

Г. В. СИМАКОВ, М. А. ПОДУРЕЦ, Р. Ф. ТРУНИН

НОВЫЕ ДАННЫЕ О СЖИМАЕМОСТИ ОКИСЛОВ И ФТОРИДОВ И ГИПОТЕЗА ОБ ОДНОРОДНОМ СОСТАВЕ ЗЕМЛИ

(Представлено академиком Ю. Б. Харитоном 16 X 1972)

В общей проблеме внутреннего строения Земли одним из основных является вопрос о составе Земного ядра. В последние годы здесь существенно упрочились позиции геофизиков, придерживающихся гипотезы о железо-никелевом ядре нашей планеты. Решающую роль в этом сыграли эксперименты по ударному сжатию металлов, горных пород и минералов, проведенные в Советском Союзе в диапазоне давлений, существенно превосходящих давления ($P \geq 1,4$ Мбар) внешней границы ядра ⁽¹⁻⁷⁾.

С другой стороны, альтернативная гипотеза Лодочникова — Рамзея, основанная на идее металлизации силикатов мантии при достижении критических давлений ($P \leq 1,4$ Мбар) и утверждающая химически однородный состав планеты, опровергалась экспериментами по сжатию магнетиальных силикатов, а также окисных структур, характерных для нижней мантии Земли: ни в одном силикатном (или окисном) веществе при его сжатии в ударных волнах не было зафиксировано необходимых скачков плотностей, позволяющих интерпретировать геофизические зависимости с этой точки зрения. Более того, опубликованные в последнее время ⁽⁷⁾ результаты определения сжимаемости α -кварца и кварцита до рекордных давлений в ~ 7 Мбар в измерениях абсолютным методом ⁽⁸⁾ и до ~ 20 Мбар относительным способом не давали как будто повода говорить даже об «инерционности фазовых переходов в горных породах», их «неподатливости» и т. п.

Однако необходимо подчеркнуть, что в исследованиях сжимаемости горных пород и минералов была по крайней мере одна общая некорректность: исследовались либо сложные силикатные структуры (типа оливинов — пироксенов), либо окислы, из которых главный строительный материал мантии — кремнезем брался в исходной структуре α -кварца, а не рутила (стипверит), как это имеет место ⁽⁹⁻¹¹⁾ в глубинах Земли.

С этой точки зрения представляло особый интерес изучение веществ, кристаллизующихся в рутиловой структуре.

В ⁽¹²⁾ было показано, что кривая сжатия рутила TiO_2 (естественные монокристаллы) обладает необычными свойствами: до критических давлений ($P \approx 1$ Мбар) динамический эксперимент фиксирует состояния, характеризующиеся большим изменением плотности (максимальная зафиксированная величина сжатия при этих давлениях $\rho_{\text{TiO}_2} \approx 6,5$ г/см³, т. е. плотность рутила увеличивалась в 1,55 раза по сравнению с исходной); выше критической точки кривая сжатия претерпевает резкий излом, свидетельствующий о переходе рутила в новую высокоплотную фазу с плотностью при нормальных условиях $\rho_0 \approx 6,2$ г/см³. В динамических опытах участок аднабаты высокоплотной фазы характеризуется большой жесткостью (малой сжимаемостью).

В ⁽¹²⁾ рассматривается возможность превращения TiO_2 в фазу типа интерметаллического соединения MgCu_2 с одновременной сменой ионно-ковалентного характера связи на металлический. По крайней мере с равными основаниями возможно трактовать этот переход ⁽¹³⁾ — в соответст-

впи с правилом Гольдшмидта — и как преобразование решетки рутила (координационное число, к.ч. 6) в более плотно упакованную, энергетически выгодную при этих давлениях решетку типа флюорита (CaF_2 , к.ч. 8). Как следует из ⁽¹²⁾, подобный же — качественный и количественный — характер имеет и кривая сжатия флюорита, фазовый переход в котором должен быть интерпретирован уже как преобразование в плотнейшую структуру типа MgCu_2 (к.ч. 12) или близкую к ней по упаковке.

