

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

**Размышления американского ученого
о работе академика Я.Б. Зельдовича
в области динамической физики высоких давлений**

Р.Н. Киилер

Нет сомнения, что академик Я.Б. Зельдович был самым талантливым ученым в области динамической физики высоких давлений. В этой области, пожалуй, ему не было равных, кроме Нобелевского лауреата П.В. Бриджмана. В самом деле, выдающееся наследие представлено сегодня в работе его коллег и учеников — профессора Л.В. Альтшулера, члена-корреспондента РАН С.Б. Кормера и академика В.Е. Фортова. Необходимо отметить, что работы этих исследователей значительно превосходят работы американских исследователей в той же области как в качестве, так и в количестве достигнутых результатов. В этой статье я буду говорить о применении динамических методов в проблемах, которые лежали в области интересов академика Я.Б. Зельдовича: физика твердого тела, химическая физика и геофизика. Хотя прикладная физика ударных волн представляла значительный интерес для Я.Б. Зельдовича, это не было для него основным научным делом, поэтому я этого вопроса коснусь мимоходом.

За долгий период "холодной войны", которая теперь позади, нам не хватало того свободного духа научного содружества, который у нас есть сейчас. Не хватало этого и Я.Б. Зельдовичу, как и всем нам, кто был лишен опыта изучения его работ и встреч с ним лично. В этой статье мне хотелось бы кратко описать две встречи с Я.Б. Зельдовичем. А закончить я хотел бы историческими перспективами американско-советской программы по динамической физике высоких давлений.

Те из нас, кто работал над военными программами, начинали с математической работы Куранта и Фридрикса [1], но нашими основными учебниками были двухтомник Я.Б. Зельдовича и Райзера [2], американская работа Ватсона, Бонда и Велча [3], различные обзорные статьи Альтшулера [4] и Кормера [5], а в области детонации — работа Зельдовича и Компанейца [6].

На конференции Международной ассоциации развития исследований по физике и технике высоких давлений (МАРИВД)¹ в Москве в 1975 г., организованной покойным академиком Л.Ф. Верещагиным, Л.В. Альтшулер, С.Б. Кормер, А.И. Павловский и другие ученые из Арзамаса-16 впервые встретились с коллегами из США. Но только на конференции COSPAR² в Будапеште в 1980 г. я впервые имел счастье встретиться с академиком Я.Б. Зельдовичем. К этому времени Я.Б. Зельдович был целиком захвачен астрофизи-

кой. Это был период большого возбуждения в обществе с открытиями пульсаров, взрывов сверхновых, черных дыр, нейтронных звезд и других экзотических объектов, и происходили они чуть ли не ежедневно. Когда представлялся доклад по этим темам, Я.Б. Зельдович брал свои фломастеры и готовил "трансперансы". По окончании выступления быстро выходил на подиум и давал пояснения или подводил итог работы, часто указывая возможные пути для будущих исследователей. Особенно внимателен он был к молодым исследователям, только входящим в эту восхитительную новую область науки.

Я.Б. Зельдович не присутствовал на заседаниях секции геофизики высоких давлений, но я имел возможность побеседовать с ним однажды вечером в советском посольстве. Я был судьей в футбольной встрече российской и венгерской команд, где с российской стороны выступал академик Р.З. Сагдеев, который пригласил меня на прием в честь советской делегации в тот вечер в посольстве. На приеме я опять столкнулся с Я.Б. Зельдовичем. "Ах, профессор Киилер, — сказал он, протягивая руку в направлении главной улицы Будапешта. — Вон там гимназия, где учились Теллер, Винер, фон Карман, Сцилард и фон Нейманн. Какая гимназия!" Я.Б. Зельдович знал, что в то время я был сотрудником известного ученого — атомщика Эдварда Теллера и прекрасно знал вклад всех этих великих людей, хотя он был лишен возможности встретиться с ними.

