



Забабахинские научные чтения  
18-22 марта 2019  
Снежинск, Россия



РОСАТОМ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

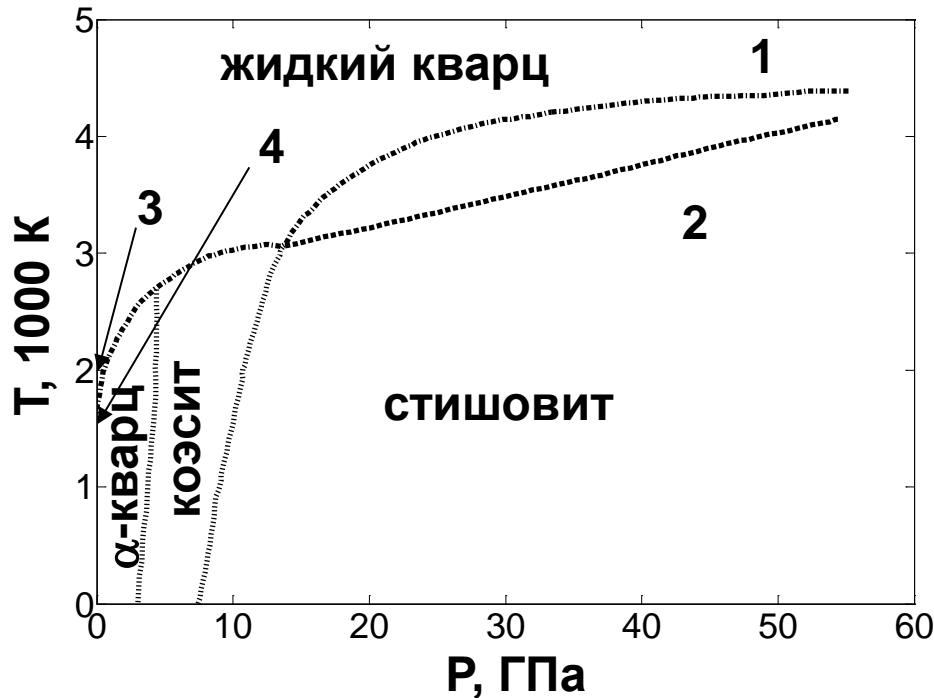
# РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ КВАРЦИТА

М.Г. Коваленко, Д.М. Шалковский, А.В. Петровцев,  
А.В. Павленко, С.Н. Малюгина, Д.Т. Юсупов

*ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр –  
Всероссийский Научно-Исследовательский Институт  
Технической Физики имени академика Е.И. Забабахина»  
г. Снежинск Челябинской обл., Россия*

# Кратко о кварците

## Фазовая диаграмма кварца\*



- 1 – линия плавления для статических измерений
- 2 – линия плавления для ударно-волновых измерений
- 3 – кристобалит
- 4 – тридимит

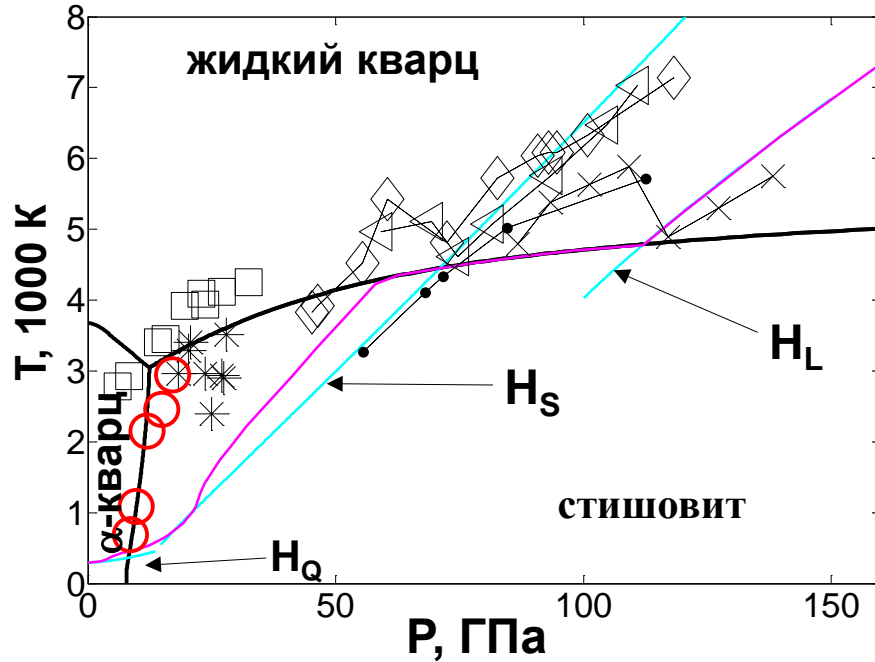
## Трудности исследования:

