

# Результаты исследований фазовых превращений ударно сжатых металлов

**М.В. Жерноклетов, А.Е. Ковалев, А.М. Подурец, В.Г. Симаков**

**К 70летию отдела 0304 ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ**

**К 50летию научной деятельности М.В. Жерноклетова**

*Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия*

# Первый начальник отдела 0304

---



# Первые сотрудники отдела

---



# Л.В. Альтшулер с сотрудниками отдела. Сентябрь 1969 г.



# Отдел 0304. 2012 г.



# Методы исследования фазовых превращений ударно-сжатых веществ

---

1. Ударное сжатие.
2. Изэнтропическое расширение.
3. Регистрация давлений за ФУВ пьезорезистивными и пьезоэлектрическими датчиками.
4. Регистрация профилей массовых скоростей движения вещества за ФУВ.
5. Оптические методы и электрические (проводимость) измерения.
6. Импульсной рентгеноструктурный анализ.
7. Изучение структурных изменений в сохраненных образцах.
8. Измерение скорости звука за ФУВ.
9. ПВДФ-датчики давления.

## Объекты исследований

---

1. Элементы периодической системы.
2. Галогениды щелочных металлов.
3. Карбиды и нитриды.
4. Окислы.
5. Горные породы и минералы.
6. Органические вещества.
7. Другие вещества.

# Содержание доклада

---

1. Цели исследований
2. Результаты
  - 2.1. Церий
  - 2.2. Титан, сплав ВТ-20
  - 2.3. Олово
  - 2.4. Цинк
3. Выводы

# Цели исследований

---

Регистрация фазовых переходов, в том числе диапазонов давлений плавления на ударных адиабатах металлов (церий, титан, сплав ВТ-20, олово, цинк) с помощью измерений скоростей звука методом догоняющей разгрузки с использованием индикаторных жидкостей и профилей давления ПВДФ и манганиновыми датчиками.

# ЦЕРИЙ

---

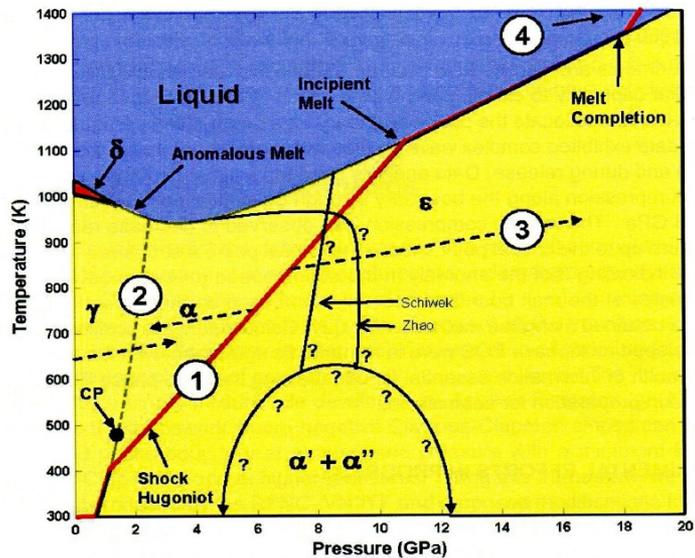
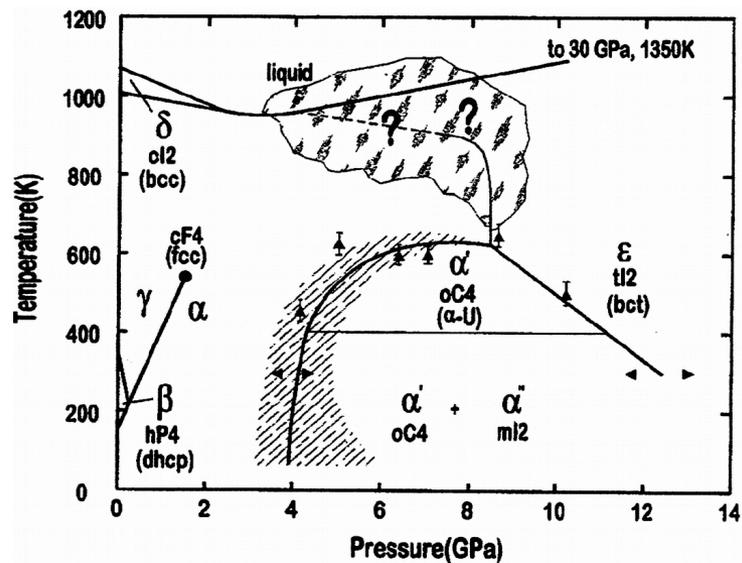
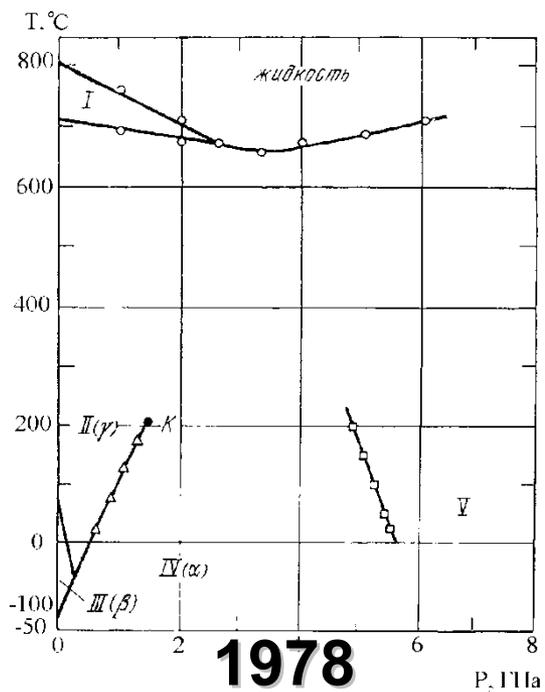
- Церий имеет необычные свойства по сравнению с другими металлами.
- Эти свойства включают существование критической точки на линии изоморфного фазового перехода в твёрдом состоянии ( $\gamma$ - $\alpha$ ), аномальное поведение сжимаемости, теплового расширения и.т.д.
- Необычные свойства церия вызваны особенностями изменения электронной структуры при сжатии.
- Из-за сильных скачков объёма при фазовых превращениях церий плавится в ударных волнах при очень низких давлениях.
- Таким образом, необходимо исследование поведения церия в ударных волнах и волнах разгрузки.

# Образцы церия

---

- Мы исследовали образцы электролитического церия с плотностью  $6,75 \text{ г/см}^3$  и чистотой  $99,83\%$ .  
Содержание других элементов (вес.%):  
La –  $0,07\%$ ; Nd –  $0,05\%$ ; Fe –  $0,02\%$ .

# Фазовая диаграмма и ударная адиабата церия



## Конструкция устройства для измерения скорости звука в цери оптическим методом



- 1 – электроконтактные датчики;  
2 – трубочки; 3 – индикаторная жидкость; 4 – экран; 5 – ударник;  
6 – образец церия; 7 – обойма;  
8 - световоды

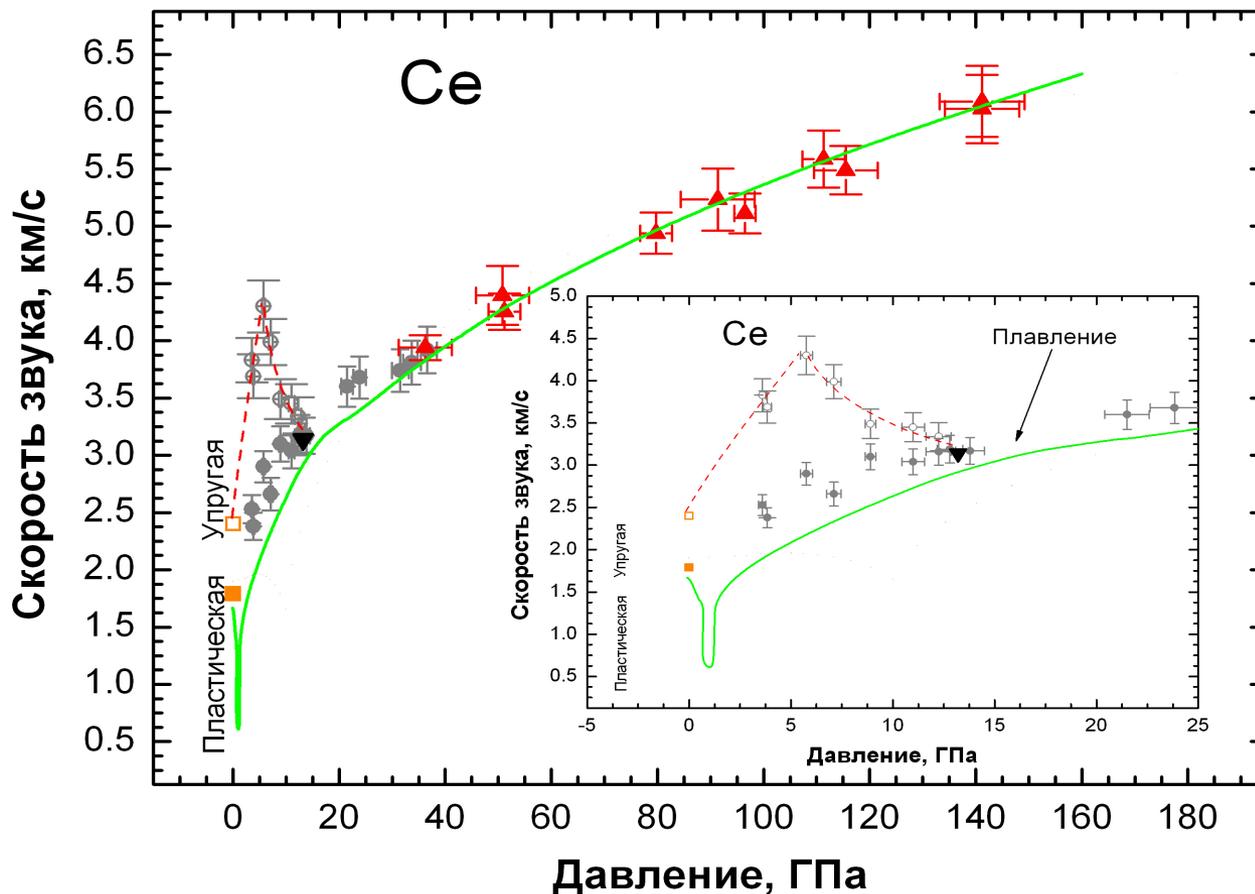
## Осциллограммы излучения фронта ударной волны в $C_8F_{16}$ при $P_{ce} = 96,5$ ГПа за ступеньками церия

а)