Во второй и последний раз я встречался с Я.Б. Зельдовичем в Москве, в его кабинете в Институте Л.Д. Ландау. Эту встречу организовал В.Е. Фортов в июне 1986 года, и я был в Москве проездом из Киева, где как президент МАРИВД я участвовал в подготовке конференции 1987 г. Мы обсудили несколько вопросов, касающихся физики высоких давлений и детонаций, включая пути проверки гипотезы Чепмена–Жуге, и понижения температуры вещества при прохождении сильной ударной волны в молекулярном азоте.

С проведением в 1987 г. конференции МАРИВД в Киеве Исполком МАРИВД намеревался присудить академику Я.Б. Зельдовичу премию Бриджмана 1987 года. Действительно, 12 из 18 членов Исполкома хотели избрать его. В то же время тогдашний президент профессор Н. Траппеньерс решил усовершенствовать процедуру выбора и назначить комиссию из пяти ученых, чтобы представить Исполкому

Р.Н. Киилер. Научный отдел корпорации KAMAN

Статья поступила 6 марта 1995 г.

¹ МАРИВД (AIRAPT) — Международная ассоциация развития исследований по физике и технике высоких давлений, основанная в Крезе.

² Комитет по космическим исследованиям (COSPAR) — отдел Международного совета научных союзов (ICSU) в Париже.

фамилии двух ученых для голосования. Представьте себе наше удивление, когда имя Я.Б. Зельдовича не было представлено комиссией. После нескольких обсуждений я решил просить Комитет подождать два года, чтобы мы могли опять представить Я.Б. Зельдовича. В 1989 году он был бы обязательно выбран подавляющим числом голосов членов Комитета. Это решение было ошибкой, о которой я всегда буду сожалеть. Академик Я.Б. Зельдович умер 2 декабря 1987 г. Итак, вы видите, что для меня эта статья что-то средни покаянию и искуплению.

Работа в области высоких динамических давлений имеет свое происхождение от изучения развития детонации конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) и их применений. Закономерности, описывающие поведение сильных ударных волн, были впервые установлены Х. Гюгонио в 1870 г. [7], и краткое изложение основных исследований по общепринятым военным приложениям обсуждалось в отличном сборнике, изданном Бурком и Вейссом [8]. Хотя в США работы в этой области проходили в Военно-Морской Лаборатории в Вайт Оук и Баллистической Исследовательской Лаборатории в Абердине, а в Советском Союзе — в различных закрытых центрах, необходимо сказать, что перед Второй мировой войной не проводилось значительных физических экспериментов по использованию техники ударно-волновых или динамических воздействий.

Первой и наиболее значительной теоретической публикацией в США по ударным и детонационным волнам была публикация в Лос-Аламосе Ханса Бёте, которая теперь существует как раскритикованный лос-аламосский отчет [9]. Он вымостил дорогу к началу нашего понимания, как использовать детонационные и ударные волны для физических исследований. Немного позже Я.Б. Зельдович и Л.В. Альтшулер начали применять технику ударных волн для определения уравнения состояния. Большая часть этих работ началась в Арзамасе-16 в 1948 г.

Усилия США стали концентрироваться в Лос-Аламосе под руководством Роя Горансона, а после 1952 г. возглавлялись Дж. М. Уолшем и впоследствии Р.В. Маккином. Лос-аламосская группа сначала делала упор на эффектах высоких давлений и установления фазовых переходов и упруго-пластических явлений по уравнению состояния [10, 11]. Они были первыми, кто ясно понял природу изэнтропического нагружения. Ливерморская группа начала основную работу под руководством доктора Б. Дж. Альдера в 1956 г., который первым в США ясно понял широту научных возможностей работы в области высоких динамических давлений [12]. Эту группу возглавлял Р.Е. Дафф с 1961 по 1968 гг., и под его руководством эта группа начала выдавать научные результаты высшей пробы. Они были первыми, кто применил лазерную спектроскопию, импульсное рассеяние гамма лучей, ударное размагничивание, изучение уравнений состояния и измерение проводимости материалов в геофизике [13]. Эта же группа изучала процессы металлизации конденсированного водорода и определила, что металлизация происходит при давлении порядка 2 Мб [14], что было подтверждено облетами Юпитера и Сатурна. Однако в 1975 г. эта группа стала заниматься довольно рутинными измерениями термодинамики, и с отъездом Дж. Шанера в Лос-Аламос в 1979 г. группа ограничилась изучением сжиженных газов. Они также инициировали несколько спорных программ, таких как попытка доказать, что вещество может испытывать понижение температуры после приложения очень сильных ударных волн³ [15], и сотрудничество с Калифорнийским институтом технологии в попытке (не увенчавшейся

