический журнал*. — 1999. — Т. 72, № 6. — С. 1217–1226.

- Kozlov I. M., Miloshevskii G. V., Romanov G. S., Suvorov A. E.* Numerical simulation of gasdynamic processes and the dynamics of dust particles in catastrophic volcanic explosions by applying TVD schemes // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. — 1999. — Vol. 72. — P. 1179–1187. (Original Russian paper: *Kozlov I. M., Miloshevskiy G. V., Romanov G. S., Suvorov A. E.* Numerical simulation based on TVD-schemes of gas-dynamic processes and the dynamics of dust particles in catastrophic volcanic explosions // *Injenerno-fizicheskii jurnal*. — 1999. — Vol. 72, No. 6. — P. 1217–1226.)
- Козлов И. М., Романов Г. С., Суворов А. Е.* Численное моделирование газодинамических процессов при катастрофических вулканических взрывах // *Инженерно-физический журнал*. — 1994. — Т. 66, № 3. — С. 263–266.
- Kozlov I. M., Romanov G. S., Suvorov A. E.* Numerical simulation of gasdynamic processes in the case of catastrophic volcanic eruptions // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. — 1994. — Vol. 66. — P. 229–232. (Original Russian paper: *Kozlov I. M., Romanov G. S., Suvorov A. E.* Chislennoye modelirovaniye gazodinamicheskikh protsessov pri katastroficheskikh vulkanicheskikh vzryvakh // *Injenerno-fizicheskii jurnal*. — 1994. — Vol. 66, No. 3. — P. 263–266.)
- Кокосхин А., Есин В., Зеленый Л.* Об астероидно-кометной угрозе Земле и мерах по нейтрализации этой угрозы // *Международная жизнь*. — 2013. — № 4. — С. 86–95.
- Kokoshin A., Yesin V., Zelenyy L.* Ob asteroidno-kometnoy ugroze Zemle i merakh po neytralizatsii etoy ugrozy [On the asteroid-comet threat to the Earth and measures to neutralize this threat] // *Mezhdunarodnaya zhizn'*. — 2013. — No. 4. — P. 86–95 (in Russian).
- Коновалов В. П., Репин А. Ю., Ступицкий Е. Л.* Возбуждение и ионизация разреженного воздуха быстрыми электронами // *Геомagnetизм и аэрoномия*. — 1994. — Т. 34, № 6. — С. 128–143.
- Konovalev V. P., Repin A. Yu., Stupitsky E. L.* Excitation and ionization of rarefied air by fast electrons // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 1994. — Vol. 34, No. 6. — P. 128–143. (Original Russian paper: *Konovalev V. P., Repin A. Yu., Stupitsky E. L.* Vozbuzhdeniye i ionizatsiya razrezhennogo vozdukha bystryimi elektronami // *Geomagnetizm i aeronomiya*. — 1994. — Vol. 34, No. 6. — P. 128–143.)
- Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуриалов Л. В.* Комплексное моделирование полета и взрыва в атмосфере метеорного тела // *Астрономический вестник*. — 1991. — Т. 25, № 3. — С. 327–343.
- Korobeynikov V. P., Chushkin P. I., Shurshalov L. V.* Kompleksnoye modelirovaniye poleta i vzryva v atmosfere meteorного tela [Complex modeling of flight and explosion in the atmosphere of a meteoroid] // *Astronomicheskii vestnik*. — 1991. — Vol. 25, No. 3. — P. 327–343 (in Russian).
- Косарев И. Б.* Численное моделирование инъекции газа в атмосферу при взрывных вулканических извержениях // *Динамические процессы в геосферах*. — М.: Геос, 2010. — С. 211–220.
- Kosarev I. B.* Chislennoye modelirovaniye inzhetskii gaza v atmosferu pri vzryvnykh vulkanicheskikh izverzheniyakh [Numerical modeling of gas injection into the atmosphere during explosive volcanic eruptions] // *Dinamicheskiye protsessy v geosferakh* [Dynamic processes in geospheres]. — Moscow: Geos, 2010. — P. 211–220 (in Russian).
