

УДАРНОЕ СЖАТИЕ КВАРЦА

Г. А. Ададуров, А. Н. Дрежин, С. В. Першин,
В. Н. Родионов, Ю. Н. Рябинин

(Москва)

Известно, что в коре земного шара содержится очень много кремнезема. Он является основным породообразующим минералом. Большое количество кремнезема находится, очевидно, и в верхней мантии нашей планеты. Физическое состояние кремнезема, имеющее место на разных глубинах, может оказывать существенное влияние на различные процессы, происходящие в Земле. Поэтому изучение таких свойств, как, например, сжимаемость кремнезема при высоких давлениях и температурах, представляет непосредственный интерес для геофизики.

При атмосферном давлении SiO_2 имеет ряд состояний от аморфного — лешательерита с плотностью 2.20 г/см^3 , до кристаллического — кварца с плотностью 2.65 г/см^3 . При высоких давлениях и температурах многие вещества испытывают полиморфные превращения, переходя в более плотные модификации. Поэтому были предприняты поиски и более плотных форм SiO_2 при высоком давлении и температуре. Они увенчались успехом: в 1953 г. была открыта кристаллическая форма кремнезема — коэсит, имеющая плотность 3.01 г/см^3 . Этот минерал был получен [1] при статическом сжатии до давления $35\,000 \text{ кг/см}^2$ и температуре $500\text{—}800^\circ \text{C}$.

Дальнейшие исследования показали [2], что коэсит может быть получен непосредственно из кварца без применения каких-либо минерализаторов при статических давлениях $90\,000 \text{ кг/см}^2$ и температурах 2000°C .

Однако в то время среди природных образований коэсит был неизвестен. Его начали искать и обнаружили в трех крупных метеоритных кратерах, имеющих, вероятно, ударное происхождение [3–5]. Пока коэсит в природных условиях больше нигде не обнаружен. Это заставило предположить, что упомянутый коэсит образовался при высоких давлениях и температурах, возникших при ударе метеорита о песчаный грунт в момент его столкновения с Землей. Но для того чтобы однозначно установить, что коэсит мог образоваться именно так, а, скажем, не при тектонических или вулканических процессах, необходимо было доказать возможность его образования на очень малые времена действия высоких давлений и температур.

В 1961 г. была открыта новая плотная модификация окиси кремния [6], имеющая плотность 4.35 г/см^3 , которая образуется при статическом сжатии кварца до давлений $160\,000\text{—}180\,000 \text{ кг/см}^2$ при температуре $1200\text{—}1400^\circ \text{C}$.

Задачей предлагаемой работы являлись исследование сжимаемости кварца под действием сильной ударной волны и выяснение возможности образования плотных форм кремнезема при кратковременном ударном сжатии кварца. Для осуществления задачи необходимо было измерить ударную адиабату кварца и найти значения изменения его объема в зависимости от давления сжатия. Кроме того, представляло интерес исследовать роль анизотропии при ударном сжатии ориентированно вырезанных кристаллов кварца.

В качестве объекта исследования использовались пластинки кварца (горного хрусталя), вырезанные из кристалла параллельно и перпендикулярно оптической оси, и дробленый горный хрусталь с размером частиц $50\text{—}100 \text{ мк}$.

Определение ударной адиабаты проводилось методом отражения [7,8]. В этом методе ударные волны известной амплитуды из экранов с известными ударными адиабатами переходят в исследуемые образцы. При этом для определения точки ударной адиабаты в исследуемом образце достаточно измерить только скорость фронта ударной волны. В данной работе экраны изготовлялись из алюминия и железа. Ударная адиабата

алюминия

$$D = 5.25 + 1.39 u \quad (1)$$

заимствована в работе [9], а ударная адиабата железа

$$D = 4.0 + 1.58 u \quad (2)$$

построена по данным работ [10, 11].