успехом) определить температуру плавления железа и его сплавов с помощью ударно-волновых температурных измерений⁴ [16–18]. Вопрос охлаждения под действием ударных волн, что, в общем-то, противоречит интуиции (см., к примеру, работу Бёте [9]) и создает некие аномалии в PV -диаграмме (пересечение изотерм, изэнтропы, лежащие ниже адиабаты Гюгонио) мог быть обязан ошибке эксперимента [19]. Во всяком случае, не были проведены независимые эксперименты для проверки диссоциации, на которой строилось объяснение явления. Также не был проведен анализ, каким образом распределялась энергия, поглощенная этой новой степенью свободы. Как указал Я.Б. Зельдович, просмотрев эту работу: "Нет смысла предполагать новое явление, не проверенное независимо, а затем приписывать новому гипотетическому механизму все замеченные отклонения в эксперименте". В случае плавления железа аномально высокие температуры, указанные профессором Т. Аренсом, сейчас объяснены в недавней работе Брауна [20], который указал на ошибки, связанные с его экспериментом. Однако в раннем, наиболее продуктивном периоде, большей частью своего успеха эти восхитительные проекты обязаны экспериментаторскому гению Артура Митчела⁵ [21]. В то же время значительное число оригинальных теоретических работ по уравнению состояния было произведено в Ливерморе Х.К. Грабоске [22], А.К. Макмаоном, Ф.Дж. Роджерсом и Ф.Х. Ри [23]. Некоторые из этих работ еще продолжают. Большинство из этих ранних работ опередило свое время, так как экспериментальное воплощение изученных состояний было сделано только 20 лет спустя. Кроме того, поскольку в США работы по достижению высоких давлений последовательным нагружением или с помощью ядерных взрывов были чрезвычайно ограничены и большей частью не опубликованы, я оставляю эту тему для обзора моим коллегам — академиком Аврорину и Фортову [24].

Касаясь неразберихи, которая произошла из попытки провести эти оптические измерения в США, вспоминается, что Я.Б. Зельдович возвращался к исследованию высоких динамических давлений дважды в своей карьере: в первый раз для того, чтобы прояснить явление электромагнитных эффектов в ударных волнах [25], и в другой раз, чтобы обеспечить своим коллегам решение проблемы некоторых аномальных измерений температур в ударных волнах [29]. Было бы прекрасно, если бы Я.Б. Зельдович мог предложить коллегам из Ливермора некоторую помощь, которой они могли бы руководствоваться, используя эти сложные оптические приборы в своих экспериментах⁶ [27].