- Кудрявцев С. П., Прокина Л. И., Стрелков А. С.* О передаче энергии импульсного рентгеновского источника верхней атмосфере // *Космические исследования*. — 1974. — Т. 12, вып. 1. — С. 92.
- Kudryavtsev S. P., Prokina L. I., Strelkov A. S.* O peredache energii impul'snogo rentgenovskogo istochnika verkhney atmosfere [On energy transfer of a pulsed X-ray source to the upper atmosphere] // *Cosmic Research*. — 1974. — Vol. 12, Iss. 1. — P. 92 (in Russian).
- Кудряшов Н. А., Романов Г. С., Шевяков А. Ф.* Численное моделирование взрывного вулканического извержения на начальной стадии // *Инженерно-физический журнал*. — 2002. — Т. 75, № 3. — С. 3–8.
- Kudryashov N. A., Romanov G. S., Shevyakov A. F.* Numerical simulation of explosive volcanic eruption in the initial stage // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. — 2002. — Vol. 75, No. 3 — P. 521–528. (Original Russian paper: *Kudryashov N. A., Romanov G. S., Shevyakov A. F.* Chislennoye modelirovaniye vzryvnogo vulkanicheskogo izverzheniya na nachal'noy stadii // *Injenerno-fizicheskii jurnal*. — 2002. — Vol. 75, No. 3. — P. 3–8.)
- Лукашенко В. Т., Андрущенко В. А., Максимов Ф. А. и др.* Математическое моделирование движения болидов в атмосфере с завершающим множественным взрывом фрагментов / XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теор. и прикл. механики: сб. тр. в 4 томах. — Т. 2. Механика жидкости и газа. — Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. — С. 393–395.

- Lukashenko V. T., Andrushchenko V. A., Maksimov F. A. et al.* Matematicheskoye modelirovaniye dvizheniya bolidov v atmosfere s zavershayushchim mnozhestvennym vzryvom fragmentov [Mathematical modeling of the movement of fireballs in the atmosphere with the final multiple explosion of fragments] / XII Vseross. s'yezd po fundamental'nym problemam teor. i prikl. mekhaniki: sb. tr. v 4 tomakh [XII All-Russian. Congress on Fundamental Problems of the theor. and appl. mechanics: coll. of the conf. papers in 4 vol.]. — Ufa: RITS BashGU, 2019. — Vol. 2. Fluid and gas mechanics. — P. 393–395 (in Russian).
- Мартынюк М. М.* Роль фазового взрыва космического вещества в процессе разрушения метеоритов / Взаимодействие метеорного вещества с Землей. — Новосибирск: Наука, 1980. — С. 168–178.
- Martyniuk M. M.* Rol' fazovogo vzryva kosmicheskogo veshchestva v protsesse razrusheniya meteoritov [The role of the phase explosion of cosmic matter in the process of meteorite destruction] / Vzaimodeystviye meteorного veshchestva s Zemley [Interaction of meteor matter with the Earth]. — Novosibirsk: Nauka, 1980. — P. 168–178 (in Russian).
- Подгорный И. М., Сагдеев Р. З.* Физика межпланетной плазмы и лабораторный эксперимент // Успехи физических наук. — 1969. — Т. 98, вып. 3. — С. 409–440.
- Podgornyy I. M., Sagdeyev R. Z.* Fizika mezhplanetnoy plazmy i laboratornyy eksperiment [Interplanetary plasma physics and laboratory experiment] // Uspekhi fizicheskikh nauk. — 1969. — Vol. 98, Iss. 3. — P. 409–440 (in Russian).
- Покровский Г. И.* О взрыве метеорных тел, движущихся в атмосфере // Метеоритика. — 1966. — Вып. 27. — С. 103–108.
- Pokrovsky G. I.* O vzryve meteornykh tel, dvizhushchih'sya v atmosfere [About the explosion of meteorites moving in the atmosphere] // Meteoritika. — 1966. — No. 27. — P. 103–108 (in Russian).