В уравнениях (1) и (2) через D обозначена скорость фронта, а через u — массовая скорость за фронтом ударной волны в км/сек. Ударные волны в исследуемых образцах создавались отражением различных детонационных волн от экранов, а также ударами пластин из алюминия и железа, разогнанными продуктами взрыва. Базы измерения скоростей ударных волн составляли 4—8 мм. Во всех экспериментах использовались образцы с отношением ширины к высоте больше трех. Регистрация временных интервалов проводилась электроконтактным методом [8] одновременно четырьмя осциллографами ОК-15М. Точность отсчета времени $\pm 5 \cdot 10^{-9}$ сек. Средняя относительная ошибка из восьми отдельных измерений скорости ударной волны меньше $\pm 1\%$.

Полученные экспериментальные данные представлены в таблице. Для каждой точки ударной адиабаты даны скорость фронта D и массовая скорость u за фронтом ударной волны, давление p и объем V ударного сжатия, φ — процентное содержание парафина в смесевых образцах и ρ_0 — начальная плотность смеси. Во втором столбце таблицы приведены значения массовых скоростей u' в экранах.

Рассмотрим общий характер деформирования кварца при одноосном сжатии. Кварц при температуре ниже 573°C и атмосферном давлении образует кристаллы, которые относятся к ромбоэдрической системе. Его упругие свойства характеризуются шестью константами [12]. Воспользуемся прямоугольной системой координат с осью z , направленной вдоль оптической оси кварца и осью x — вдоль электрической оси; тогда уравнения упругости можно представить в виде [13]

$$\sigma_{ik} = \lambda_{lmik} u_{lm} \quad (3)$$

Здесь σ_{ik} и u_{lm} — тензоры напряжения и деформации; при этом адиабатические модули упругости будут иметь значения

$$\begin{aligned} \lambda_{xxxx} &= \lambda_{yyyy} = 85.4 \cdot 10^{10} \text{ дин} / \text{см}^2 \\ \lambda_{zzzz} &= 105.6 \cdot 10^{10} \text{ дин} / \text{см}^2 \\ \lambda_{xxyy} &= 7.3 \cdot 10^{10} \text{ дин} / \text{см}^2 \\ \lambda_{zzxx} &= \lambda_{zzyy} = 14.4 \cdot 10^{10} \text{ дин} / \text{см}^2 \\ \lambda_{yzxx} &= -\lambda_{yzyy} = 16.8 \cdot 10^{10} \text{ дин} / \text{см}^2 \\ \lambda_{yzyz} &= \lambda_{xzxz} = 57.5 \cdot 10^{10} \text{ дин} / \text{см}^2 \\ \lambda_{xyxy} &= \frac{1}{2} (\lambda_{xxxx} - \lambda_{xxyy}) \end{aligned} \quad (4)$$

Остальные λ_{lmik} равны нулю.

Рассмотрим сжатие кристалла кварца по одной из главных осей в случае, когда поперечное расширение исключено (сжатие пластины). Будем при этом предполагать, что никаких полиморфных превращений с кварцем не происходит.

Проследим ход изменения объема при сжатии по оси z . Пока речь идет о качественном характере зависимости удельного объема от напряжения, не имеет смысла различать адиабаты Пуассона, Гюгоньо и изотерму.

При малых напряжениях зависимость изменения относительного объема от приложенного напряжения может быть аппроксимирована законом Гука $\sigma_{zz} = \lambda_{zzzz} u_{zz}$.

При больших напряжениях наблюдаются заметные отклонения от закона Гука. Оказалось [14], что это отклонение соответствует линейному росту модулей упругости с напряжением.

В пределах упругого деформирования среды (хотя и нелинейного) нормальные напряжения на боковых площадках растут пропорционально σ_{zz} , так что

$$\frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{zz}} = \frac{\sigma_{yy}}{\sigma_{zz}} = \frac{\lambda_{xxzz}}{\lambda_{zzzz}} = a \quad (a \leq 1)$$

Это значит, что с ростом σ_{zz} пропорционально увеличиваются и сдвигающие напряжения в плоскостях, наклоненных к оси z . При достижении определенных сдвигающих напряжений образуются плоскости скольжения, что приводит к необратимому пластическому изменению формы. При этом ориентация кристаллографических осей не изменяется. Если предположить, что упрочнение материала не происходит (схема идеальной пластичности), то условие пластичности применительно к рассматриваемой задаче можно записать так:

$$\sigma_{zz} - \sigma_{xx} = b \quad (b = \text{const})$$

Из последнего соотношения видно, что по мере повышения σ_{zz} за пределом упругости ($\sigma_{zz}^s = b / (1 - a)$), отношение $\sigma_{xx} / \sigma_{zz}$ асимптотически стремится к единице.