а) 1,99 мм; б) 2,27 мм; в) 3,00 мм; г) 3,38 мм

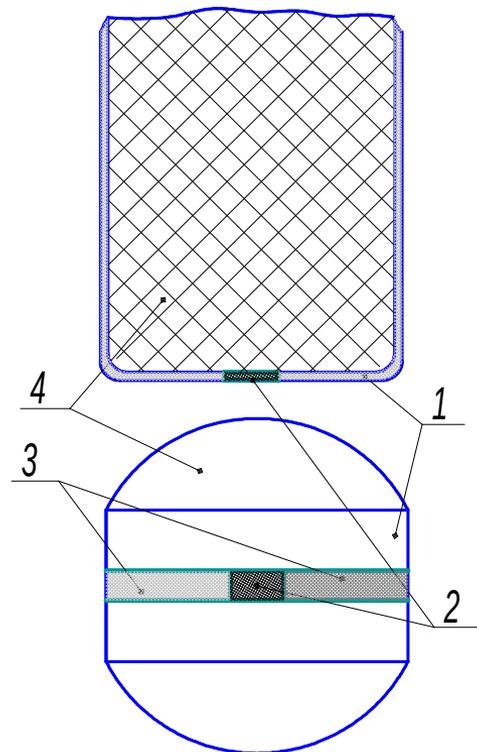
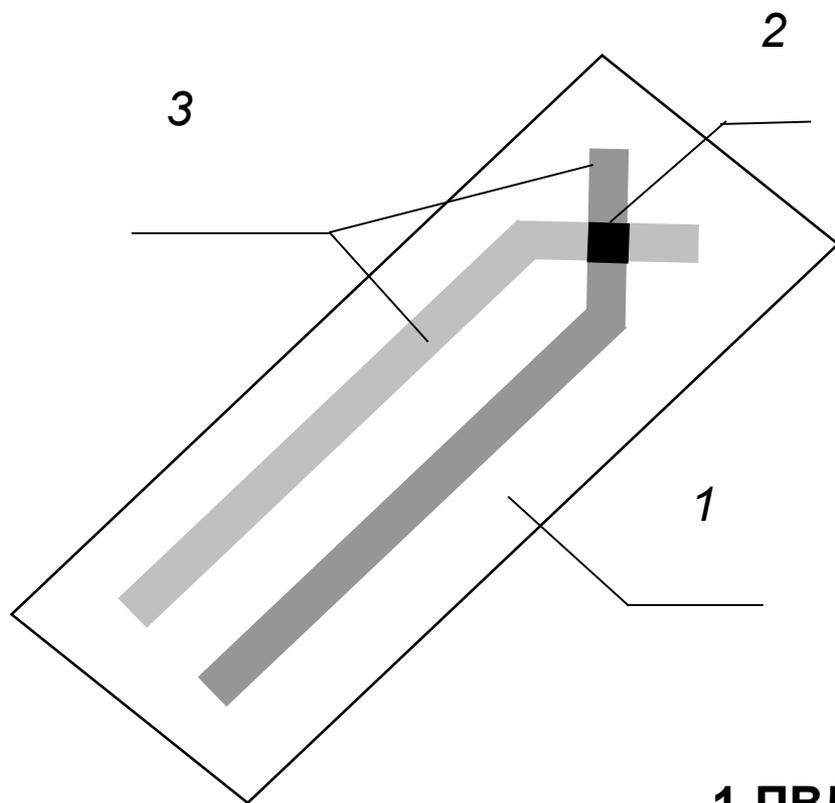
# Зависимость скорости звука в цери от давления



— - расчёт по УРС ВНИИЭФ, ▲ - объемная скорость звука (оптический метод); ●, ○ - объемная и упругая (продольная) скорости звука (манганин), □ - упругая скорость звука, ■ - объемная скорость звука; ▼ - B.J. Jensen

# ПВДФ датчик

## Датчик торцевого типа



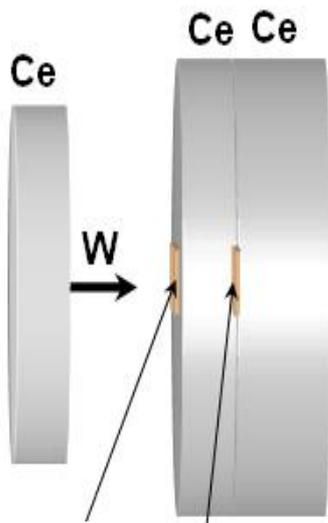
- 1-ПВДФ плёнка (толщина 10÷30мкм)
- 2- чувствительный элемент
- 3- медные электроды (толщина ~ 0,5мкм)
- 4- акустический отвод

# Вид установки

## Легкогазовя пушка

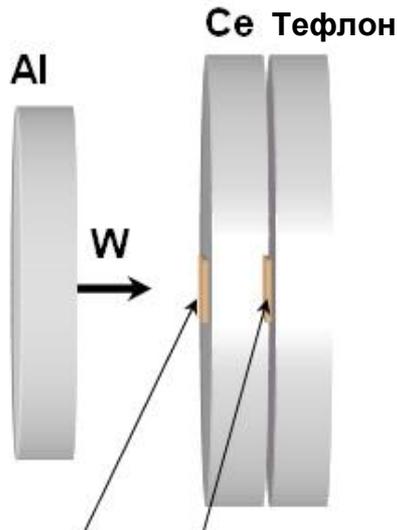


# Ударно волновые исследования



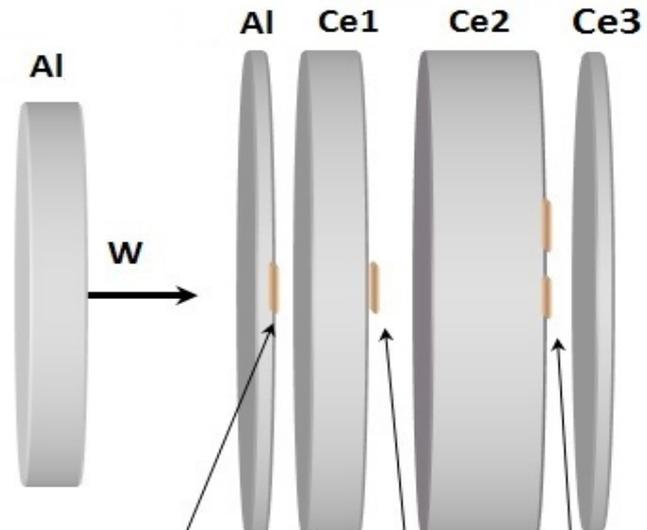
ПВДФ1 ПВДФ2

1.  $W=312^* \text{ м/с}$
2.  $W=395^* \text{ м/с}$
3.  $W=484 \text{ м/с}$
4.  $W=564 \text{ м/с}$



ПВДФ1 ПВДФ2

1.  $W=325 \text{ м/с}$
2.  $W=466 \text{ м/с}$
3.  $W=550 \text{ м/с}$
4.  $W=654 \text{ м/с}$

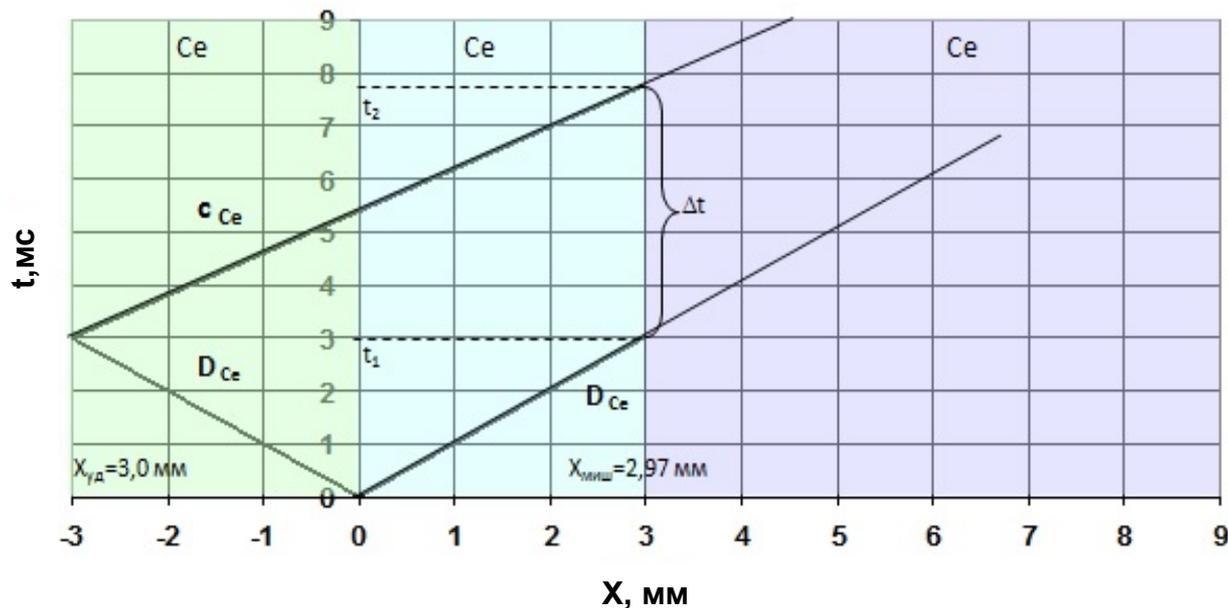
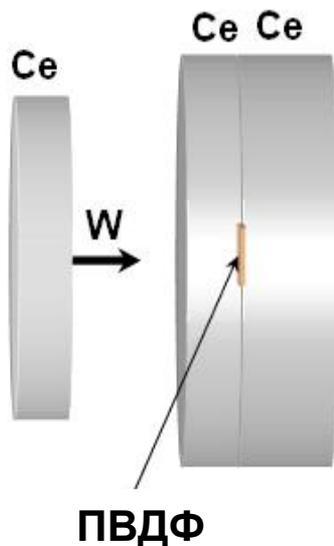


ПВДФ1 ПВДФ2 ПВДФ3,4

1.  $W=643 \text{ м/с}$

\* Эксперименты со скоростями  $W=312 \text{ м/с}$  и  $W=395 \text{ м/с}$  проводились только с ПВДФ2 датчиком.

# Экспериментальная сборка с симметричным ударом. Один датчик



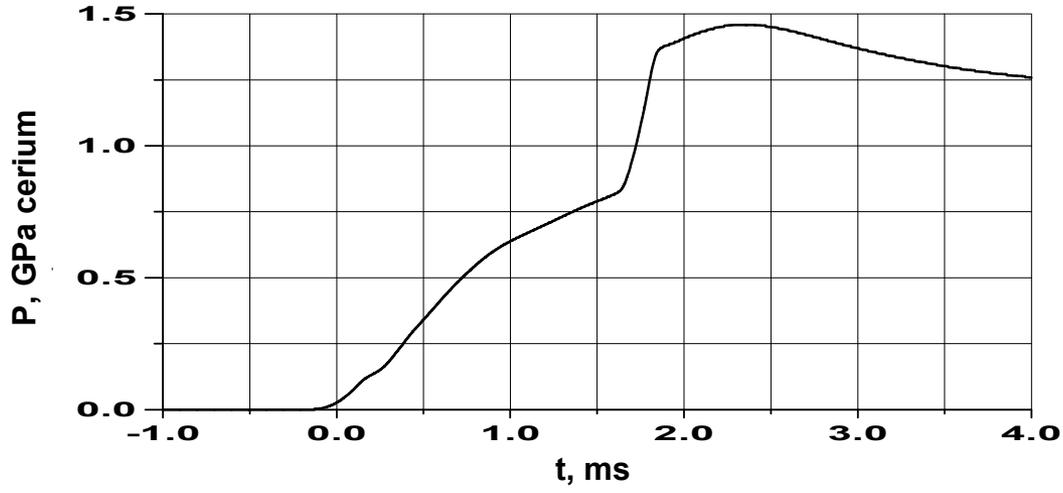
$$C = \frac{X_{imp} + X_{target}}{\frac{X_{target} - X_{imp}}{D} + \Delta t}$$