- Родионов В. В., Возовиков В. В., Задворнов Ю. А. и др.* Ядерные средства воздействия на опасные космические объекты. Состав и схема функционирования // Известия ВНИИТФ, г. Снежинск. — 1997. — Ч. 1. — С. 187–193.
- Rodionov V. V., Vozovikov V. V., Zadvornov Yu. A. et al.* Yadernye sredstva vozdeystviya na opasnye kosmicheskie ob'ekty. Sostav i skhema funkcionirovaniya [Nuclear means of influence on dangerous space objects. The composition and functioning scheme] // Izvestiya VNIITF, g. Snezhinsk. — 1997. — Ch. 1. — P. 187–193 (in Russian).
- Рэди Дж.* Действие мощного лазерного излучения. — М.: Мир, 1974.
- Redy J.* Effects of High-Power Laser Radiation / Academic Press, 1971 (Russ. ed.: *Redi Dzh.* Deystviye moshchnogo lazernogo izlucheniya. — Moscow: Mir, 1974.)
- Седов Л. И.* Движение воздуха при сильном взрыве // Доклады Академии наук СССР. — 1946. — Т. 52, № 1. — С. 17–20.
- Sedov L. I.* Dvizhenie vozduha pri sil'nom vzryve [Air movement during a strong explosion] // Doklady Akademii nauk SSSR. — 1946. — Vol. 52, No. 1. — P. 17–20 (in Russian).
- Слезин Ю. Б.* Механизм вулканических извержений (стационарная модель). — М.: Научный мир, 1998.
- Slezin Yu. B.* Mekhanizm vulkanicheskikh izverzhenij (stacionarnaya model') [The mechanism of volcanic eruptions (stationary model)]. — Moscow: Nauchnyj mir, 1998 (in Russian).
- Станюкович К. П., Шалимов В. П.* О движении метеорных тел в атмосфере Земли // Метеоритика. — 1961. — Вып. 20. — С. 54–71.
- Stanyukovich K. P., Shalimov V. P.* O dvizhenii meteornykh tel v atmosfere Zemli [On the motion of meteor bodies in the Earth's atmosphere] // Meteoritika. — 1961. — No. 20. — P. 54–71 (in Russian).
- Ступицкий Е. Л.* Воздействие лазерного импульса на мишень. Ч. 2. Фотоионизация фоновой среды // Квантовая электроника. — 1983. — Т. 10, № 3. — С. 534–540.
- Stupitsky E. L.* Interaction of a laser pulse with a target. II. Photoionization of the ambient medium // Soviet Journal of Quantum Electronics. — 1983. — Vol. 13, No. 3. — P. 315–318. (Original Russian paper: *Stupitsky E. L.* Vozdeystviye lazernogo impul'sa na mishen'. Ch. 2. Fotoionizatsiya fonovoy sredy // Kvantovaya elektronika. — 1983. — Vol. 10, No. 3. — P. 534–540.)
- Ступицкий Е. Л.* Динамика мощных импульсных излучений и плазменных образований. — М.: Физматлит, 2008.
- Stupitsky E. L.* Dinamika moshchnykh impul'snykh izluchenij i plazmennykh obrazovaniy [The dynamics of powerful-pulsed radiation and plasma formations]. — Moscow: Fizmatlit, 2008 (in Russian).
- Ступицкий Е. Л., Андрущенко В. А., Моисеева Д. С., Моторин А. А.* Расчет воздействия мощного ядерного взрыва на астероид / IX Всероссийская научная конференция с международным участием «Механика композитных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред»: сб. тез. — М.: ИПРИМ РАН, 2019. — С. 164.

- Stupitsky E. L., Andrushchenko V. A., Moiseeva D. S., Motorin A. A.* Raschet vozdeystviya moshch-nogo yadernogo vzryva na asteroid [Calculation of the impact of a powerful nuclear explosion on an asteroid] / IX Vserossiyskaya nauchnaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiyem "Mekhanika kompozitnykh materialov i konstruktivnykh slozhnykh i geterogennykh sred" [IX All-Russian scientific conf. from the international participation "Mechanics of composite materials and structures, complex and heterogeneous media"]: sb. tez. — Moscow: IPRIM RAN, 2019. — P. 164 (in Russian).