Это значит, что сдвигающими напряжениями внутри тела можно пренебречь по сравнению с нормальными и рассматривать материал как жидкость. В этом случае при напряжениях, много больших предела упругости, изменение объема с ростом давления $p = -\sigma_{zz}$ будет определяться модулем всестороннего сжатия K .

Следует отметить, что в точке перехода от упругости к пластичности кривая диаграммы сжимаемости имеет излом, так как производная $V d\sigma_{zz} / dV$ уменьшается скачком от λ_{zzzz} до K . Например, при нормальных условиях

$$K_0 = 38 \cdot 10^{10} \text{ дин} / \text{см}^2, \quad \lambda_{zzzz}_0 = 105.6 \cdot 10^{10} \text{ дин} / \text{см}^2$$

Все изложенное выше иллюстрируется графиком (фиг. 1), на котором схематически показана диаграмма сжимаемости кварца по оси z . Буквой s обозначен предел упругости, буквой b условно обозначено состояние, при котором можно пренебречь различие главных нормальных напряжений и считать тело жидким.

Чем меньше предел упругости, тем ниже давления, при которых материал можно считать «жидким». Устремляя σ_{zz}^s к нулю, получим пунктирную кривую, показанную на диаграмме сжатия. Очевидно, что эта кривая соответствует также всестороннему сжатию кварца, помещенного в жидкости, так как и в этом случае сдвигающие напряжения в теле кристалла отсутствуют.

Диаграмма сжатия по другим главным осям будет иметь аналогичный вид, а при высоких давлениях $p \gg -\sigma^s$ они должны сливаться между собой.

Из приведенных соображений очевидно, что наблюдать различное ударное сжатие по разным осям анизотропного кристалла можно только при скачке нормального напряжения на ударном фронте, ненамного превышающего предел упругости. Этим объясняется отрицательный результат попытки авторов работы [15] обнаружить различие в сжимаемости

сильно анизотропного вещества — цинка при ударном сжатии его до давлений $20 \cdot 10^{10}$ бар и $41.4 \cdot 10^{10}$ бар. Конечно, эти давления намного превосходят предел упругости цинка по любой из его осей.

Приводим результаты измерений скоростей ударной волны в кварце $D_{\parallel}$ — вдоль оптической оси и $D_{\perp}$ — поперек оптической оси для трех значений массовой скорости u' в алюминиевом экране

u' км/сек =	1.0	1.43	1.98
$D_{\perp}$ км/сек =	6.04	6.04	6.07
$D_{\parallel}$ км/сек =	7.05	6.93	7.16

Опыты по определению $D_{\perp}$ проводились на образцах, вырезанных из горного хрусталя и искусственного кварца. При этом значения скоростей получались одинаковыми.

Приведенные результаты удобно интерпретировать, опираясь на диаграмму сжатия кварца, приведенную на фиг. 1.

Во фронте ударной волны деформация материала происходит только в направлении распространения. Поэтому ход зависимости деформации от напряжения в ударной волне (адиабата Гюгонио) должен быть качественно подобен приведенной выше кривой одноосного сжатия кварца (фиг. 1).

Скорость ударной волны может быть определена по формуле

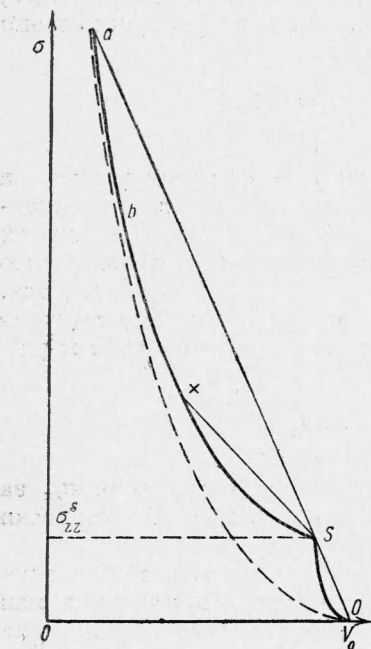
$$D = V_0 \sqrt{-\frac{\Delta\sigma}{\Delta V}} \quad (5)$$

где V_0 — начальный удельный объем, $\Delta\sigma$ и ΔV — изменение нормального к фронту напряжения и изменение удельного объема на фронте ударной волны.