$$D = \frac{P}{\rho u}$$

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

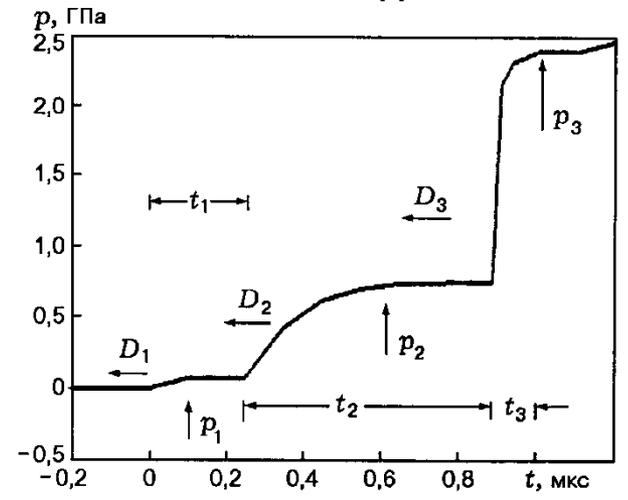
# Фазовый переход в церии

## ПВДФ 2008

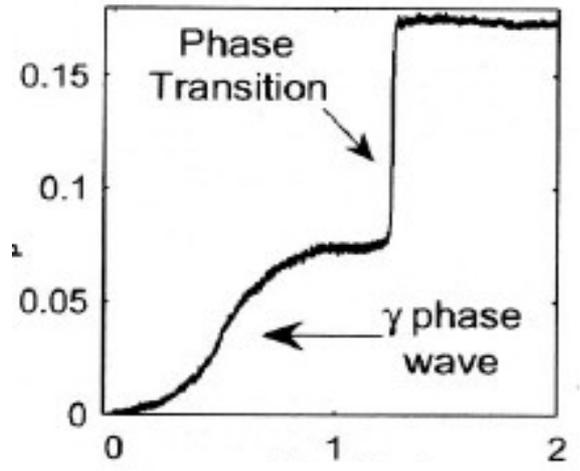


Давление фазового перехода  $P = 0,7 - 0,8$  ГПа

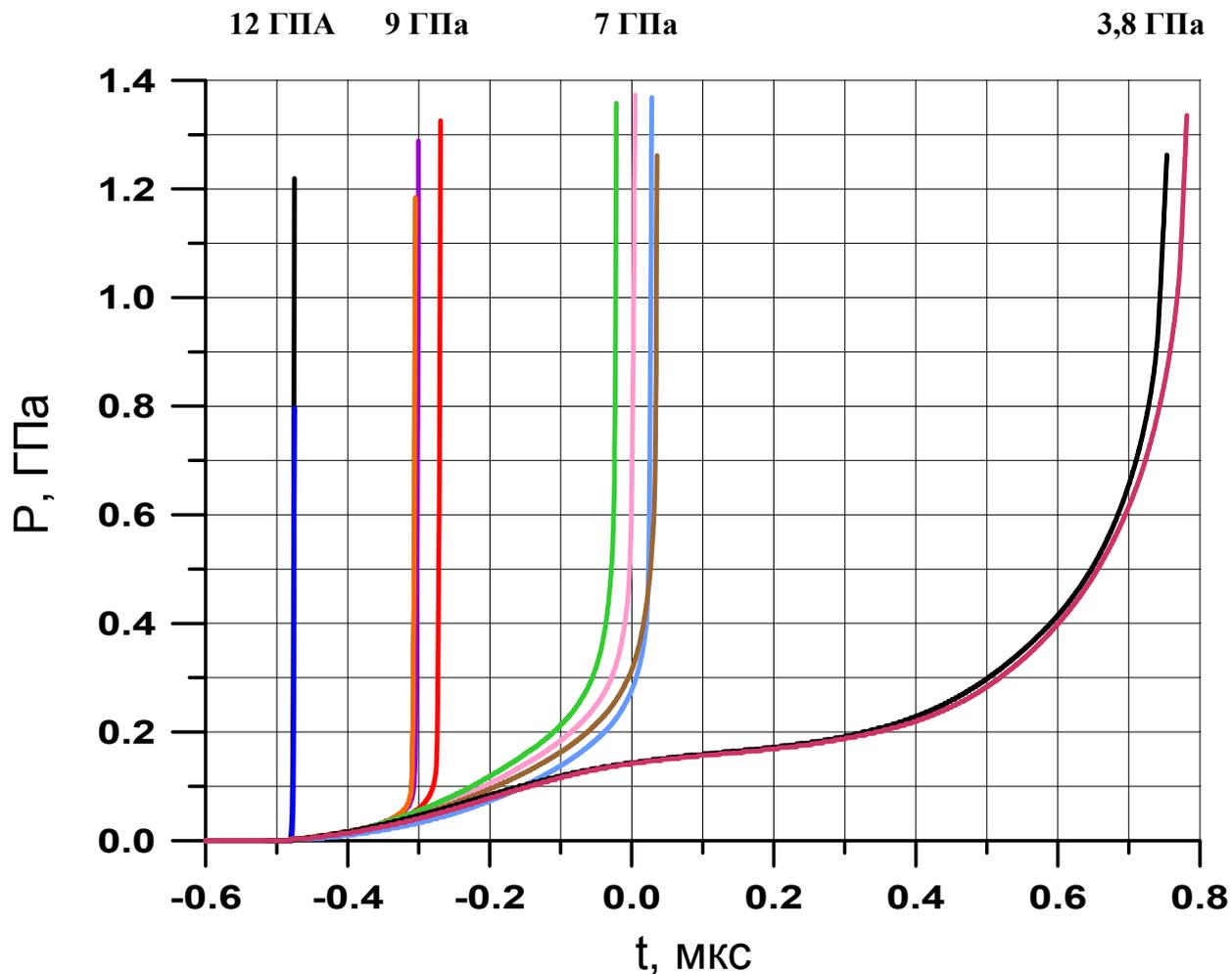
## манганиновый датчик 1999



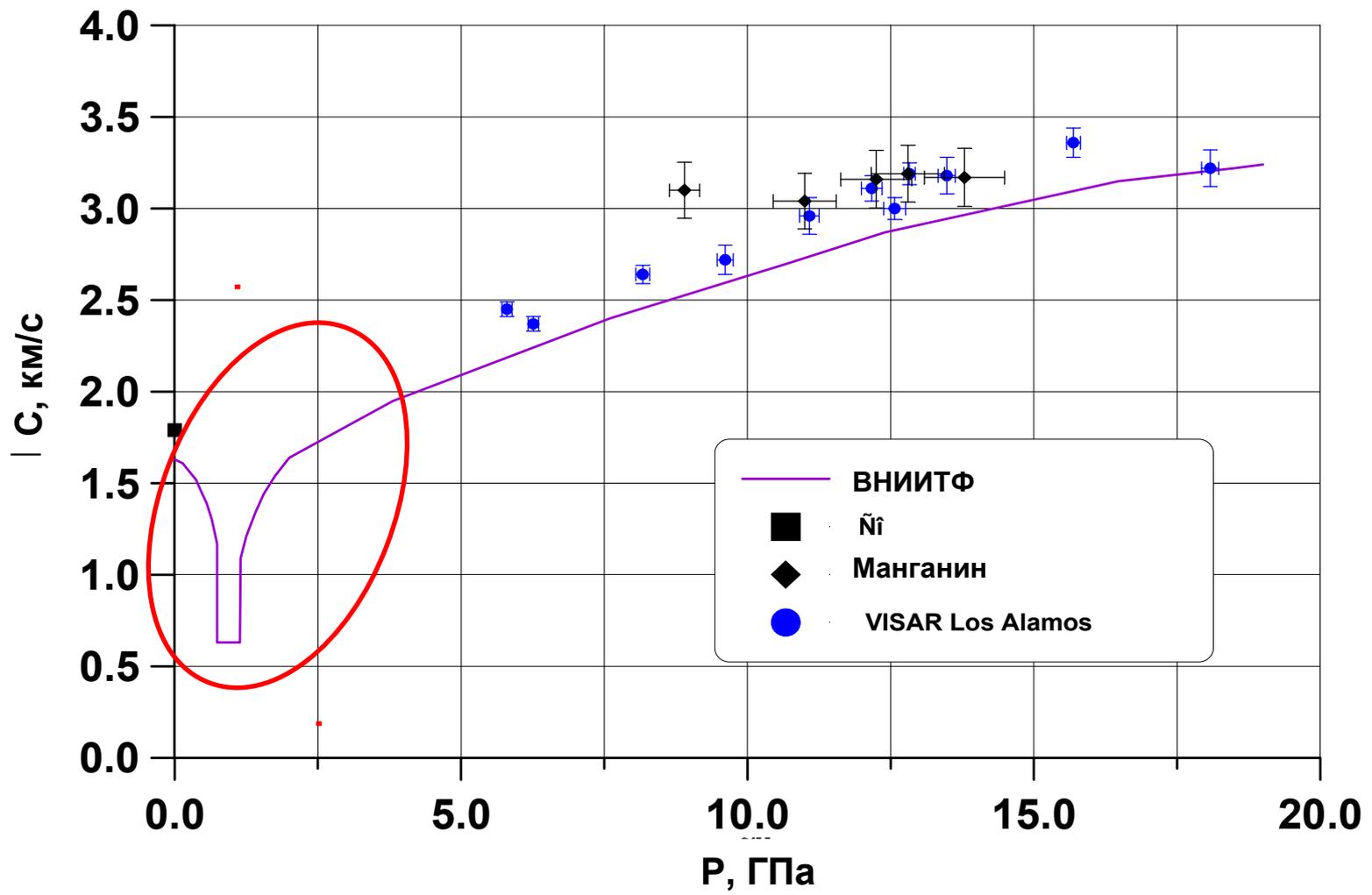
## VISAR 2009



## Начальные части профиля давления в цери при различных условиях нагружения в диапазоне давлений 3,8-12 ГПа



# Область исследования

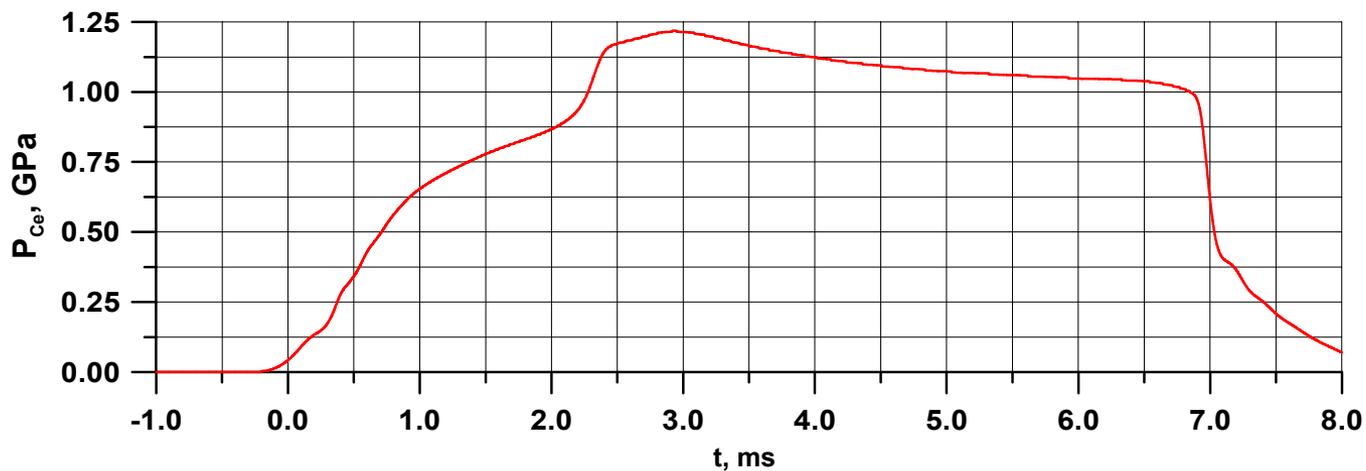
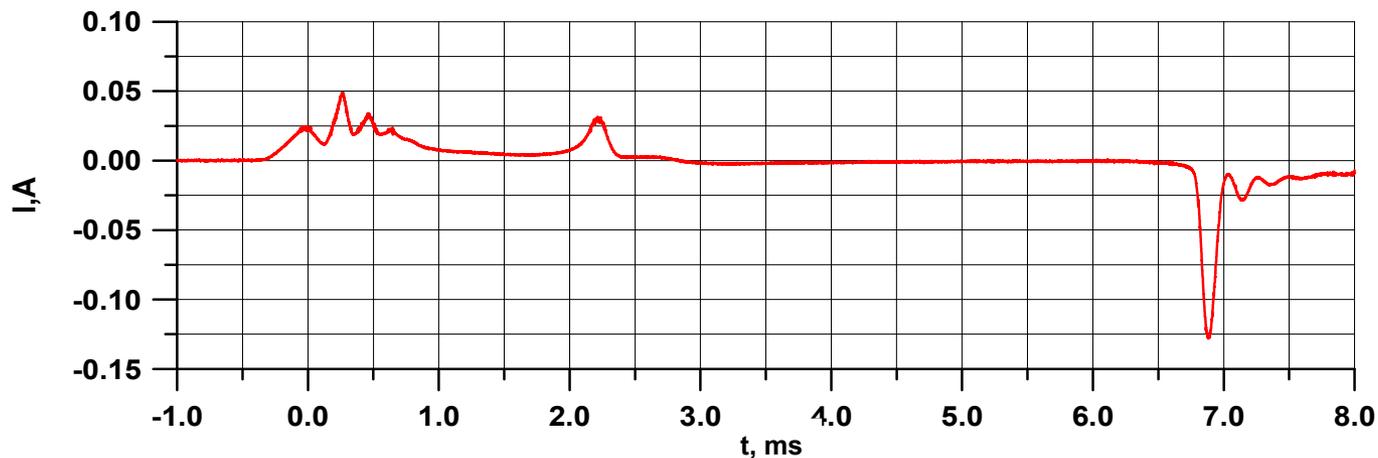