- Ступицкий Е. Л., Любченко О. С., Худавердян А. М.* Неравновесные процессы при разлете высокотемпературного лазерного сгустка // Квантовая электроника. — 1985. — Т. 12, № 5. — С. 1038–1049.
- Stupitsky E. L., Lyubchenko O. S., Khudaverdyan A. M.* Nonequilibrium processes accompanying expansion of a high-temperature plasma bunch // Soviet Journal of Quantum Electronics. — 1985. — Vol. 15, No. 5. — P. 682–688. (Original Russian paper: *Stupitsky E. L., Lyubchenko O. S., Hudaverdyan A. M.* Neravnovesnye processy pri razlete vysokotemperaturnogo lazernogo sgustka // Kvantovaya elektronika. — 1985. — Vol. 12, No. 5. — P. 1038–1049.)
- Ступицкий Е. Л., Харкунов А. Н.* Инерционная стратификация разлетающегося многокомпонентного газового сгустка // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2012. — Т. 52, № 3. — С. 330–341.
- Stupitskii E. L., Kharkunov A. N.* Inertial stratification of a dispersing multicomponent gas cloud // Geomagnetism and Aeronomy. — 2012. — Vol. 52, No. 3. — P. 309–320. (Original Russian paper: *Stupitsky E. L., Harkunov A. N.* Inercionnaya stratifikatsii razletayushchegosya mnogokomponentnogo gazovogo sgustka // Geomagnetizm i aeronomiya. — 2012. — Vol. 52, No. 3. — P. 330–341.)
- Ступицкий Е. Л., Холодов А. С.* Моделирование динамики плазменного сгустка высокой удельной энергии в верхней атмосфере. — Ч. 1. Ранняя стадия разлета и взаимодействия плазменного сгустка с ионосферой и геомагнитным полем. Обзор // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2012а. — Т. 52, № 4. — С. 435–455.
- Stupitskii E. L., Kholodov A. S.* Modeling the dynamics of a high specific energy plasma bulge in the upper atmosphere. 1. Physics of the processes and numerical simulation of the early stage of plasma bulge expansion and interaction with the ionosphere and geomagnetic field. A review // Geomagnetism and Aeronomy. — 2012a. — Vol. 52, No. 4. — P. 411–430. (Original Russian paper: *Stupitsky E. L., Kholodov A. S.* Modelirovanie dinamiki plazmennogo sgustka vysokoy udel'noj energii v verhnej atmosfere. 1. Rannaya stadiya razleta i vzaimodeystviya plazmennogo sgustka s ionosferoj i geomagnitnym polem. Obzor // Geomagnetizm i aeronomiya. — 2012a. — Vol. 52, No. 4 — P. 435–455.)
- Ступицкий Е. Л., Холодов А. С.* Моделирование динамики плазменного сгустка высокой удельной энергии в верхней атмосфере. — Ч. 2. Численное моделирование и физические особенности крупномасштабного плазменного течения на поздней стадии его развития. Обзор // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2012б. — Т. 52, № 5. — С. 594–625.
- Stupitskii E. L., Kholodov A. S.* Modeling the dynamics of a high specific energy plasma bulge in the upper atmosphere. 2. Numerical simulation and physical features of a large-scale plasma flow at its late development stage. A review // Geomagnetism and Aeronomy. — 2012b. — Vol. 52, No. 5. — P. 561–590. (Original Russian paper: *Stupitskii E. L., Kholodov A. S.* Modelirovanie dinamiki plazmennogo sgustka vysokoy udel'noj energii v verhnej atmosfere. 2. Chislennoe modelirovanie i fizicheskie osobennosti krupnomas-shtabnogo plazmennogo techeniya na pozdnej stadii ego razvitiya. Obzor // Geomagnetizm i aeronomiya. — 2012b. — Vol. 52, No. 5. — P. 594–625.)