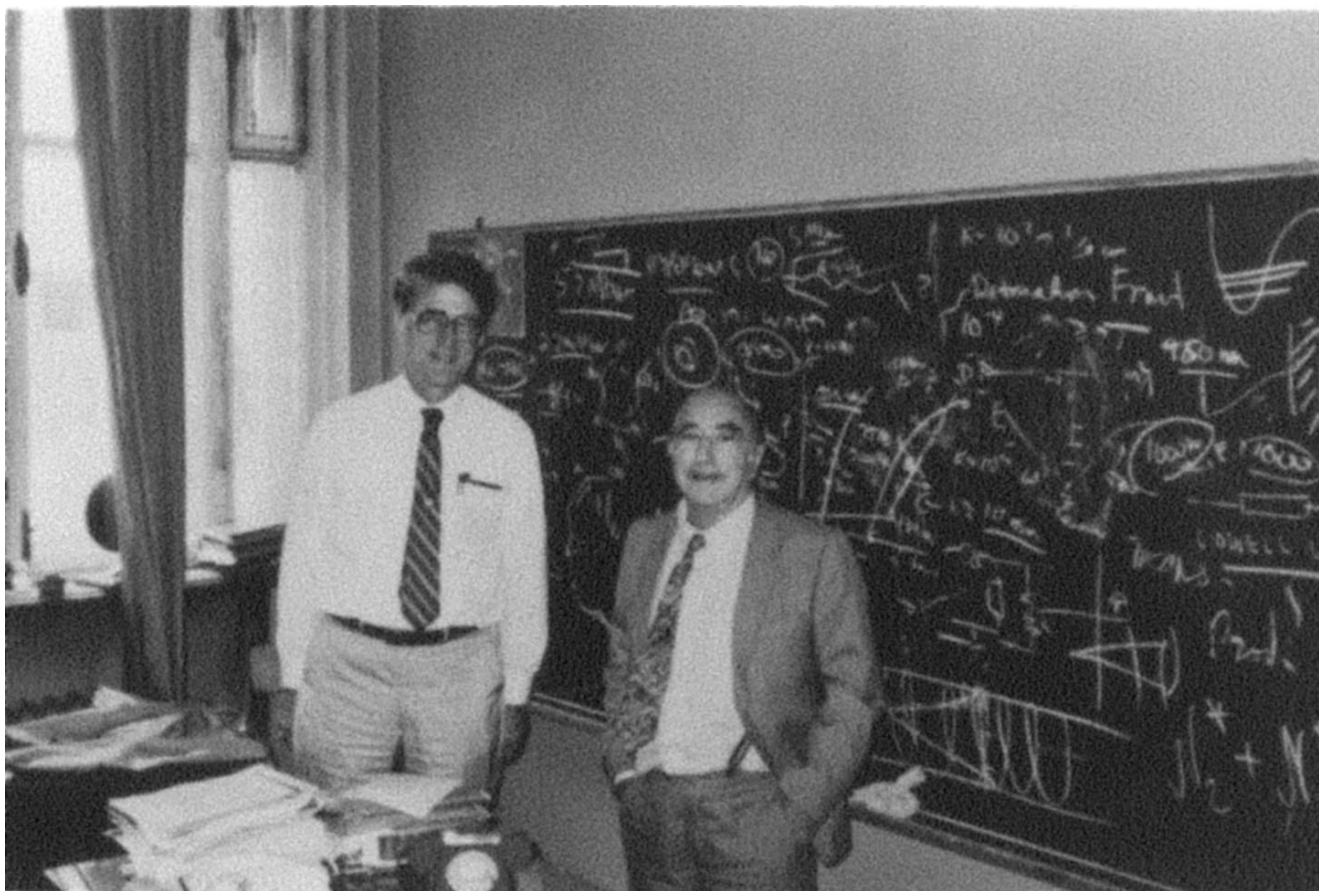
С приездом Джона Шанера в Лос-Аламос здесь началась новая эра творческой работы с экстремально сильными ударными волнами, и совместно с учеными, занимающимися статистическими высокими давлениями Шанер установил рубиновый стандарт, используемый теперь во всем мире [28]. С. Шмидт и Д. Мор продолжили работу в области лазерной спектроскопии, начатую в Ливерморе [29]. Работы над уравнением состояния и измерение скорости звука в ударносжатых твердых телах, установили давление, при котором происходит плавление железа [30] и расширили область существования алмаза в фазовой диаграмме углерода [31]. Эксперименты Шанера по "взрывающейся проволочке" обогатили наши знания в области плавления тугоплавких металлов, а также поведения жидких металлов в суперкритических объемах [32]. Другая интересная работа по

³ См., к примеру, статью М. Росса [15], пытающегося объяснить результаты этих экспериментов. Доводы вероятны для инкрементально малых ударных волн в сверхтекучем гелии в контролируемых лабораторных условиях, но не для сильных ударных волн в сильно сжатом жидком азоте по причинам здесь цитируемым.