# Давление фазового перехода

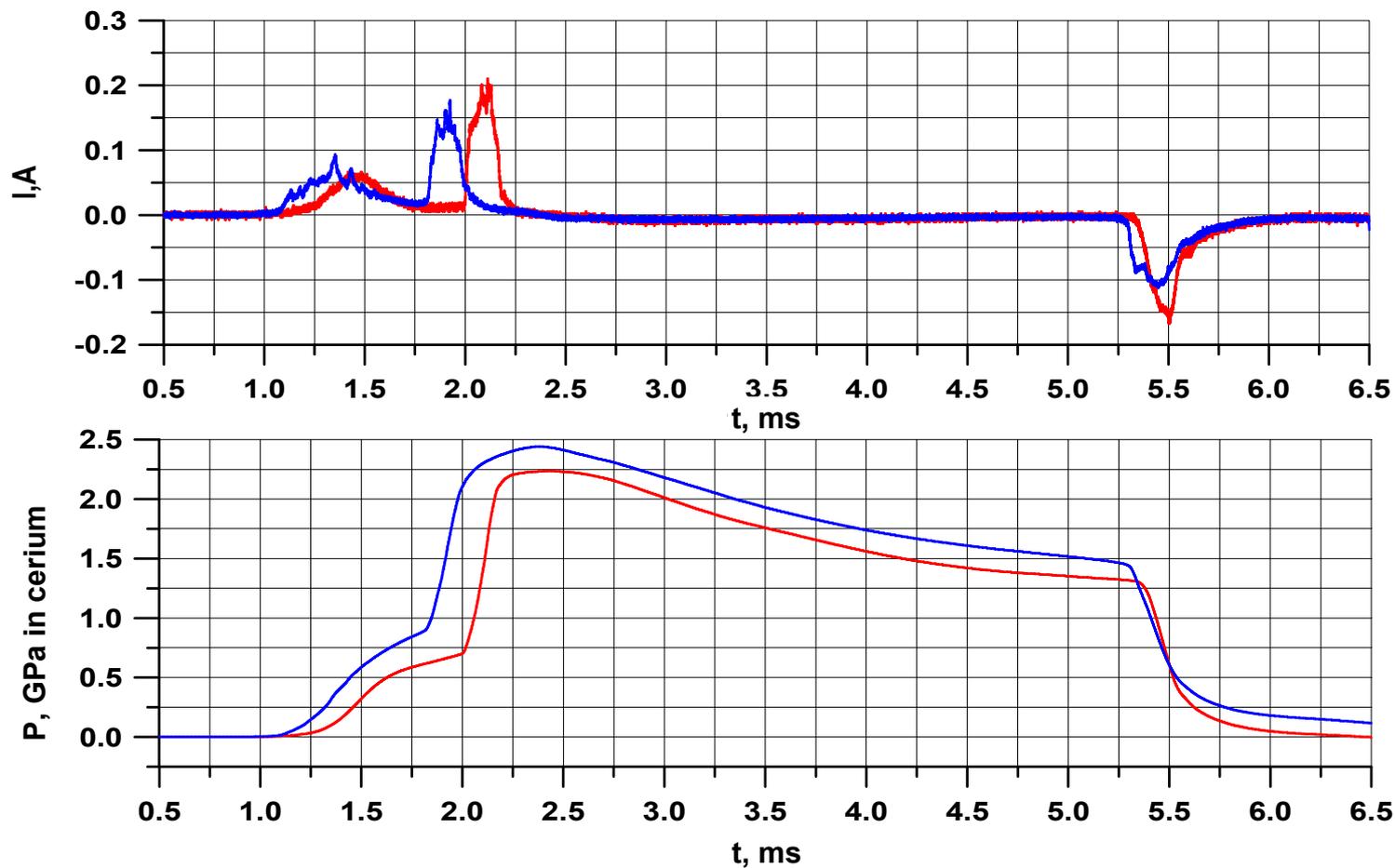
---

- Условия нагружения были выбраны таким образом, чтобы обеспечить давление в образцах церия (0,17-3ГПа) и ниже и выше точки  $\gamma$ - $\alpha$  фазового перехода в церии (при помощи легкогазовой пушки).

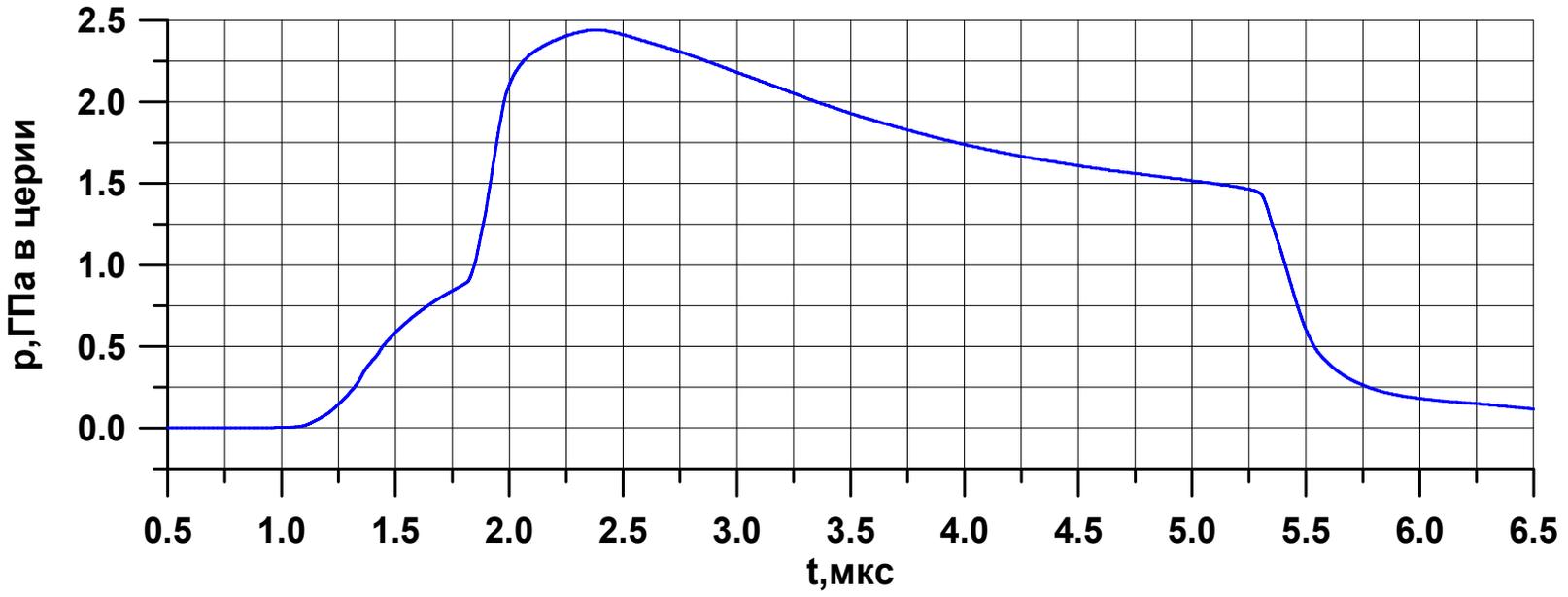
# Результаты эксперимента для симметричного удара при $W=312$ м/с