Обращаясь к диаграмме сжатия (фиг. 1), видим, что скорость волны определяется наклоном прямой, соединяющей начальную точку ($V_0, 0$) и точку, соответствующую амплитуде волны (V, σ). Проведя прямую через точку (V^s, σ^s) до пересечения с верхней ветвью диаграммы в точке a , разобьем кривую сжатия на три участка. В упругой области ($\sigma < \sigma^s$) производная $d^2\sigma / dV^2 > 0$ и поэтому волна способна формировать и сохранять ударный фронт. Скорость распространения волны в этой области будет расти с увеличением амплитуды волны.

В диапазоне $\sigma^a > \sigma > \sigma^s$ волна, первоначально имевшая ударный фронт, должна разваливаться на две волны, бегущие одна за другой. С большей скоростью вперед будет уходить ударная волна с амплитудой $\sigma = \sigma^s$. Назовем ее упругой ударной волной. За ней будет следовать пластическая ударная волна, скорость которой зависит от амплитуды. Скорость упругой волны будет определяться наклоном прямой, соединяющей точки O и S , скорость пластической волны, бегущей по веществу, сжатому первой волной, определяется наклоном прямой, соединяющей точку S и x . При напряжении, соответствующем точке a , скорости обеих волн сравняются, и, наконец, в области $\sigma > \sigma^a$ будет распространяться опять одна ударная волна.

Таким образом, если метод позволяет регистрировать скорость фронта, то в области $\sigma^a > \sigma > \sigma^s$ будет фактически измеряться постоянная ско-



Фиг. 1

рость ударной волны с амплитудой σ^s , поэтому в описываемых опытах при сжатии образцов вдоль оптической оси регистрировалась постоянная скорость $D_{\parallel} \approx 7.05$ км/сек до давлений в ударной волне $p_e \approx 62 \cdot 10^{10}$ бар (фиг. 2), а при сжатии образцов поперек оптической оси постоянная скорость $D_{\perp} = 6.05$ км/сек регистрировалась до давлений $p_q \approx 40 \cdot 10^{10}$ бар.

Существенно отметить, что обе скорости заметно больше звуковых скоростей в кварце при нормальных условиях. Если воспользоваться данными Бриджмена [14], то можно оценить максимальную амплитуду σ^s упругой ударной волны в кварце.

Приводим оценочные значения скоростей ударной волны в кварце для некоторых значений σ . Вычисления проведены по данным Бриджмена [14]

$\sigma \cdot 10^{-10}$ бар =	0	1	2	3
$D_{\parallel}$ км/сек =	6.30	6.50	6.75	7.00
$D_{\perp}$ км/сек =	5.76	5.85	6.00	6.25

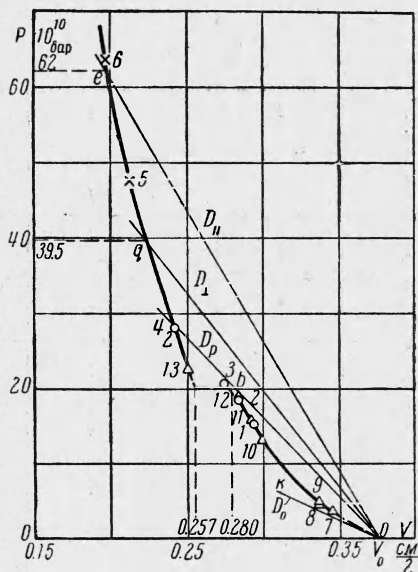
Сравнивая эти данные с результатами измерений, приходим к выводу, что предел упругости кварца при одноосном сжатии (без поперечного расширения) в ударной волне достигает значений $\sigma^s \approx 2-3 \cdot 10^{10}$ бар. Столь высокое значение предела упругости делает чрезвычайно затруднительным исследование сжимаемости кварца в ударной пластической волне путем измерения скорости ее фронта. Только при очень высоких давлениях, когда скорость ударной волны оказывается выше скорости упругой волны, удается получить указанным способом точки на адиабате Гюгонио.