⁴ Показано, что эти результаты несовместимы с данными, представленными Л.В. Альтшулером на конференции МАРИВД в Падерборне (Германия) в 1989 г. и впоследствии другими исследователями.

⁵ Артур Митчел усовершенствовал использование двухступенчатой легкогазовой пушки.

⁶ В некоторых последних работах, выполненных на установках Лос-Аламоса, американские исследователи, кажется, наконец пришли к здравым мыслям в этих трудных экспериментах (см. прекрасную недавнюю работу [27]).



Яков Борисович Зельдович и Норрис Киилер в Институте теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН в июне 1986 г.

ударным волнам была сделана по неустойчивости Тейлора, электронным переходам и фотонному сжатию. В 1987 г. Шанер присоединился к переговорной команде по стратегическому разоружению Департамента Энергетики США и оставил работу с ударными волнами. Программы, которые он начинал, были в конечном итоге прекращены.

Лаборатория Сандиа выпустила большое количество работ по электромагнитным эффектам, вызываемым прохождением ударных волн [33]. Они также создали широко используемый метод лазерной интерферометрии [34], а также и другие методы, которых я коснусь далее. Не так давно некоторое усилие было приложено в применении ударных волн к синтезу различных веществ, но ничего приемлемого из этого не вышло [35]. Эта группа также перестала активно работать, хотя статистические измерения высокого качества еще продолжались.

Ограниченное число работ было выполнено в университетах и Стенфордском исследовательском институте, но эти работы не были "на границе" области [36], как заметил один известный ученый.

Советская программа была всегда чрезвычайно сильной и исключительно хорошо продуманной. Сразу после Второй мировой войны Л.В. Альтшулер взял на себя лидерство в программе Арзамас-16, а вскоре стал активно работать С.Б. Кормер, ученик академика Я.Б. Зельдовича. Их интересы были взаимодополняемы, Л.В. Альтшулер исследовал прямые ударные волны, отраженные ударные волны, достижение экстремально высокого давления ступенчатым нагружением, у них было также несколько работ по проводимости [37], а С.Б. Кормер занимался исследованием оптических

эффектов [38]. Альтшулер выполнил первую работу по высокому давлению, используя систему сферических сходящихся волн высокого давления, и применение ядерных взрывов для достижения давлений в диапазоне десятков Мб [39]. Кормер был первым, кто применил пористые вещества для получения высоких температур в большом диапазоне, — метод, впервые предложенный Я.Б. Зельдовичем [40]. Работа на пористых материалах проводилась в то время на установках исследования высоких динамических давлений в Черноголовке. В 1966 г. Альтшулер оставил Арзамас-16, но продолжал исследования в ударных волнах до настоящего времени [41]. Эксперименты Кормера, проводившиеся до его смерти в 1980 г., включали большое число оптических экспериментов, многие из которых проводились совместно с академиком Я.Б. Зельдовичем. Он владел этими методами в совершенстве и был способен измерить температуры плавления щелочных металлов [42]. В этих экспериментах ему удалось показать, используя оптические методы, что промежуток диапазона уменьшения, представленный американскими учеными на основании измерения проводимости [42], был неверным и вызван ударным возбуждением электронов и дислокациями, порожденными прохождением ударной волны [44].

Большая часть работ по ударным волнам в России проводится сегодня в Черноголовке одним из учеников Я.Б. Зельдовича — академиком В.Е. Фортовым и его талантливыми коллегами. В.Е. Фортов уникален, чем-то аналогичен П.В. Бриджману в создании совершенно новой области физики — динамической физики плотной плазмы. В течение многих лет существовало мнение, что некоторые состояния

плазмы не могут быть получены экспериментально; это были экстремально плотные состояния, вплоть до состояния критической плотности и температуры до нескольких электрон-вольт. Используя методы ударно-волнового сжатия посредством высокоскоростных ударников до детального изучения изэнтроп расширения путем регистрации давления расширения в сочетании с измерениями электропроводимости и спектроскопическими методами, а также экспериментами в районе сотен Мб, используя ядерные взрывы, В.Е. Фортов открыл обширную перспективу *PV*-пространства, прежде неисследованного, и обеспечил новое поколение теоретиков результатами экспериментов, о которых они ранее и не мечтали [45]. Один известный в США ученый в области ударных волн сказал, что "он опередил исследования в области ударных волн на ближайшие 10 лет".