# Результаты эксперимента для симметричного удара при $W=564$ м/с

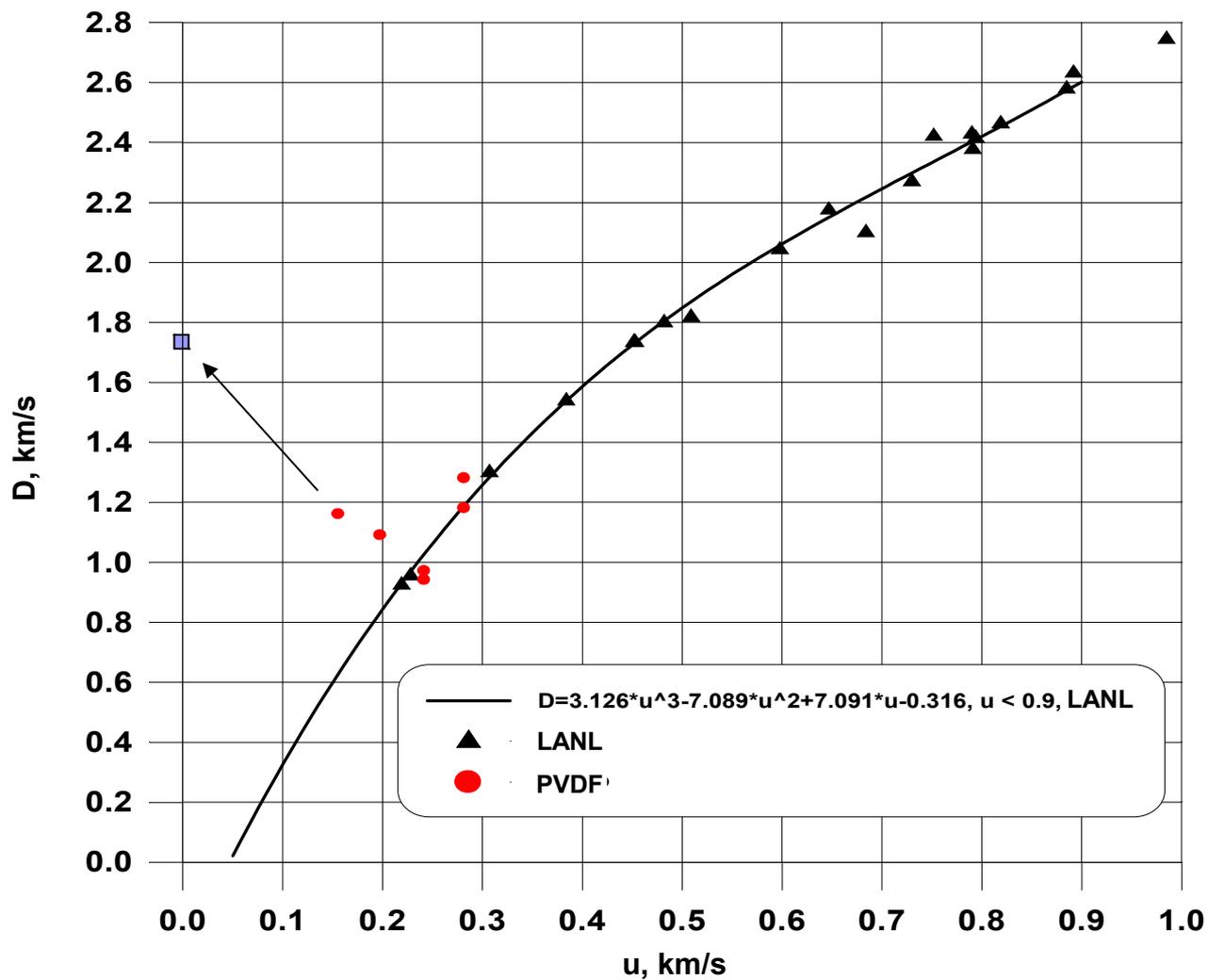


# Фазовый переход

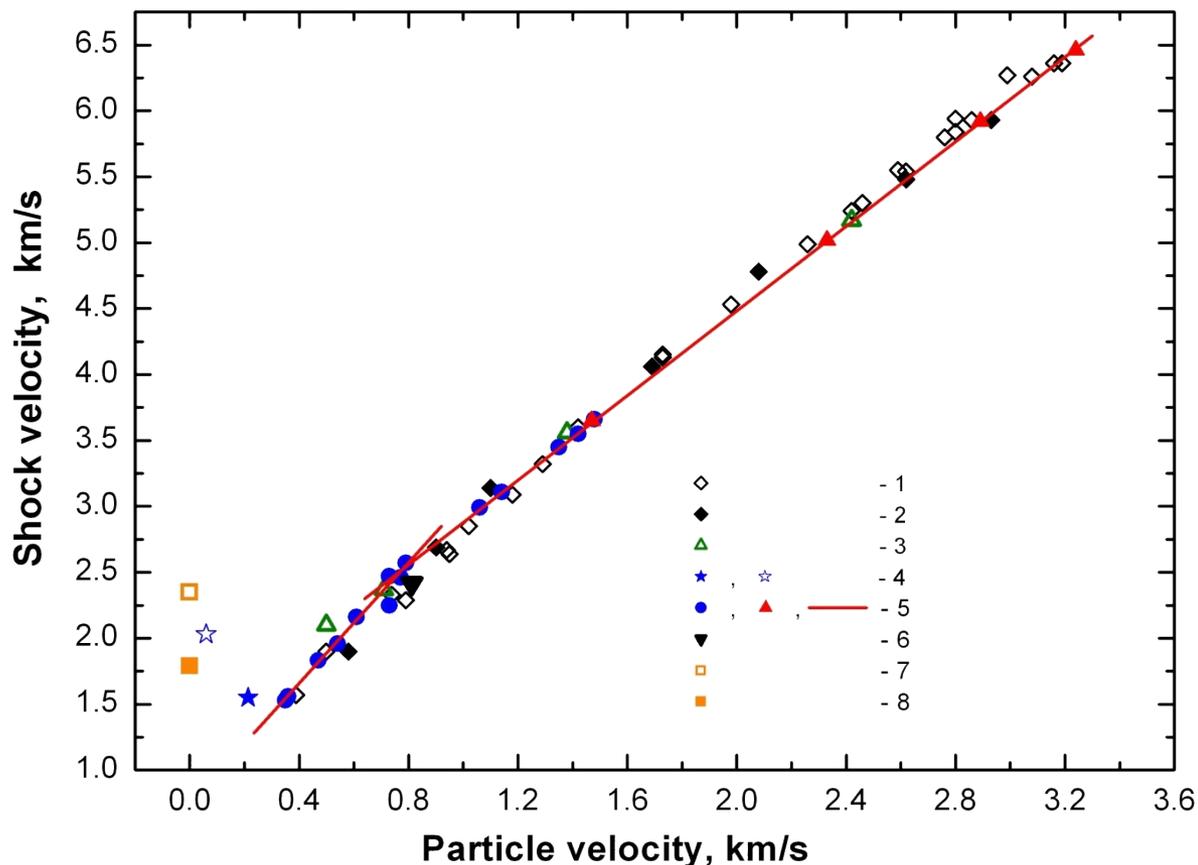


Давление фазового перехода  $P=0,83\pm0,06$  ГПа

# Ударная адиабата

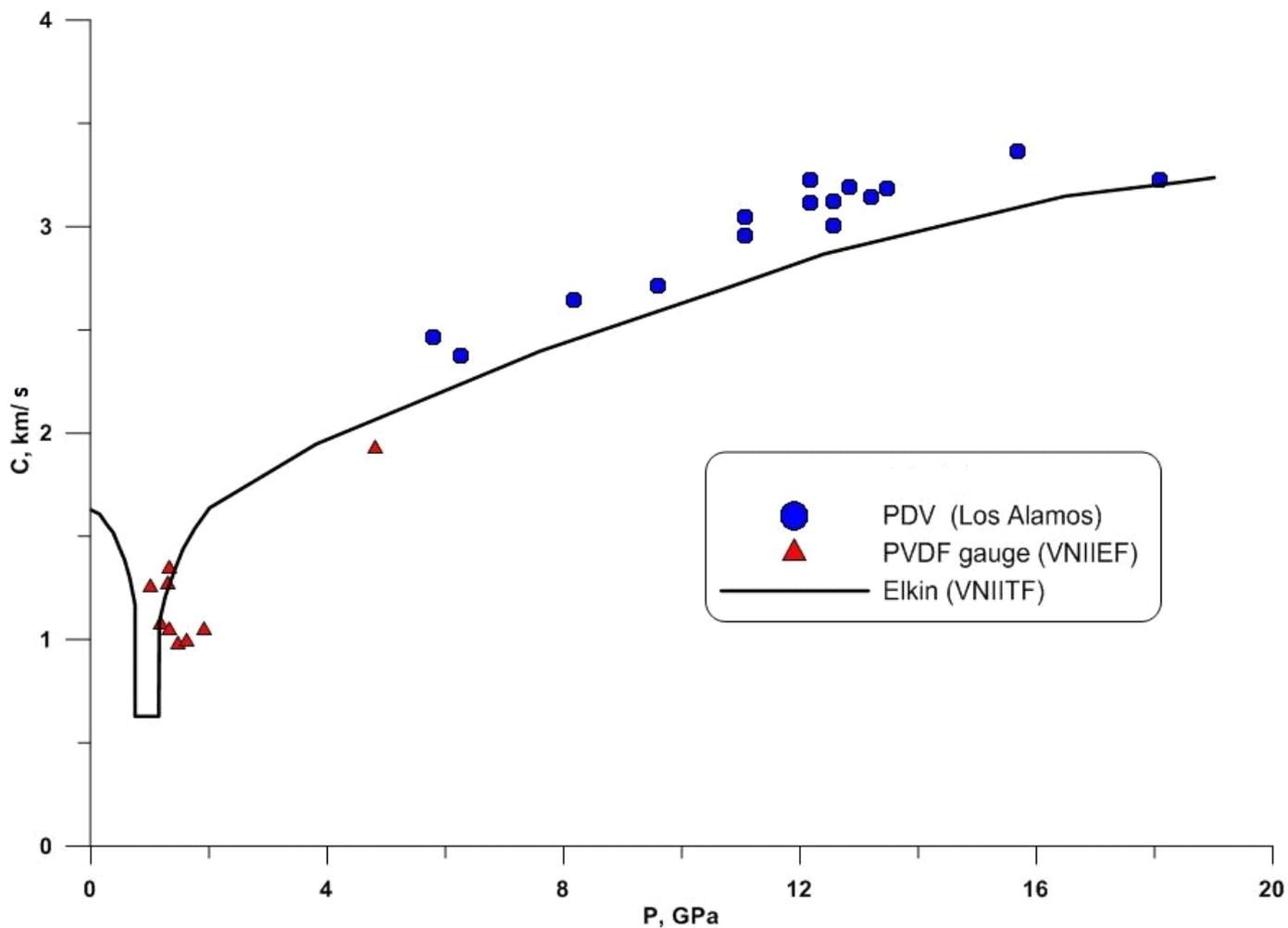


# Кривая Гюгонио для церия



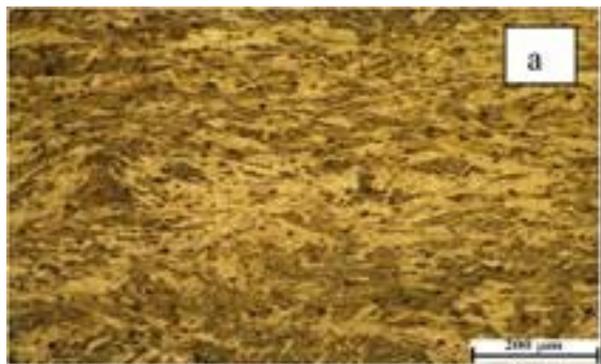
- 1 – W.J. Carter, J.N. Fritz; 2 – W.H. Gust, E.B. Royce; 3 – L.V. Altshuler et al.;  
4 – M.N. Pavlovsky et al.; 5 – настоящая работа; 6 – B.J. Jensen; 7 –  $C_L$ ;  
8 –  $C_B$  [W. J. Carter, J. N. Fritz ]

# Аналитическая зависимость объёмной скорости звука от давления при ударно волновом нагружении церия

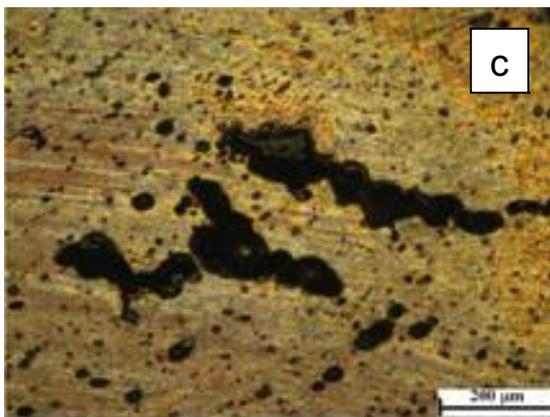
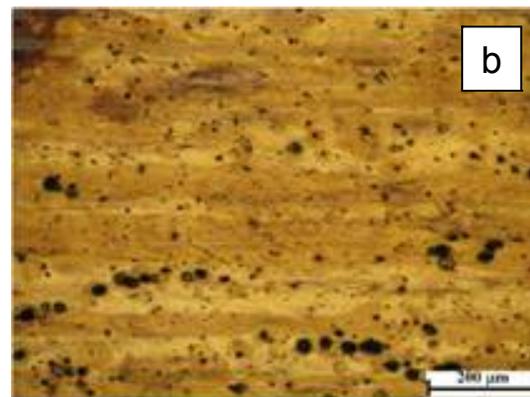