- Сложная фазовая диаграмма с различными линиями плавления для статических и ударно-волновых измерений
- Возможность образования высокоплотных аморфных фаз кварца
- Сильно неравновесный характер превращения  $\alpha$ -кварца в стишовит
- Большая протяженность области смеси фаз на ударной адиабате
- Низкая скорость фазового превращения
- Различный химический состав образцов и размер зерна
- Многоволновая структура ударной волны
- Резкая потеря прочности при превышении значения критической деформации
- Высокое значение скорости звука в ударно сжатом материале

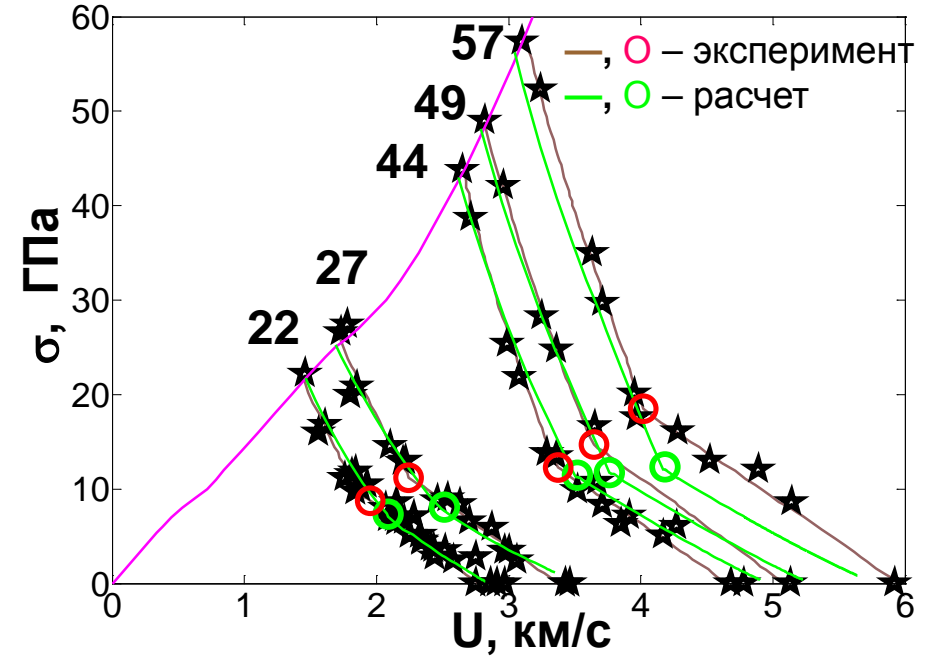
\* - Hemley R.J., High-Pressure Behavior of Silica. In Silica: Physical Behavior, Geochemistry and Materials Applications. Reviews in Mineralogy, Vol. 29, pp.41-82, Mineralogical Society of America, Washington, D.C. (1994).

# Описание модели: УРС и фазовая диаграмма

## Расчетная фазовая диаграмма



## Разгрузка в буферные материалы



- Для описания термодинамических свойств кварцита используется многофазный УРС
- Положение линии равновесия кварц-стишовит уточнено по результатам экспериментов по разгрузке ударно сжатого кварца в буферные материалы

— - линии фазового равновесия, рассчитанные по УРС (AIP Conf. Proc. V.849, pp380-392)

— - ударная адиабата с учетом фазовых превращений и прочности

★ - Жугин Ю.Н. препринт РФЯЦ-ВНИИТФ №151

\* - K.I. Kondo, T.J. Ahrens, J. Appl. Phys., V.54, pp.4383-4385, (1983).