Естественно, что рассмотренные фазовые изменения, соответствующие чрезвычайно большим суммарным скачкам плотностей ($\Delta\rho \sim 7\text{--}8 \text{ г/см}^3$) у системы $\text{TiO}_2 \rightarrow \text{CaF}_2 \rightarrow \text{MgCu}_2$, давали основание предполагать, что

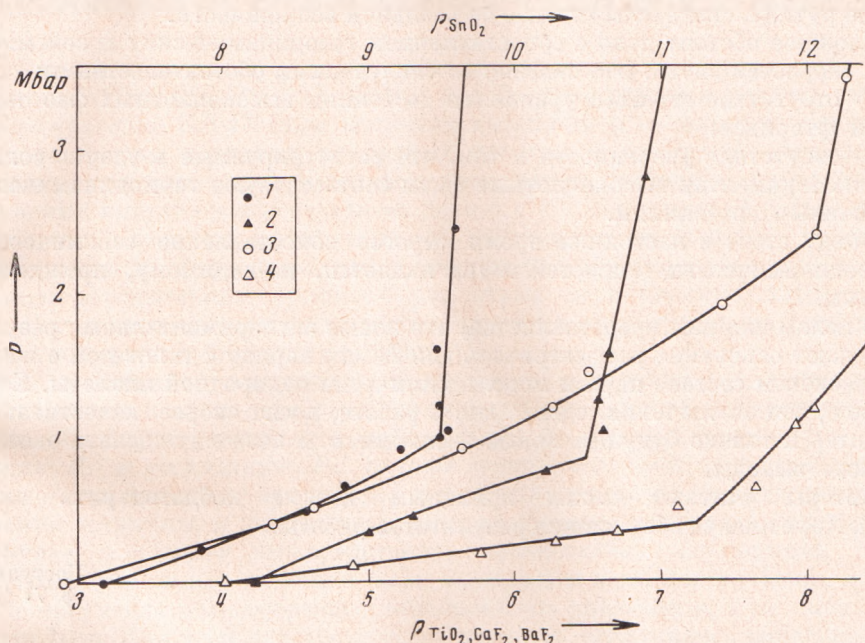


Рис. 1. Кривые ударного сжатия окислов и фторидов: 1 — CaF_2 , 2 — TiO_2 , 3 — SnO_2 , 4 — BaF_2 ; 1, 2 — данные ⁽¹²⁾, 3, 4 — наши данные

близкая к этому ситуация будет иметь место и при сжатии стишверита. К сожалению, мы не располагали необходимым для исследования сжимаемости количеством этого минерала, поэтому было решено провести исследование динамической сжимаемости других веществ, кристаллизующихся при нормальных условиях в структуре рутила и флюорита.

В работе исследовались касситерит SnO_2 (естественные монокристаллы, рутиловая структура) и фторид бария BaF_2 (искусственные монокристаллы оптической чистоты, флюоритовая решетка). Измерения ударной сжимаемости веществ проводились по методу отражения ⁽⁸⁾, результаты исследований приводятся на рис. 1 в сопоставлении с данными по TiO_2 и CaF_2 из ⁽¹²⁾. Видно, что качественно все кривые сжатия подобны и характеризуются особенностями, о которых говорилось выше (большая сжимаемость высокоплотной фазы BaF_2 , возможно, объясняется отсутствием в его составе примесей). Полученные результаты дают основание считать, что с достаточной вероятностью стишверит, плотнейшая рутилоподобная модификация кремнезема ($\rho_0 = 4,28 \text{ г/см}^3$), отсюда не является последним звеном в ряду фазовых изменений SiO_2 и (P — T)-условия, характеризующие зону нижней мантии Земли, не противоречат возможности образования у него более плотных структур. По аналогии с последовательностью превращений: структура рутила (к.ч. 6), $\rho_0 = 4,28 \text{ г/см}^3 \rightarrow$ структура флюорита (к.ч. 8), $\rho_0 \approx 6 \text{ г/см}^3 \rightarrow$ структура MgCu_2 (к.ч. 12), $\rho_0 \approx 10 \text{ г/см}^3$ конечная плотность кремнезема может иметь величину $\rho_0 \approx 10 \text{ г/см}^3$. Это