# Микроструктура образцов

В начальном состоянии

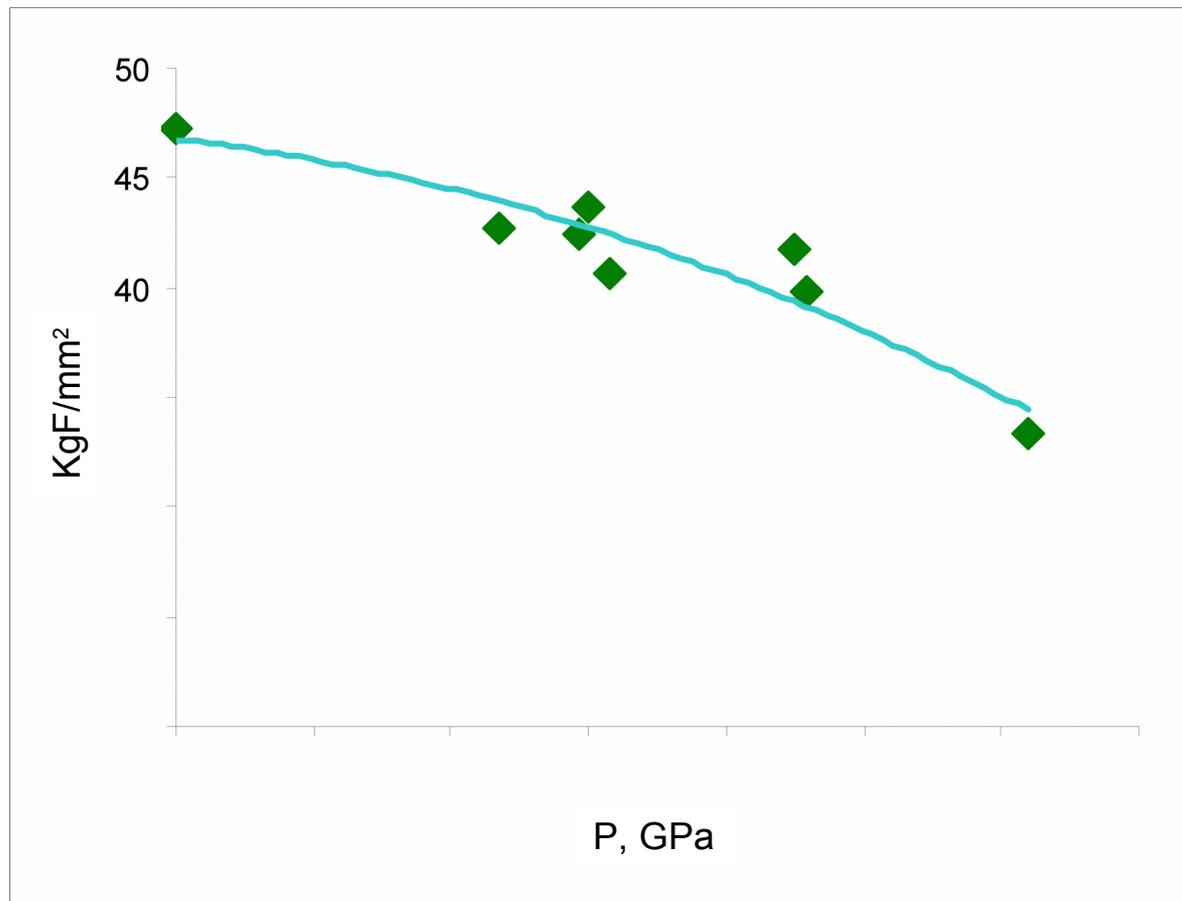


После опытов при скорости удара  $W=550\text{м/с}$



После опытов при скорости удара  $W=654\text{м/с}$

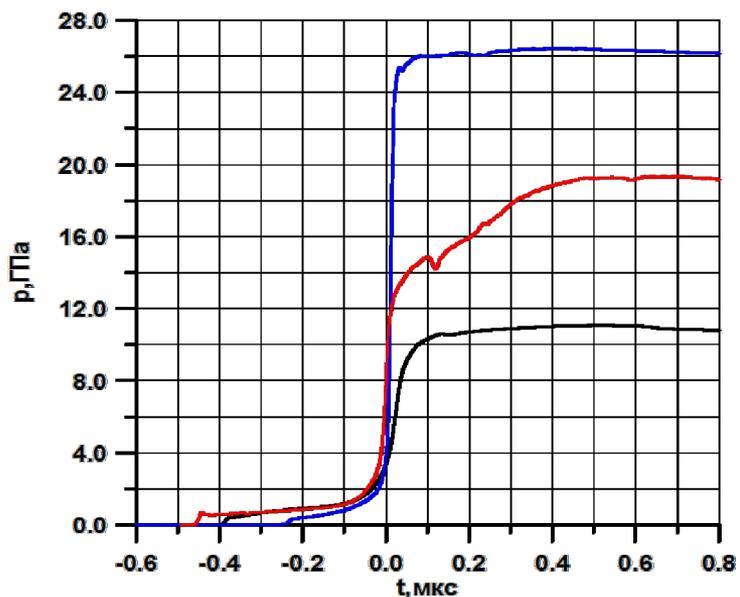
# Зависимость микротвердости от давления



# Титан ВТ 1-0 и сплав ВТ-20

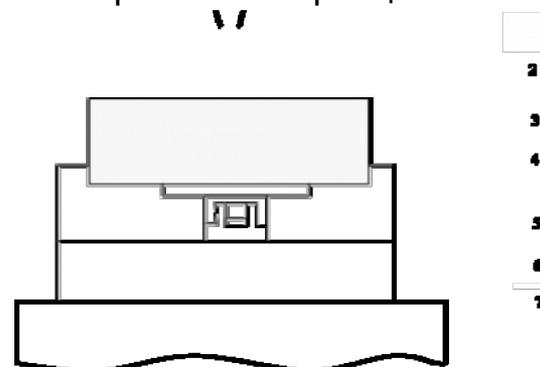
## Регистрация профиля УВ с помощью ПВДФ-датчиков

Экспериментальные зависимости давления от времени в опытах с ПВДФ-датчиком при  $P = 10,5; 20$  и  $26$  ГПа

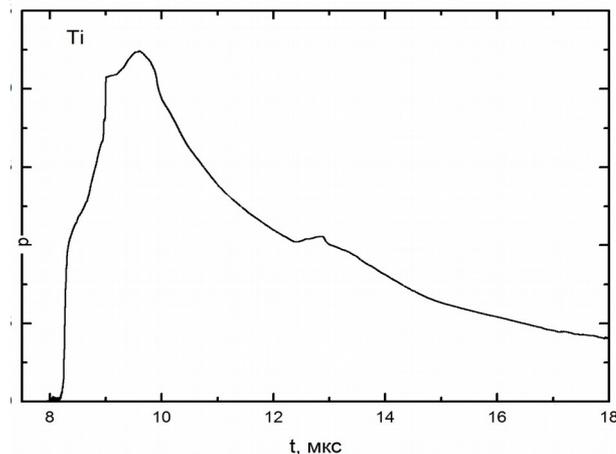


## Анализ структуры сохраненных образцов

Схема постановки эксперимента на сохранение образцов

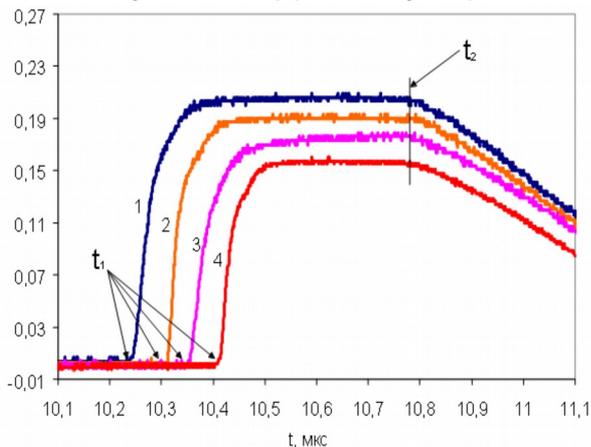


Пример зависимости давления от времени на передней поверхности титанового образца в ампуле сохранения

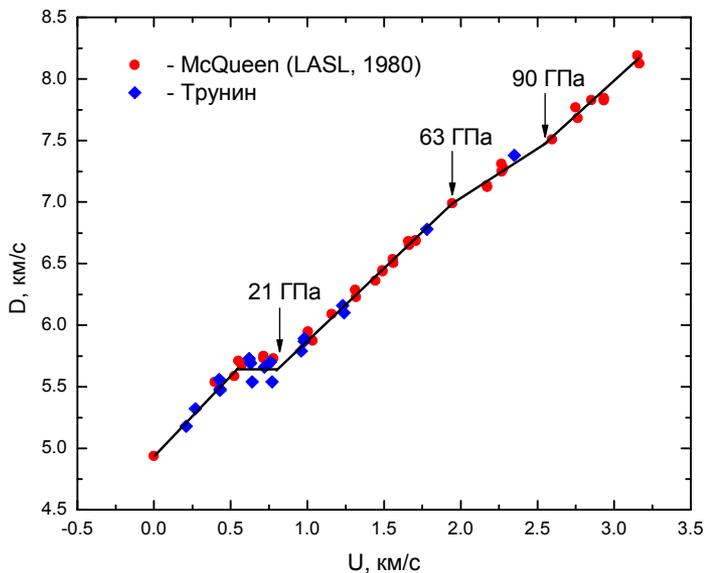


# Измерение скорости звука

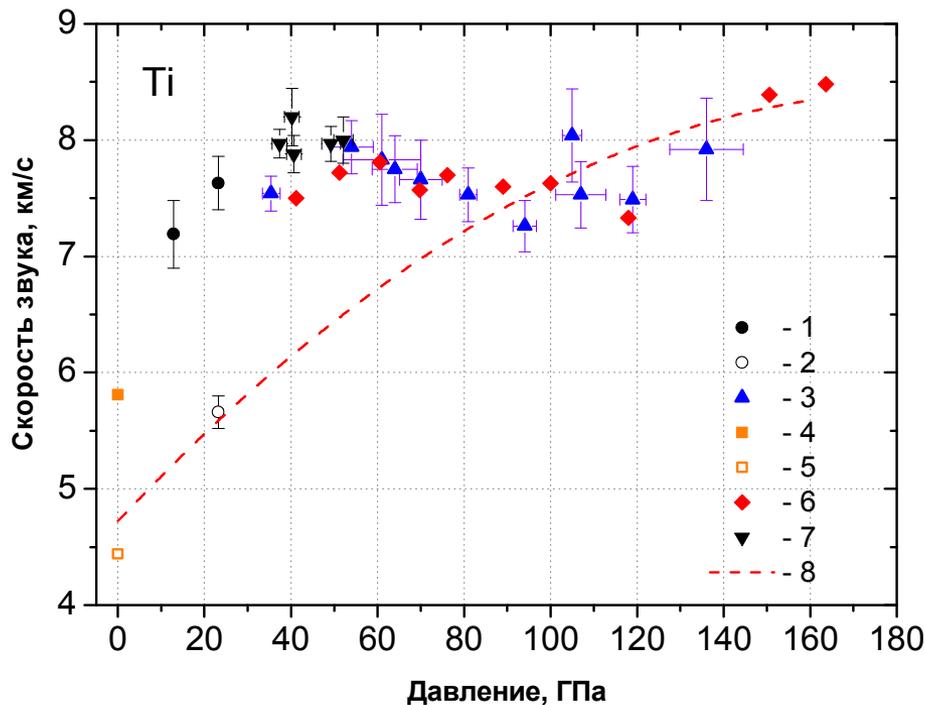
Записи излучения фронта ударной волны



Ударная адиабата титана



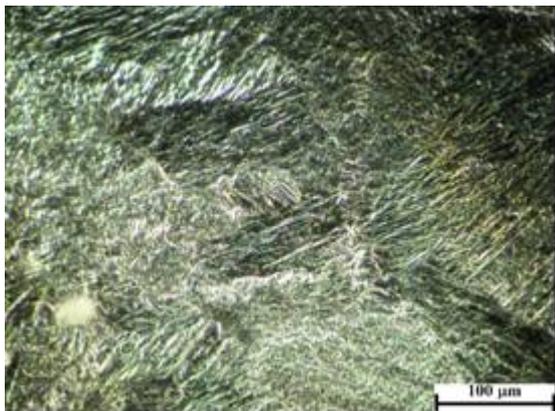
Зависимость скорости звука в Ti от давления



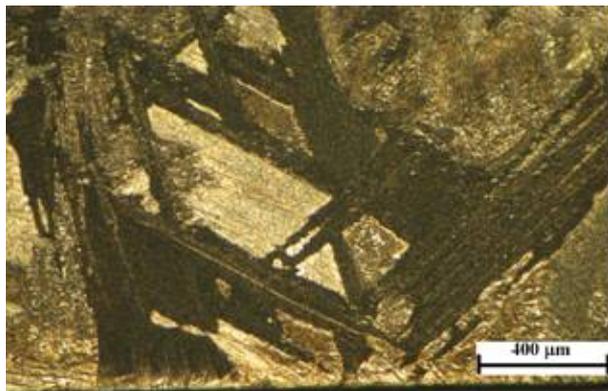
- 1 –  $C_L$  (манганин), 2 –  $C_B$  – (манганин), 3 – скорость звука (оптический метод), 4 –  $C_L$  (ультразвуковой метод),
- 5 –  $C_B$  (ультразвуковой метод),
- 6 – данные ВНИИТФ; 7 – данные (лазерный интерферометр),
- 8 – расчет для ВТ1-0 (программа «УП»)

# Микроструктура нагруженных образцов

а)