Для получения ударной адиабаты кварца ниже давлений p_e и p_q был использован метод определения ударных адиабат дисперсных веществ [16]. Суть метода состоит в исследовании ударного сжатия смеси кварца и парафина с последующим расчетом сжимаемости кварца. Очевидно, что упругая волна может распространяться по частицам кварца и в смеси, но она затухает в окружающем их слое парафина и не оказывает влияния на параметры ударной волны, которые определяются только суммарной сжимаемостью компонентов, т. е. определенному сжатию смеси соответствуют определенные D , u и p . Знание ударной сжимаемости смеси и отдельно ударной сжимаемости парафина позволяет рассчитать удельный объем V ударносжатого кварца. Для определенных таким образом значений p и V приведены значения D и u в кварце, рассчитанные по известным формулам

$$D = V_0 \sqrt{\frac{p}{V_0 - V}}, \quad u = \sqrt{p(V_0 - V)} \quad (6)$$

Предварительные данные по исследованию ударного сжатия кварцевого песка этим методом (до давлений $\approx 20 \cdot 10^{10}$ бар), а также ударная адиабата парафина, необходимая для расчетов, приведена в работе [16].

Экспериментальные данные представлены в p, V координатах на фиг. 2, где крестиком обозначены точки 5 и 6, соответствующие данным, по-



Фиг. 2

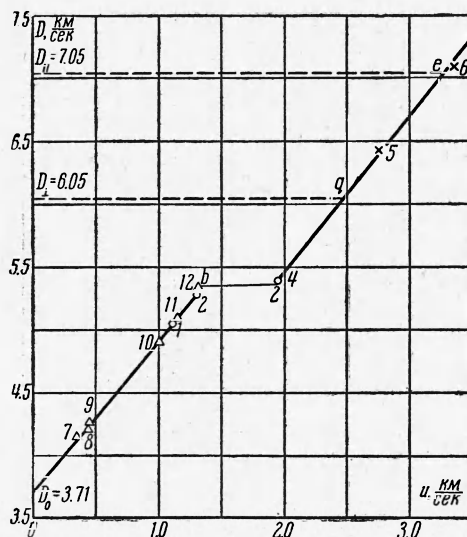
Таблица

Экран	Кварц-парафин						Кварц				
	u' , км/сек	Φ , %	ρ_0 , г/см ³	D , км/сек	u , км/сек	$P \cdot 10^{-10}$, бар	№ точки	D , км/сек	u , км/сек	$P \cdot 10^{-10}$, бар	V , см ³ /г
Al	1.23	25.5	1.78	5.24	1.60	14.9	1	5.05	1.12	14.9	0.294
Al	1.43	25.5	1.78	5.57	1.85	18.3	2	5.27	1.31	18.3	0.284
Al	1.54	23.3	1.83	5.68	1.97	20.5	3	—	—	20.5	0.274
Al	1.98	25.5	1.78	6.12	2.54	27.7	4	5.39	1.95	27.7	0.242
Fe	1.92	—	—	—	—	—	5	6.43	2.77	47.4	0.214
Al	3.00	—	—	—	—	—	6	7.08	3.37	63.3	0.198

лученным на образцах, вырезанным из кристалла параллельно оптической оси; кружком — точки 1—4, полученные смесевым способом с дробленым горным хрусталем; треугольником — точки 7—13, взятые в работе [16] и полученные смесевым способом на кварцевом песке.

Эти экспериментальные данные представлены в D , u координатах на фиг. 3. На этой фигуре обозначение точек аналогично обозначениям на фиг. 2.

В той области, где интервалы исследования перекрываются, эти данные совпадают с результатами настоящей работы, полученными с дробленым горным хрусталем.



Фиг. 3

Горизонтальные линии на графике фиг. 3, отмеченные буквами $D_{\parallel}$ и $D_{\perp}$, соответствуют значениям скоростей упругих ударных волн в кристалле кварца с амплитудой на фронте σ^* .