делает реальной возможность интерпретации химического состава ядра Земли (по крайней мере внешнего) на основе гипотезы Лодочникова — Рамзея (имеющей, вообще говоря, целый ряд преимуществ и с точки зрения планетной космогонии ⁽¹⁴⁾).

Конечно, подобные сверхплотные фазы кремнезема должны удовлетворять и ряду других геофизических данных, в частности сейсмическим скоростям звука в ядре, а также требованию их металлизации. Последнее не является, по-видимому, большой трудностью, поскольку интерпретация данных в ⁽¹²⁾, а также недавно опубликованные результаты Каваи и Машизуки ⁽¹⁵⁾, обнаруживших экспериментально при $P \sim 2,2$ Мбар металлизацию рутила, свидетельствуют о ее реальной возможности.

Сложнее обстоит дело с сопоставлением газодинамических и сейсмических скоростей звука. Это связано со следующими обстоятельствами:

1) отсутствие строгого уравнения состояния высокоплотных фаз оксидов и фторидов;

2) отсутствие уверенности в том, что регистрируемые в ударно-волновых экспериментах высокоплотные фазы соответствуют термодинамически устойчивым состояниям.

Ввиду этого в настоящее время строгое сопоставление сейсмических и газодинамических скоростей звука является, по-видимому, преждевременным.

В целом же, нам представляется, что новые экспериментальные результаты дают основание рассматривать для Земли наряду с гипотезой о железо-никелевом составе ядра и модель химически однородной планеты. Естественно, что заключения, сделанные в работе, носят скорее качественный характер и только будущие новые эксперименты позволят сделать окончательные выводы.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить акад. Ю. Б. Харитона за обсуждение результатов работы.

Поступило
8 VI 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Л. В. Альтшулер, К. К. Крупников и др., ЖЭТФ, 34, № 4, 874 (1958).
² Л. В. Альтшулер, С. Б. Кормер и др., ЖЭТФ, 38, № 3, 790 (1960). ³ В. Н. Жарков, ДАН, 135, № 6, 1378 (1960). ⁴ К. К. Крупников, А. А. Баканова и др., ДАН, 148, № 6, 1302 (1963). ⁵ Р. Ф. Трунин, В. И. Ганьшикова и др., Изв. АН СССР, сер. Физика Земли, 9, № 1 (1965). ⁶ Л. В. Альтшулер, Р. Ф. Трунин, Г. В. Симаков, Там же, 10, № 1 (1965). ⁷ Р. Ф. Трунин, Г. В. Симаков и др., Там же, 1, № 13 (1971). ⁸ Л. В. Альтшулер, К. К. Крупников, М. И. Бражник, ЖЭТФ, 34, № 4, 886 (1958). ⁹ A. E. Ringwood, J. Geophys. Res., 67, № 10 (1962). ¹⁰ С. М. Стишов, Геохимия, 8, 649 (1962). ¹¹ D. H. Green, A. E. Ringwood, J. Geophys. Res., 68, № 3 (1963). ¹² Л. В. Альтшулер, М. А. Подурец и др., Физика тв. тела, 15, № 5, 1436 (1973). ¹³ T. J. Ahrens, D. L. Anderson, A. E. Ringwood, J. Geophys. Res., 7, 667 (1969). ¹⁴ B. J. Levin, Surfaces and Interiors of Planets and Satellites, London N.Y., 1970, p. 462. ¹⁵ N. Kawai, S. Mochizuki, Phys. Letters, 36A, № 1, 54 (1971).