◇, ● - R.G. McQueen, J.N. Fritz, J.W. Hopson, Physics of solids under high pressures, 1981, 99-108.

△, × - G.A.Lyzenga, T.J.Ahrens, A.C.Mitchell, J. Geoph. Res., 1983, v.88, N33, pp.2431-2444.

□ - Hemley R.J.Reviews in Mineralogy, Vol. 29, pp.41-82, (1994).

# Описание модели: фазовые переходы

Концентрация  $i$ -той фазы -  $\xi_i$ , где  $\sum_i \xi_i = 1$

Уравнение состояния  $i$ -той фазы:  $P_i = P_i(\rho_i, E_i)$ ,  $T_i = T_i(\rho_i, E_i)$

Потенциал Гиббса  $i$ -той фазы:  $\Phi_i(P_i, T_i) = E_i + P_i V_i - T_i S_i$

Условия термомеханического равновесия:  $T_i = T_j = T$ ,  $P_i = P_j = P$

Смесевые соотношения:

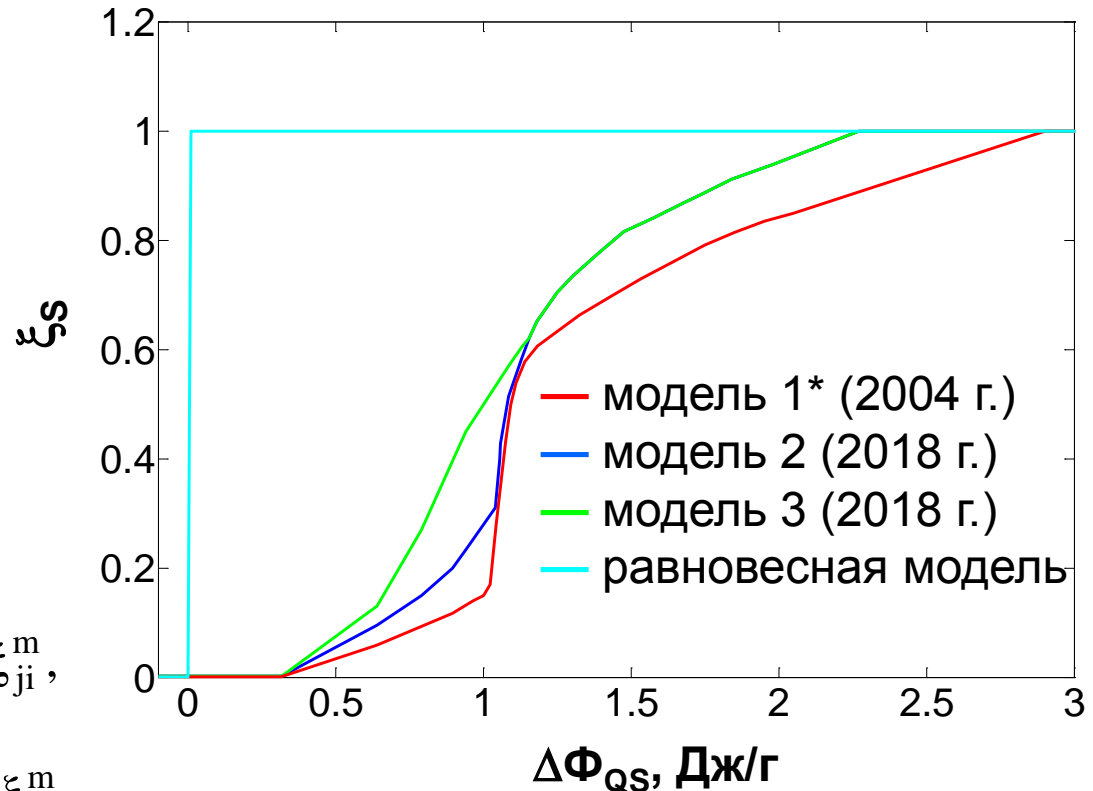
$$V = \xi_i V_i(P, T) + \sum_{j \in Q_i} \xi_j V_j(P, T)$$

$$E = \xi_i E_i(P, T) + \sum_{j \in Q_i} \xi_j E_j(P, T)$$

наработка  $i$ -той фазы:

$$\frac{d\xi_i}{dt} = \sum_{j \in Q_i} J_{j \rightarrow i}$$

$$J_{j \rightarrow i} = \begin{cases} \frac{\xi_{ji}^m (\Delta\Phi_{ji}) - \xi_i}{t_{ji}(\Delta\Phi_{ji}, \xi_i)}, & \xi_i < \xi_{ji}^m, \\ 0, & \xi_i = \xi_{ji}^m, \end{cases}$$