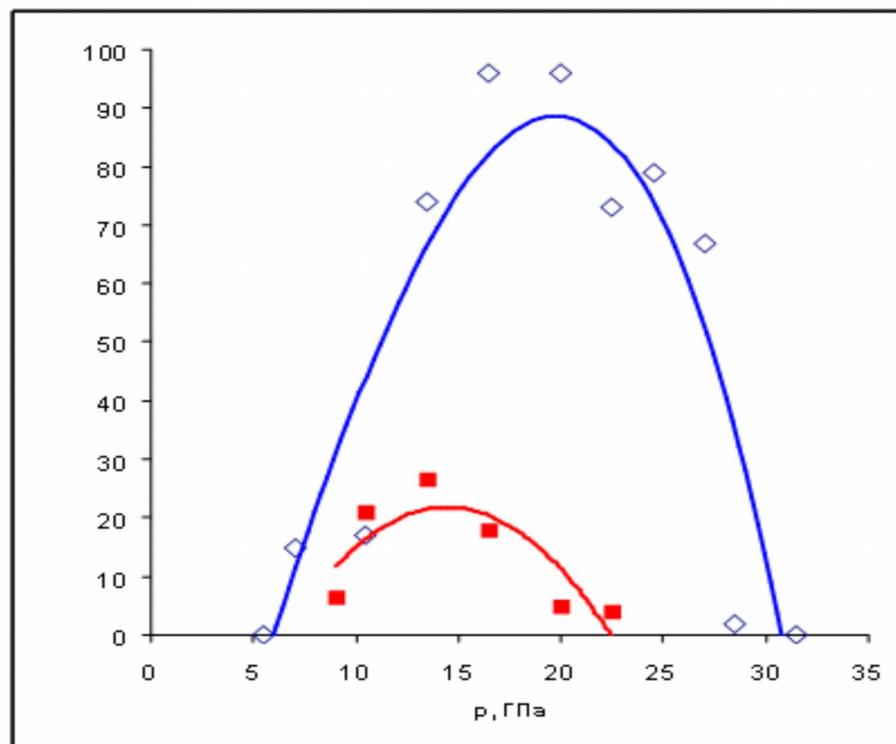


б)



а –  $P = 9$  ГПа; б –  $P = 22,5$  ГПа

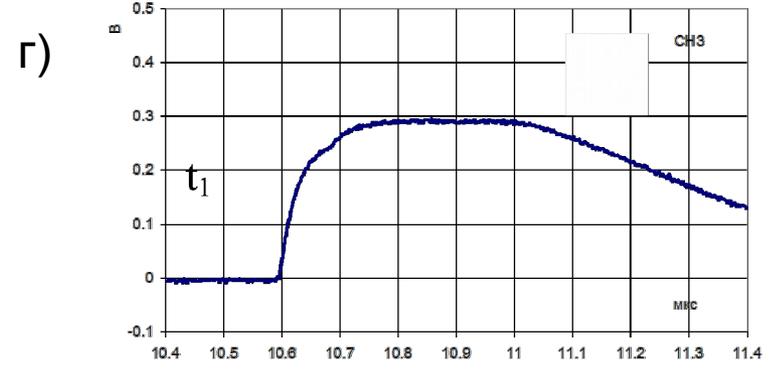
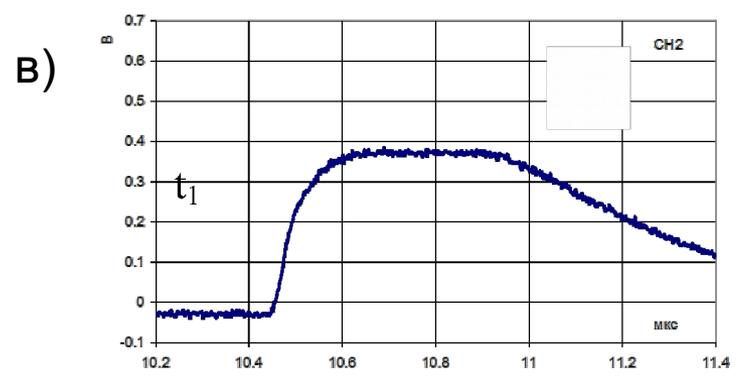
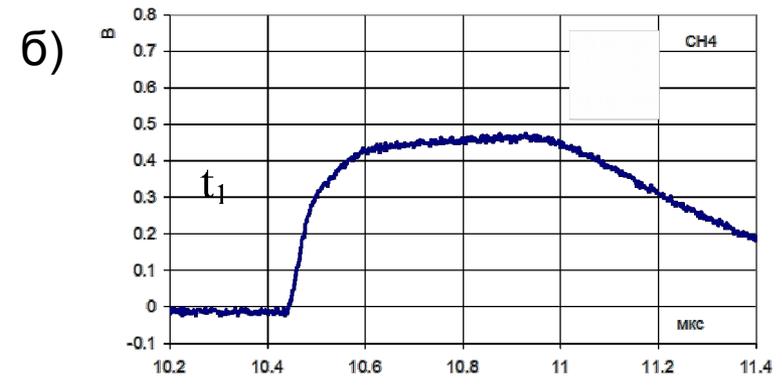
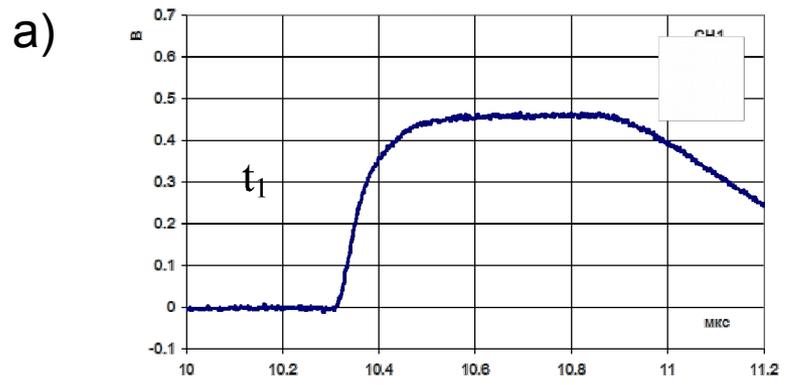
Зависимости содержания  $\omega$ -фазы в нагруженных образцах от давления нагружения



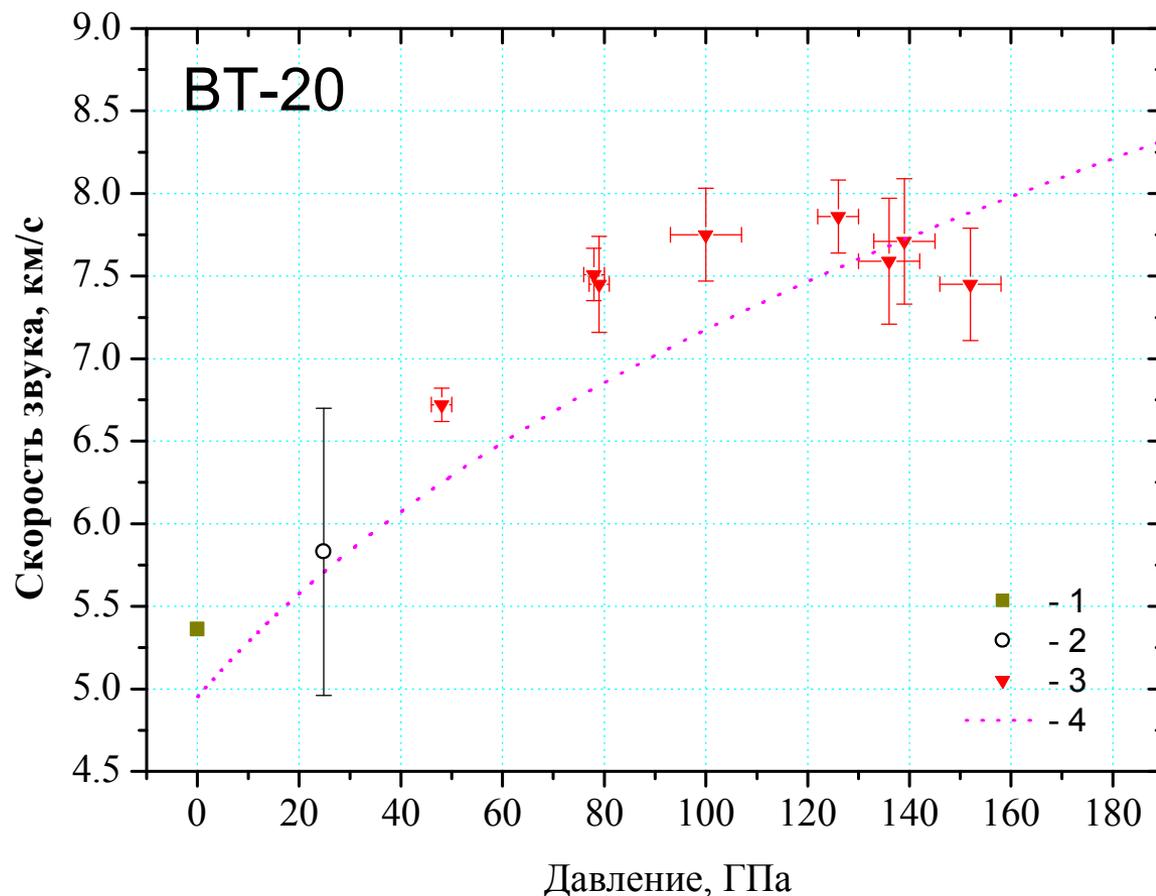
■ – при температуре 20°C (BT1-0);  
◇ - при температура - 180°C (иодидный титан)

# Сплав ВТ-20

Излучение фронта ударной волны в  $C_8F_{16}$  за ступеньками  
ВТ-20 при  $P = 100$  ГПа



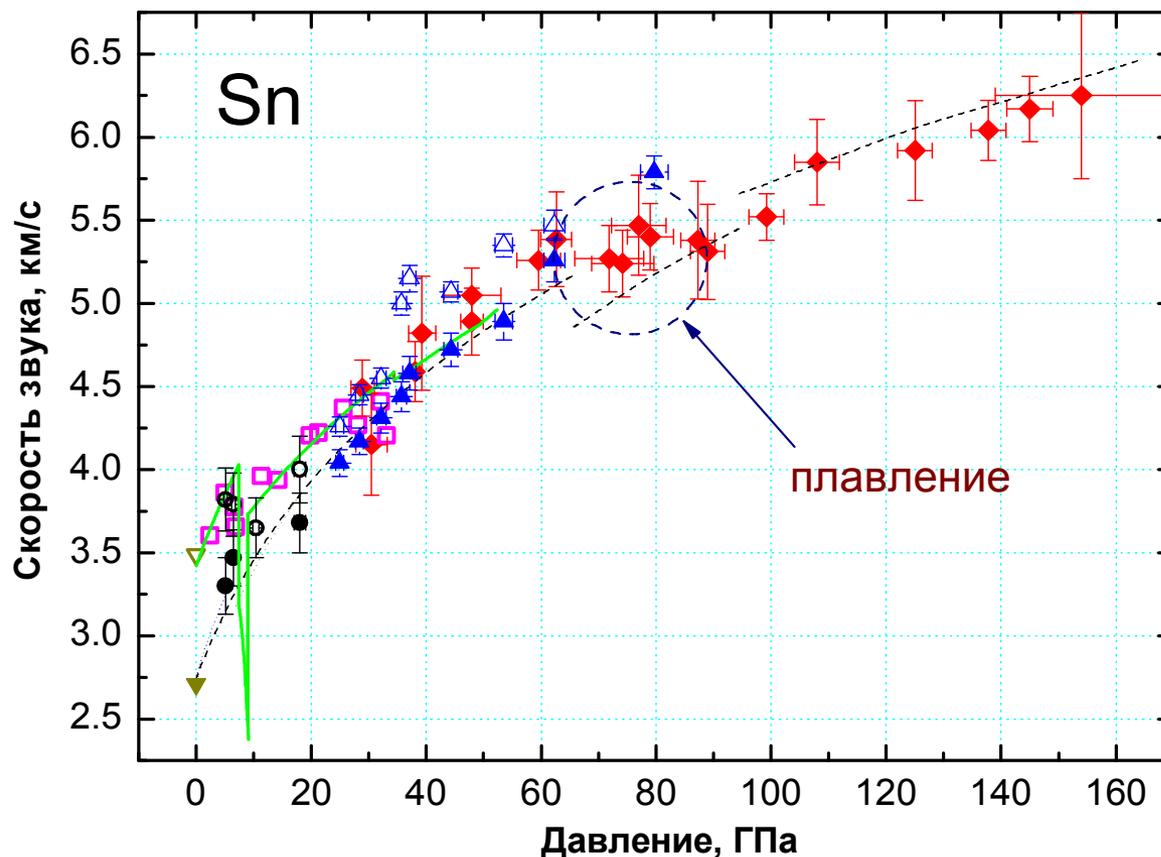
# Зависимость скоростей звука в ВТ-20 от давления