Как видно из графика фиг. 3, в поведении кварца наблюдаются две четко разграниченные области. Это изменение следует приписать его фазовому превращению. По эмпирической зависимости D от u до фазового превращения

$$D = 3.71 + 1.21 u \quad (7)$$

подобрана зависимость p от V_0/V

$$p = 9.12 \cdot 10^{10} \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^4 - 1 \right] \text{ бар} \quad (8)$$

Эта зависимость справедлива до давлений $p_s = 20.0 \cdot 10^{10}$ бар.

Для давлений, больших давления p_s , соответствующего адиабате Гюгонио, зависимости не подбирались.

В смесевом методе, когда сжатие кварцевых частичек осуществляется давлением в парафине, кристаллики кварца испытывают всестороннее сжатие. При этом, как уже говорилось выше, в кристалле не возникают сдвигающие напряжения. Таким образом, удается осуществить довольно экзотический случай сжатия твердого тела, когда оно даже при малых давлениях в ударной волне сжимается всесторонне, как жидкость. Никакого проявления анизотропии при этом естественно ожидать нельзя, отсутствует также и характерный для твердого тела переход из упругого в пластическое состояние, связанный с образованием плоскостей скольжения. Адиабата ударного сжатия в этом случае соответствует пунктирной кривой на диаграмме сжимаемости (фиг. 1). Знание этого участка

адиабаты весьма важно. Напомним, что в случае одноосного сжатия только при $\sigma \gg \sigma^s$ кривая сжимаемости сближается с кривой, соответствующей всестороннему сжатию.

Полученная при помощи смесового метода адиабата ударного сжатия кварца в координатах (D, u) при $u = 0$ должна давать значение D_0 , которое выражается через модуль всестороннего сжатия как скорость звука

$$D_0 = \left[\frac{K_0}{\rho_0} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{3.8 \cdot 10^{10}}{2.65} \right]^{\frac{1}{2}} = 3.78 \cdot 10^5 \frac{\text{см}}{\text{сек}} \quad (9)$$

Определенная в опытах величина D_0 практически совпадает с вычисленной, она равняется $3.71 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$ (уравнение (7)). Следует отметить, что в области давлений, соответствующих участку $\epsilon - \gamma$ на фиг. 2 и 3, как показано в работах [17, 18], должна существовать конфигурация двух ударных волн, причем первая ударная волна с амплитудой p_ϵ (фиг. 2) на фронте распространяется быстрее второй ударной волны. При давлениях выше p_ϵ по веществу опять распространяется одна ударная волна, как и в области давлений до p_ϵ .

В случае, если измерениям не мешает упругая волна, в образцах, подверженных давлению, соответствующему области $\epsilon - \gamma$, экспериментально должна измеряться скорость первой ударной волны, вследствие чего участок $\epsilon - \gamma$ не может быть определен прямым измерением волновых скоростей.

Нетрудно заметить, что эти соображения полностью аналогичны соображениям, приведенным выше для объяснения данных таблицы, с той лишь разницей, что там впереди ударной волны распространялась упругая волна, а в этом случае обе волны ударные.

Если ударную волну с амплитудой, соответствующей области $\epsilon - \gamma$, пустить по кварцу, она распадается на три волны. Впереди будет распространяться упругая волна с амплитудой σ^s , за ней ударная волна с амплитудой p_ϵ и затем третья волна с избыточным над p_ϵ давлением.

Смесовым методом, использованным в настоящей работе, можно определить кривую ударного объемного сжатия любой формы, так как в этом методе непосредственно определяются p и V . Как уже отмечалось выше, по полученным значениям p и V можно рассчитать величины D и u , однако это нужно делать с учетом хода p, V кривой.

Очевидно, что для области $\epsilon - \gamma$ недопустимо рассчитывать D и u в предположении, что распространяется одна ударная волна. В этом предположении прямая, связывающая начальное и конечное состояния, пересечет ударную адиабату два или три раза, что приведет к абсурдному положению, когда одной скорости ударной волны соответствуют два или даже три состояния вещества за ее фронтом. Формальный расчет для области кривой $\epsilon - \gamma$ дает значения скоростей ударной волны меньше D , соответствующего ударной волне с амплитудой p_ϵ .