# Описание модели: упругопластическая деформация

Уравнение Прандтля-Рейса  $\dot{S}_{ij} + \lambda S_{ij} = 2\mu\dot{\epsilon}_{ij} - S_{ik}\dot{\omega}_{kj} - S_{jk}\dot{\omega}_{ki}$  ,

с условием текучести Мизеса  $J_2 \leq Y$ .

Предел текучести  $Y = Y(P, T, \epsilon, \dot{\epsilon}^p, \xi)$ .

Для однофазного материала  $Y = Y(\rho, T, \epsilon^p, \dot{\epsilon}^p) = Y_0(T, \epsilon^p, \dot{\epsilon}^p) \frac{\mu(\rho, T)}{\mu_0}$

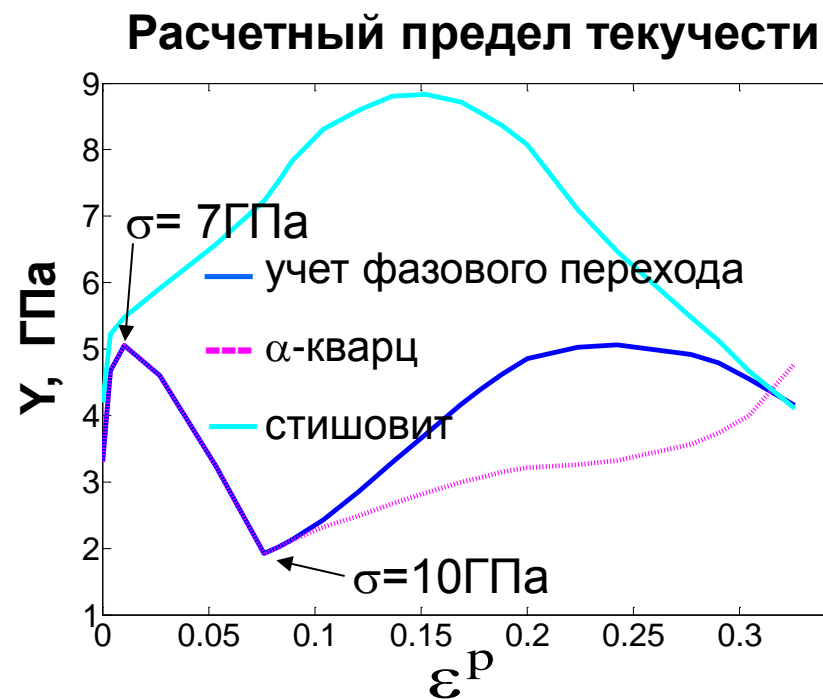
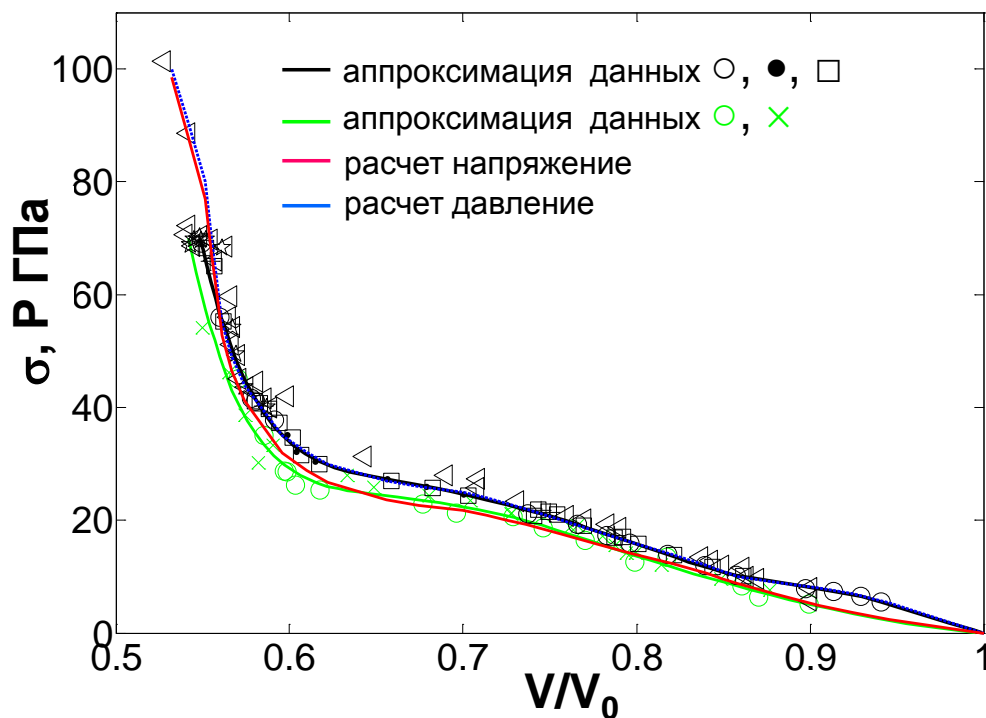
Модуль сдвига зависит от давления (плотности) и температуры<sup>1</sup>:

$$\mu = \mu_0 (1 + AP/\delta^{1/3} - B(T - T_0))$$

Нормированный предел текучести  $Y_0(T, \epsilon^p, \dot{\epsilon}^p) = Y_A(\epsilon^p) + Y_R(T, \epsilon^p, \dot{\epsilon}^p)$ ,

$$Y_A(\epsilon^p) = \begin{cases} \left(1 - \frac{\epsilon^p}{\epsilon_A^p}\right) \min \left\{ Y_{A01} \left(1 + \beta_1 (\epsilon^p + \epsilon_{A01})\right)^{n_1}, Y_{Amax} \right\} + \frac{\epsilon^p}{\epsilon_A^p} \min \left\{ Y_{A02} \left(1 + \beta_2 (\epsilon^p + \epsilon_{A02})\right)^{n_2}, Y_{Amax} \right\}, & \epsilon^p < \epsilon_A^p, \\ \min \left\{ Y_{A02} \left(1 + \beta_2 (\epsilon^p + \epsilon_{A02})\right)^{n_2}, Y_{Amax} \right\}, & \epsilon^p > \epsilon_A^p. \end{cases}$$

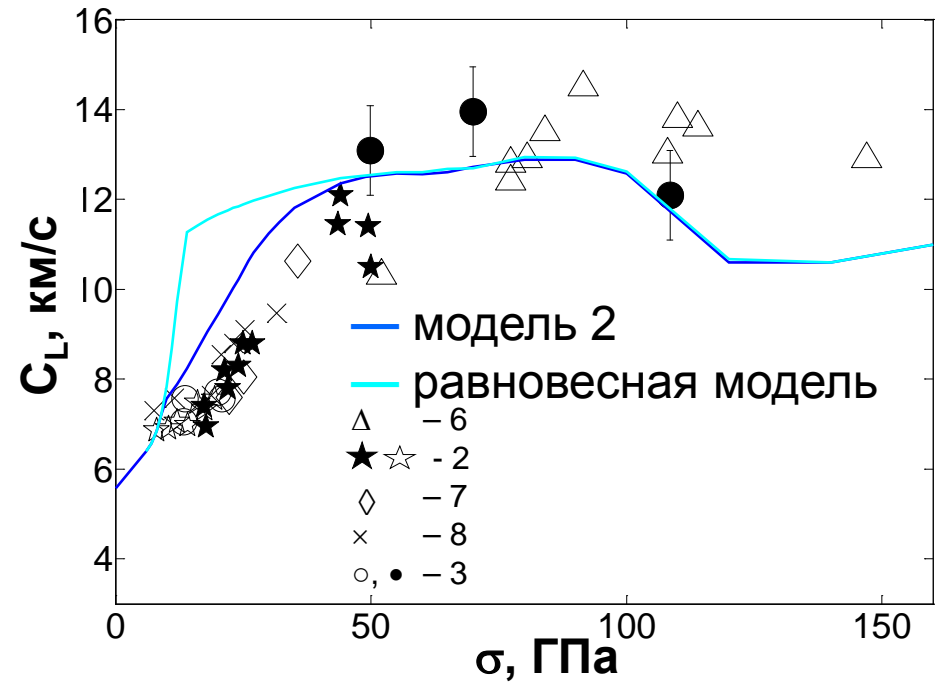
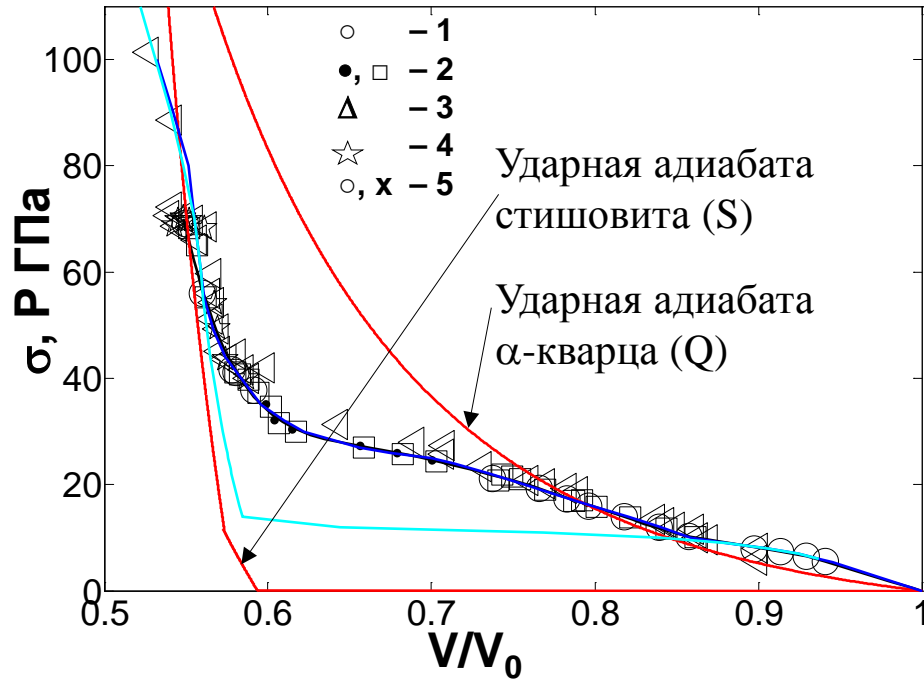