Неужели исследования в области ударных волн насыщаются? Судя по работам, продолжающимся появляться в России, вовсе нет. Но рассмотрим другие возможные работы — работы на границах науки, которые пока не могут быть выполнены методом алмазных наковален, широко применяемых сейчас. Одна из нерешенных пока проблем — это доказательство гипотезы Чепмена–Жуге. Это требует непосредственного измерения скорости звука в продуктах детонации. А относительно фазовой диаграммы углерода? Работа над этой проблемой, начавшаяся вплотную в Лос-Аламосе в 1980-е годы и показавшая, что линия плавления алмаза имеет положительный наклон на *P–T*-диаграмме (открытие, которое полностью изменило наш взгляд в этом вопросе), уже несколько лет как прекращена. Является ли жидкая фаза, находящаяся в равновесии с алмазом, проводящей или изолирующей? И если она может быть и тем, и другим, то является ли фазовый переход между двумя этими жидкими состояниями переходом первого рода? Линия плавления железа была определена, но только по принципу Гюгонио. Определение наклона этой линии могло помочь установить существование (или отсутствие) тройной точки ϵ -железо, γ -железо, жидкость. Этот вопрос изучается сейчас с помощью "динамических" экспериментов, проводящихся на алмазных наковальнях. Аммоний и вода были преобразованы в полностью ионизированные плотные жидкости. Когда они переходят в металлическое состояние? Остроумные эксперименты Шанера на взрывающихся проволоках могут определить поверхностное натяжение и вязкость в тугоплавких металлах. Вязкость сильно сжатых жидкостей и плазм также может быть определена. Многие геофизические измерения также могут быть проведены. Это только некоторые из областей, подлежащих исследованию.

В Соединенных Штатах сужаются возможности проведения экспериментов такого типа. Ведущие ученые уходят, нет научного руководства, лаборатории сокращают работы этого типа и делается акцент на конверсионные проблемы. Итак, в заключение я могу отметить, что в богатом наследстве академика Я.Б. Зельдовича — сильная и продуктивная исследовательская программа по физике высоких динамических давлений в России. А я жду нового лидерства и будущего возвращения США к активной программе в этой области.