Из приведенных в таблице результатов точка 3 попадает в область $\epsilon - \gamma$, и поэтому значение D для нее не приведено. По этой же причине не следовало рассчитывать D для точки с давлением выше $20 \cdot 10^{10} \text{ бар}$ из работы [16] и обозначенной на фиг. 2 под номером 13. Естественно, что точки 3, 13, изображенные на фиг. 2, отсутствуют на фиг. 3. Из рассуждений, приведенных выше, становится более понятным вывод работы [16] о справедливости определения объемного ударного сжатия смесовым методом. Очевидно, что смесовой метод будет давать результаты, аналогичные результатам, полученным на цельных образцах при давлениях выше давлений, соответствующих точке b (фиг. 1), т. е. при давлениях, когда исчезает различие между объемным и одноосным сжатием материала.

Вернемся к фазовому превращению кварца. Можно предположить, что фазовое превращение в ударных условиях происходит через одно-

временное возникновение в объеме большого количества центров образования новой фазы. Если новая фаза кристаллическая, то направление осей кристалла в этих условиях, по отношению к осям кристалла исходного вещества, может быть самое разнообразное в силу хаотического характера возникновения самих центров. Поэтому после фазового превращения материал, по-видимому, можно считать поликристаллическим и направление, по которому сжимался начальный образец, оказывается несущественным.

Обнаруженное фазовое превращение можно считать превращением кварца в коэсит, так как изменение плотности, происходящее при давлении $p_s = 20.0 \cdot 10^{10}$ бар (между точками h и b $\Delta \rho = 0.32$ г/см³), близко к разнице плотностей коэсита и кварца при нормальных условиях ($3.01 - 2.65 = 0.36$ г/см³). Естественно, что точного равенства ожидать нельзя, так как сравниваемые разности плотностей берутся при различных давлениях и температурах.

Температура T при давлении, соответствующем началу фазового превращения, получена решением дифференциального уравнения

$$\frac{dT}{dV} + \frac{T}{C_V} \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V = \frac{1}{C_V} \left[\frac{dE}{dV} + p \right] \quad (10)$$

где dE — изменение внутренней энергии кварца при ударном сжатии.

При решении уравнения коэффициент Грюнайзена был принят постоянным и рассчитан из начальных данных по формуле

$$\gamma_0 = \frac{\alpha V_0}{C_V \kappa} \quad (11)$$

где α — коэффициент объемного термического расширения, κ — коэффициент сжимаемости, C_V — удельная теплоемкость при постоянном объеме. Значения всех этих величин при нормальных условиях заимствованы в работе [12]. Полученное в результате расчета $\gamma_0 = 0.675$. Так как теплоемкость зависит от температуры, расчет последней проводился методом последовательного приближения. Теплоемкость выбиралась средней для интервала температур от 300° К и конечной температуры. Рассчитанная указанным образом температура в начале фазового превращения равна $\approx 300^\circ$ С.

Приведенные в данной работе соображения относительно упругой ударной волны необходимо учитывать в экспериментах по ударному сжатию кристаллических тел при помощи методов, основанных на регистрации волновых скоростей. Неучет этих соображений может привести к ошибке, которая, по-видимому, была допущена в работе [19]. В этой работе исследовалась ударная сжимаемость двух основных горных пород: дунита и габбро. Для габбро интервал исследования охватывает область от $15 \cdot 10^{10}$ бар до $75 \cdot 10^{10}$ бар. При этом обнаружено, что приблизительно до $30 \cdot 10^{10}$ бар в габбро регистрируется постоянная скорость волны, около 5.9 км/сек. Основываясь на том факте, что скорость упругой волны в габбро при нормальных условиях ≈ 5.35 км/сек, т. е. меньше 5.9 км/сек, авторы работы [19] утверждают, что они обнаружили полиморфное превращение габбро. Если бы до давлений $15 \cdot 10^{10}$ бар были зарегистрированы ударные волны со скоростями меньше 5.9 км/сек, это подтвердило бы вывод авторов [19] и определило давление, при котором начинается полиморфное превращение габбро. Однако ниже этого давления экспериментальных данных в работе [19] не приведено.