- Ступицкий Е. Л., Холодов А. С.* Физические исследования и математическое моделирование крупномасштабных геофизических экспериментов. — Долгопрудный: Интеллект, 2019.
- Stupitskii E. L., Kholodov A. S.* Fizicheskie issledovaniya i matematicheskoe modelirovanie krupnomasshtabnykh geofizicheskikh eksperimentov [Physical research and mathematical modeling of large-scale geophysical experiments]. — Dolgoprudnyj: Intellekt, 2019 (in Russian).
- Фадеев Ю. И.* Разрушение метеоритных тел в атмосфере // Физика горения и взрыва. — 1967. — Т. 3, № 2. — С. 276–280.
- Fadeenko Yu. I.* Destruction of meteoroids in the atmosphere // Combustion, explosion, and shock waves. — 1967. — Vol. 3, No. 2. — P. 172–174. (Original Russian paper: *Fadeenko Yu. I.* Razrushenie meteoritnykh tel v atmosfere // Fizika goreniya i vzryva. — 1967. — Vol. 3, No. 2. — P. 276–280.)
- Физика ядерного взрыва. — М.: Физматлит, 2009. — Т. 1.
Fizika yadernogo vzryva [Physics of Nuclear Explosion]. — Moscow: Fizmatlit, 2009. — Vol. 1 (in Russian).
- Физика ядерного взрыва. — М.: Физматлит, 2010. — Т. 2.
Fizika yadernogo vzryva [Physics of Nuclear Explosion]. — Moscow: Fizmatlit, 2010. — Vol. 2 (in Russian).
- Физика ядерного взрыва. — М.: Физматлит, 2013. — Т. 3.
Fizika yadernogo vzryva [Physics of Nuclear Explosion]. — Moscow: Fizmatlit, 2013. — Vol. 3 (in Russian).

- Фирстов П. П., Токарев П. И., Лемзиков В. К.* Киносъемка выбросов и схема эксплозивного процесса вулкана Карымского // Бюллетень вулканических станций АН СССР. — 1978. — № 55. — С. 152–157.
Firstov P. P., Tokarev P. I., Lemzikov V. K. Kinos'emka vybrosov i skhema eksplozivnogo processa vulkana Karymskogo [Filming of emissions and the scheme of the explosive process of Karymsky volcano] // Byulleten' vulkanicheskikh stancij AN SSSR. — 1978. — No. 55. — P. 152–157 (in Russian).
- Хазинс В. М., Шувалов В. В.* Моделирование динамики газопеплового облака фреатомагматического извержения // Динамические процессы в геосферах: сборник научных трудов ИДГ РАН. — М.: Геос, 2013. — Вып. 4. — С. 250–258.
Hazins V. M., Shuvalov V. V. Modelirovanie dinamiki gazo-peplovogo oblaka freatomagmaticheskogo izverzheniya [Modeling the dynamics of a gas-ash cloud of a phreatomagmatic eruption] // Dinamicheskie processy v geosferah: sbornik nauchnykh trudov IDG RAN [Dynamic Processes in Geospheres. Coll. of scientific papers IGD RAS]. — Moscow: Geos, 2013. — Iss. 4. — P. 250–258 (in Russian).
- Хлыстов А. И., Клиге Р. К.* Глобальное потепление и его возможные причины // Земля и Вселенная. — 2018. — № 1. — С. 60–70.
Hlystov A. I., Klige R. K. Global'noe poteplenie i ego vozmozhnye prichiny [Global warming and its possible causes] // Zemlya i Vselennaya. — 2018. — No. 1. — P. 60–70 (in Russian).
- Холин Н. Н., Головешкин В. А., Андрущенко В. А.* Реальность астероидно-кометной опасности и разработка эффективных методов ее предотвращения // Вестник МГАПИ. Сер. Машиностроение. — 2011. — № 37. — С. 151–163.