Список литературы

- Courant R, Friedrichs K O *Supersonic Flow and Shock Waves* vol. 1 (New York: Interscience Publishers, Inc., 1948) p. 121
- Zeldovich Ya B, Raizer Yu P *Physics of Shock Waves and High Temperature Hydrodynamic Phenomena* vols. 1, 2 (New York: Academic Press, 1968)
- Bond J W, Watson K M, Welch J A *Atomic Theory of Gas Dynamics* (Massachusetts: Addison-Wesley, Reading, 1965)
- Альтшулер Л В *УФН* **85** 197 (1965)
- Кормер С Б *УФН* **94** 641 (1967)
- Zeldovich Ya B, Kompaneets A S *Theory of Detonation* (New York: Academic Press, 1960)
- Hugoniot H *Journ. de l'ecole polytechnique* **58** 1 (1889)
- Shock Waves and the Mechanical Properties of Solids* (Eds J J Burke, V Weiss) (Syracuse, New York: Syracuse University Press, 1971)
- Bethe H A *Theory of Shock Waves for an Arbitrary Equation of State* Office of Scientific Research and Development Report No. 545 (1942) Washington, DC. See also, Weyl H *Shock Waves in Arbitrary Fluids* NDRC Applied Math. Panel Note No. 12, New York University No. 46 (1944) and NDRC work by J von Neumann, R Courant and K O Friedrichs
- Rice M H, McQueen R W, Walsh J M *Solid State Physics* **6** 1 (1958)
- McQueen R W *Metallurgy at High Pressure and Temperatures* (Eds K A Gschneider et al.) (New York: Gordon and Breach, 1964) p. 44
- Alder B J *High Pressure Physics* (Eds W Paul, D Warschauer) (New York: McGraw Hill, 1963) p. 385
- Keeler R N, Royce E B *Proc. of the International School of Physics "Enrico Fermi"* Course XLVII, Physics of High Energy Density (Eds P Caldirola, H Knoepfel) (New York: Academic Press, 1971) p. 51
- Hawke R S et al. *Phys. Rev. Lett.* **41** 994 (1978)
- Ross M *High Pressure Research* **5/6** 649 (1992)
- Brown M, McQueen R G *J. Geophys. Res.* **91** 7485 (1986)
- Bass J D et al. *Science* **236** 181 (1987)
- Ahrens T J et al. *High Pressure Research* **2** 145 (1990)
- Mitchell A C частное сообщение
- Brown J M "High Pressure Iron Under Heated Debate", in *Deep Earth Dialog* No. 7 SEDI News Letter, Fall 1993, p 5
- Mitchell A C et al. *Shock Waves in Condensed Matter — 1981. AIP Conference Proceeding No. 78* (Eds W J Nellis et al.) (New York: American Institute of Physics, 1982) p. 184
- Graboske H C, Grossman A S *Astrophys. J.* **170** 363 (1971); Graboske H C *Astrophys. J.* **135** 599 (1972)
- McMahan A K *Physica* **139/140 B** 31 (1986); Ree F H, van Thiel M *Shock Compression of Condensed Matter 1991* (Amsterdam: North-Holland, 1992) p. 225; Rogers F J *Phys. Rev. A* **24** 1531 (1981)
- Авrorин Е Н, Водолага Б К, Симоненко В А, Фортов В Е *УФН* **163** (5) 2 (1993)
- Zeldovich Ya B *Sov. Phys. JETP* **26** 159 (1968)
- Zeldovich Ya B et al. *Sov. Phys. JETP* **28** 855 (1969)
- Boness D A, Brown J M *Phys. Rev. Lett.* **71** 2931 (1993)
- Shaner J W et al. *High Pressure Science and Technology* **1** (New York: Plenum Press, 1979) p. 739
- Schmidt S C, Moore D S, Shaner J W *Phys. Rev. Lett.* **50** 661 (1983); Schmidt S C, Young D S *Accounts of Chemical Research* **25** 427 (1992)
- Brown J M *Science* **262** 529 (1993)
- Shaner J W et al. *J. de Phys. Coll.* (8) 8 (1984)
- Hixson R S, Winkler M A, Shaner J W *Proc. 9th Symposium on Thermophysical Properties* (Colorado: Boulder, 1985)
- Neilson F W *Bull. Am. Phys. Soc.* **2** 302 (1957)
- Barker L M *Behavior of Dense Media under High Dynamic Pressure* (New York: Gordon and Breach, 1968) p. 483
- Graham R A [21] pp. 4, 42, 52, 67, 72, 77, 82, 277, 390
- Teller E [14], p. 2, комментарии к статье "Shock Waves in Condensed Media"; Duvall G E [14] p. 7
- Альтшулер Л В и др. *ЖЭТФ* **34** 874 (1958)
- Altshuler L V et al. *Sov. Phys. JETP* **12** 10 (1961)
- Трунин Р Ф и др. *ЖЭТФ* **62** 1043 (1972)
- Korner S B et al. *Sov. Phys. JETP* **15** 1447 (1962)
- Altshuler L V *Shock Compression of Condensed Matter — 1991* (Eds S C Schmidt et al.) (Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992) p. 3
- Кормер С Б и др. *ЖЭТФ* **48** 1033 (1965)
- Alder B J, Christian R H *Discussions Faraday Soc.* **22** 44 (1956)
- Кормер С Б и др. *ЖЭТФ* **49** 135 (1966)
- Фортов В Е *УФН* **138** 381 (1982)