На самом деле, очевидно, в габбро, так же как и в кварце, на кривой сжимаемости существует нелинейный упругий участок, так что с ростом напряжения до σ^* скорость упругой ударной волны будет расти. Поэтому 5.9 км/сек, по-видимому, соответствует скорости упругой ударной волны с амплитудой на фронте, равной пределу упругости габбро.

В интервале до $30 \cdot 10^{10}$ бар габбро, может быть, и испытывает полиморфное превращение, но это не следует из работы [19]. В этой работе применялась фотографическая техника записи времени распространения ударной волны в исследуемом образце, причем моменты времени определялись по ярким вспышкам узких аргоновых зазоров. Авторы отмечают, что иногда габбро давали нерегулярный слабый след записи. Может

быть, слабый след получался именно из-за того, что зазор схлопывался относительно слабой упругой ударной волной, идущей впереди основной ударной волны.

В заключение авторы работы благодарят Чернышева В. М. и Коновалова Б. В. за помощь при проведении экспериментов.

После сдачи статьи в набор авторам стала известна работа Уекерли [20] по ударному сжатию кварца.

Результаты, полученные в этой работе, качественно согласуются с результатами настоящей статьи.

Поступила 19 V 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Coes L. J. A New Dense Crystalline Silica. 1953, Science, 118, 3057, 131.
2. Hall T. Ultrahigh — Pressure Research, 1958, Science, 128, 22, 445.
3. Chao E. C., Shoemaker E. M., Madsen B. M. First Natural Occurrence of Coesite, 1960, Science, 132, 220.
4. Pecoira W. T. Coesite Craters and Space Geology, 1960, Geotimes, 5, 32, 16—19.
5. Chao E. C., Fahey J. J., Litter J. Coesite from Wabar Crater, near Al Hadida, Arabia, 1961, Science, 133, 3456, 882.
6. Стишов С. М., Попова С. В. Новая плотная модификация окиси кремния. Геохимия, 1961, № 10, стр. 837.
7. Альтшулер Л. В., Крупников К. К., Бразник М. И. Динамическая сжимаемость металлов при давлениях от четырехсот тысяч до четырех миллионов атмосфер. ЖЭТФ, 1958, т. 34, стр. 886.
8. Дремин А. Н., Ададуров Г. А. Ударная адиабата мрамора. ДАН СССР, 1959, т. 128, № 2.
9. Альтшулер Л. В., Баканова А. А., Трунин Р. Ф. Фазовые превращения при сжатии воды сильными ударными волнами. ДАН СССР, 1958, т. 121, № 1, стр. 67.
10. Альтшулер Л. В., Кормер С. Б., Баканова А. А., Трунин Р. Ф. Уравнения состояния алюминия, меди и свинца для области высоких давлений. ЖЭТФ, 1960, т. 38, № 3, стр. 790.
11. McQueen R. G., March F. P. Equation of state for nineteen metallic elements from shock wave measurements to two megabars. J. Appl. Phys., 1960, 31, 7, 1253.
12. Шубников А. В. Кварц и его применение. Изд-во АН СССР, 1940.
13. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М., ГИТТЛ, 1959.
14. Bridgman P. W. Linear Compressions to 30.000 kg/cm² including relatively incompressible substances. Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, 1949, 77, 6, 187.
15. Walsh G. M., Rice M. H., McQueen R. J. and Jargen E. L. Shock wave compressions of twentyseven metals. Equations of state of Metals. Phys. Rev., 1957, 108, 2, 196—216.
16. Дремин А. Н., Карпунин И. А. Метод определения ударных адиабат дисперсных веществ. ПМТФ, 1960, № 3, стр. 184.
17. Drummond W. E. Multiple Shock Production. J. Appl. Phys., 1957, 28, 9, 998.
18. Bancroft D., Peterson E., Minshall S. Polymorphism of Iron at High Pressure. J. Appl. Phys., 1956, 27, 3, 291.
19. Hughes D. S. and McQueen R. J. Density of Basic Rocks at Very. High Pressures. Transaction Amer. Geophysical Union, 1958, 39, 5, 959—965.
20. Jerry Wackerle. Shock wave Compression of Quartz. J. Appl. Phys., 1962, vol. 33, № 2, 922—937.