Holin N. N., Goloveshkin V. A., Andrushchenko V. A. Real'nost' asteroidno-kometnoj opasnosti i razrabotka effektivnykh metodov ee predotvrashcheniya [The reality of asteroid-comet hazard and the development of effective methods to prevent it] // Vestnik MGAPI. Ser. Mashinostroenie. — 2011. — No. 37. — P. 151–163 (in Russian).
- Шувалов В. В. и др.* Определение высоты «метеорного взрыва» // Астрономический вестник. — 2016. — Т. 50, № 1. — С. 3–14.
Shuvalov V. V. et al. Determination of the height of the “meteoric explosion” // Solar system research. — 2016. — Vol. 50, No. 1. — P. 1–12. (Original Russian paper: *Shuvalov V. V. et al.* Opredeleniye vysoty “meteornogo vzryva” // Astronomicheskij vestnik. — 2016. — Vol. 50, No. 1. — P. 3–14.)
- Шувалов В. В., Трубецкая И. А.* Извержение вулкана Тамборы (1815 г.). Обзор наблюдательных данных и численное моделирование // Динамика взаимодействующих геосфер. — М.: ИДГ РАН, 2004. — С. 336–343.
Shuvalov V. V., Trubetskaya I. A. Izverzheniye vulkana Tambory (1815 g.). Obzor nablyudatel'-nykh dannykh i chislennoye modelirovaniye [Eruption of Tambora Volcano (1815). Review of observational data and numerical modeling] // Dinamika vzaimodeystvuyushchikh geosfer. — Moscow: IDG RAN, 2004. — P. 336–343 (in Russian).
- Шуршалов Л. В.* Крупномасштабный взрыв в неоднородной атмосфере Земли при учете спектрального излучения // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. — 1982. — № 6. — С. 124–130.
Shurshalov L. V. Krupnomasshtabnyy vzryv v neodnorodnoy atmosfere Zemli pri uchete spektral'nogo izlucheniya [Large-scale explosion in the inhomogeneous atmosphere of the Earth when spectral radiation is taken into account] // Izvestiya AN SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza. — 1982. — No. 6. — P. 124–130 (in Russian).
- Baker W. E., Cox P. A., Westine P. S. et al.* Explosion hazards and evaluation. — Amsterdam – Oxford – New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1983.
- Borovička J., Spurný P., Brown P., Wiegert P. et al.* The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // Nature. — 2013. — Vol. 503. — P. 235–237.
- Cepplecha Z., Revelle D. O.* Fragmentation model of meteoroid motion, mass loss and radiation in the atmosphere // Meteoritics and Planetary Science. — 2005. — Vol. 40, No. 1 — P. 35–54.
- Cohen M. B., Inan U. S., Golkowski M., Lehtinen N. G.* On the generation of ELF/VLF waves for long-distance propagation via steerable HF heating of the lower ionosphere // J. Geophys. Res. — 2010. — Vol. 115, Iss. A07233. — P. 1–14.
- McInnes C. R.* Deflection of near-Earth asteroids by kinetic energy impacts from retrograde objects // Planetary and Space Sci. — 2004. — Vol. 52, No. 7 — P. 587–590.

- Myagkov N. N.* Model of a strong volcanic blast and a method of estimating the mass ejected // *Geophys. J. Int.* — 1998. — Vol. 133. — P. 209–211.
- Rampino M. R., Self S.* Historic eruptions of Tambora (1815), Krakatau (1883), and Agung (1963), their stratospheric aerosols, and climatic impact // *Quaternary Research.* — 1982. — Vol. 18. — P. 127–143.
- Stamper J. A. et al.* Spontaneous Magnetic Fields in Laser-Produced Plasmas // *Phys. Rev. Letters.* — 1971. — Vol. 26. — P. 1012.
- Wood A. W., Bower S. M.* The decompression of volcanic jets in a crater during explosive volcanic eruptions // *Earth and Planetary Sci. Lett.* — 1995. — Vol. 131, Iss. 3–4. — P. 189–205.