Состав ВТ-20:  
Al (5,5÷7,0%),  
Zr (1,5÷2,5%),  
Mo (0,5÷2,0%),  
V (0,8÷2,5%),  
Si (0,15%), Fe (0,25%),  
O (0,15%), H (0,015%),  
N (0,05%), остальное Ti

- - упругая (продольная) скорость звука (ультразвуковой метод, ВНИИЭФ ИФВ);  
○ - объемная скорость звука [Гатиллов Л.А.]; ▼ - данные настоящей работы;  
... - расчет изэнтропической скорости звука по УРС РФЯЦ-ВНИИЭФ ИТМФ

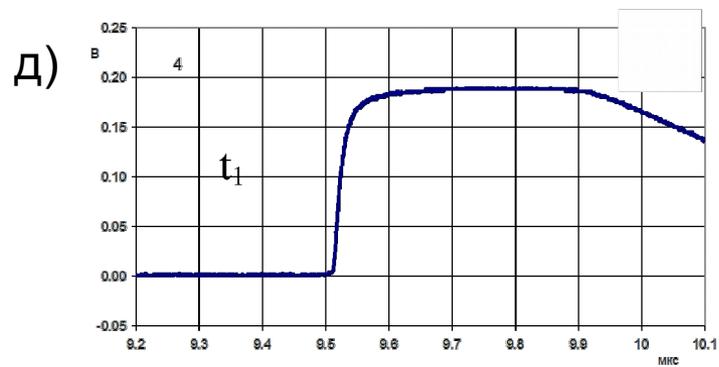
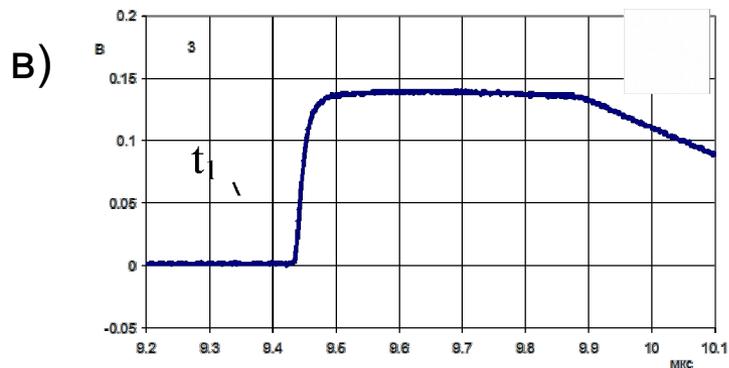
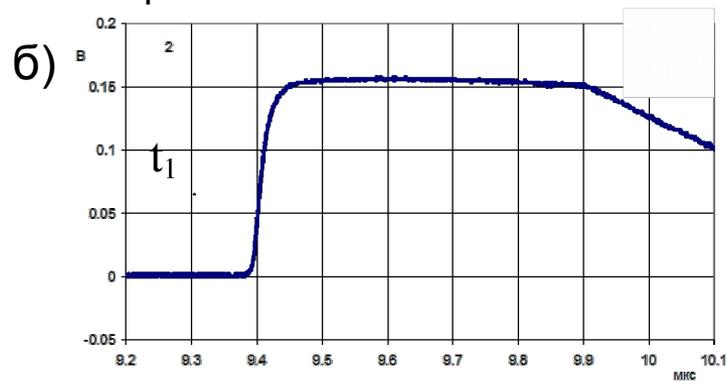
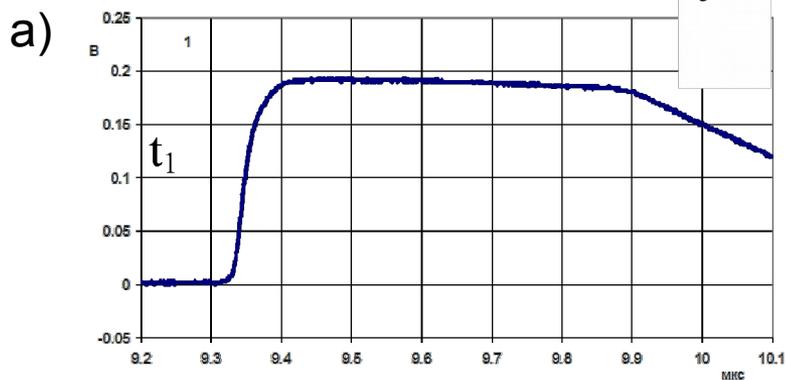
# Зависимость скоростей звука в олове от давления ударного сжатия



----- - расчёт по УРС [A. Cox]; ———— - расчёт по УРС [20];  
□ - скорость звука из [Hu Jianbo]; △, ▲ - скорость звука [Hu Jianbo]; ▼ - объемная  
скорость звука, ▽ - упругая (продольная) скорость звука (ультразвуковой метод);  
○, ● - скорость звука (манганин); ◆ - скорость звука («жидкий индикатор»)  
[М.В. Жерноклетов]

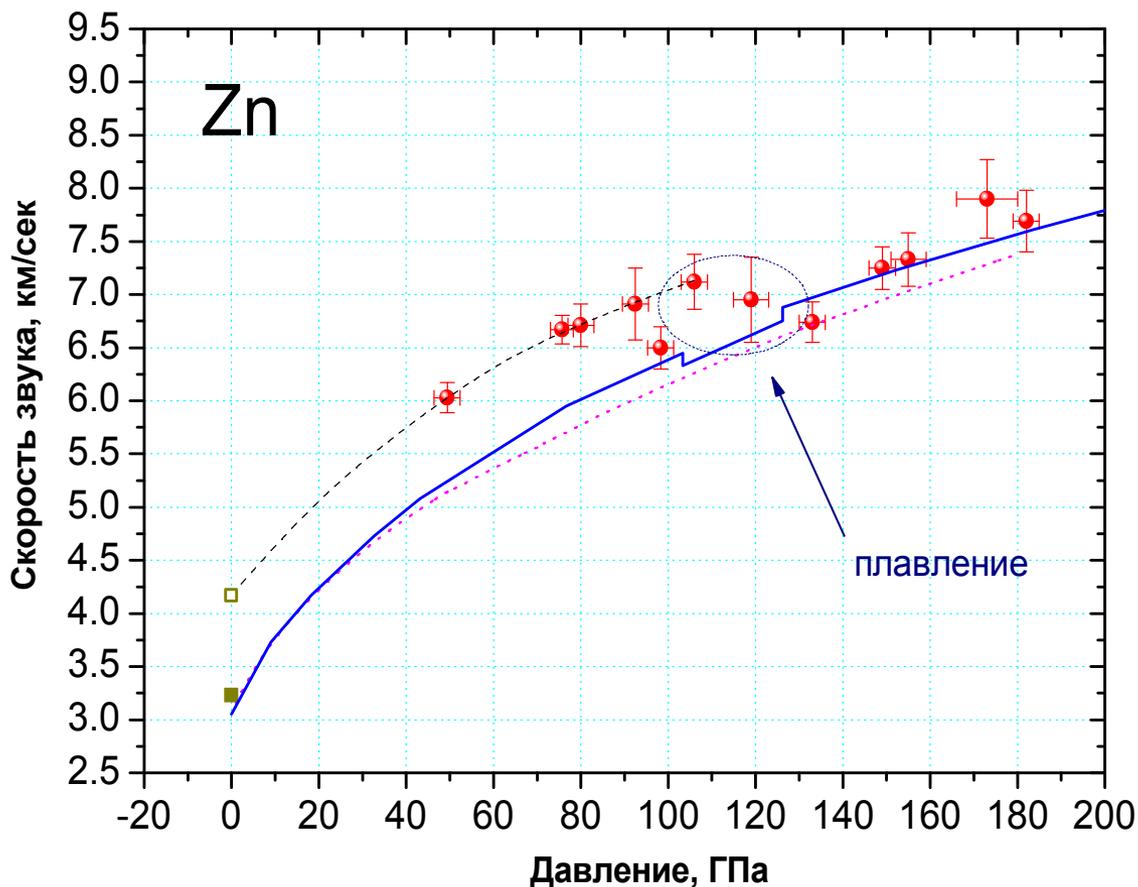
# ЦИНК

Излучение фронта ударной волны в  $C_8F_{16}$  при  $P_{Zn} = 149$  ГПа  
за ступеньками цинка



а) 1,97; б) 2,46; в) 2,96; г) 3,48 мм

# Зависимость скоростей звука в цинке от давления ударного сжатия



- - объемная скорость звука, □ - упругая скорость звука (ультразвуковые измерения), ● - ударно-волновые, --- - аппроксимация  $C_1$ , ..... - расчет [Жищенко], — - расчет по модифицированной модели Ван-дер-Ваальса [Медведев]

## Список основных публикаций

---

Статьи и доклады:

1. В.А. Борисенко, В.Г. Симаков, В.А. Волгин и др. Исследование фазовых превращений в железе и церию ПВДФ-датчиком давления // ФГВ, 2007, т.43, №4, с.121-126.
2. B.J. Jensen, F.J. Cherne, J.C. Cooley, M.V. Zhernokletov, A.E. Kovalev. Shock melting of cerium. Phys. Rev. B. 2010.v.81. (214109).
3. М.В. Жерноклетов, А.Е.Ковалев, В.В.Комиссаров, М.Г. Новиков, М.Э Зохер, Ф.Д Черны. Исследование фазовых превращений церию в ударно-волновых экспериментах. ЖЭТФ. 2011, том139.вып.2 стр.249-257.
4. М.В. Жерноклетов, А.Е.Ковалев, В.В.Комиссаров, М.Г. Новиков, М.Э Зохер, Ф.Д. Черны. Измерение скоростей звука за фронтом ударной волны в олове. ФГВ.2012, т.48. № 1 стр.123-129.

5. В.А. Борисенок , М.В. Жерноклетов, А. Е. Ковалев, А.М. Подурец, В.Г. Симаков, М.И. Ткаченко. Фазовые переходы в титане в ударных волнах в области давлений до 150 ГПа. ФГВ, 2014, т.50, №3 С. 113-121.
6. M.V. Zhernokletov, V.A. Borisenok, V.G. Simakov, V.A. Bragunets, E.E. Shestakov, A.M. Podurets, M.I. Tkachenko. Study of phase transition in cerium in shock-wave experiments. 11th International Conference on the mechanical and physical behavior of materials under dynamic loading. Lugano, Switzerland, 2015. p.01076.
7. М.В. Жерноклетов, А.Е. Ковалев, С.И. Киршанов, А.Б. Межевов, М.Г. Новиков, Л.И. Канунова. Измерения скоростей звука в цинке и сплаве титана оптическим методом. Конференция «Свойства материалов в экстремальных условиях», Барселона (Испания), 24-28.10.2011.

# Выводы

---

Полученные новые и имевшиеся ранее данные по кинематическим параметрам ударных волн совместно с результатами выполненных экспериментов позволили локализовать границы начала плавления на ударных адиабатах исследованных металлов с большей определенностью. Двухволновые структуры, которые зарегистрированы на профилях давления церия и титана ПВДФ и манганиновыми датчиками свидетельствуют либо о расщеплении ударных волн на упругие и пластические волны, либо о прохождении фазовых переходов.

**Спасибо за внимание**