# Выбор параметров модели упругопластического деформирования кварцита



- Данные описываются в модели с учетом начального деформационного упрочнения, сдвигового разрушения и фазовых изменений.
- Величина сдвиговой прочности определена сравнением УП и ГД ударных адиабат.

- – Трунин Р.Ф., Симаков Г.В. и др. Изв. АН СССР, Физика Земли, 1, 13 (1971).
- , □ – Жугин Ю. Н. Препринт РФЯЦ-ВНИИТФ №151
- △ – Chhabildas, L.C. SCCM-1995. Part 1, pp.601-605.
- ☆ – LASL Shock Hugoniot Data, 1980
- , x – Жугин Ю.Н., Крупников К.К. и др. Изв. АН СССР, Физика земли, 10, 16-22 (1994)

# Ударно-волновые свойства

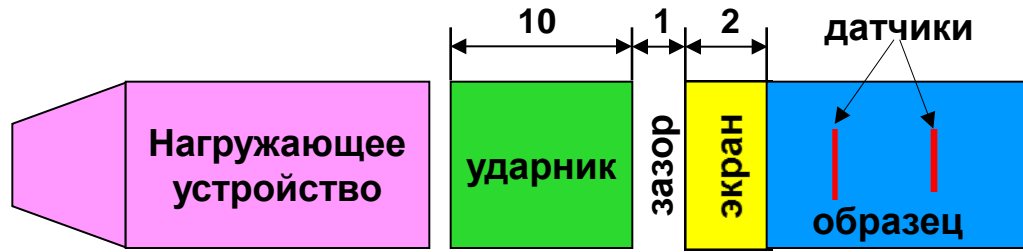


- Разработанная модель достаточно точно передает все особенности ударной сжимаемости кварцита, связанные с упругопластической деформацией, полиморфным Q-S превращением и плавлением
- Модель описывает изменение упругих модулей вдоль ударной адиабаты

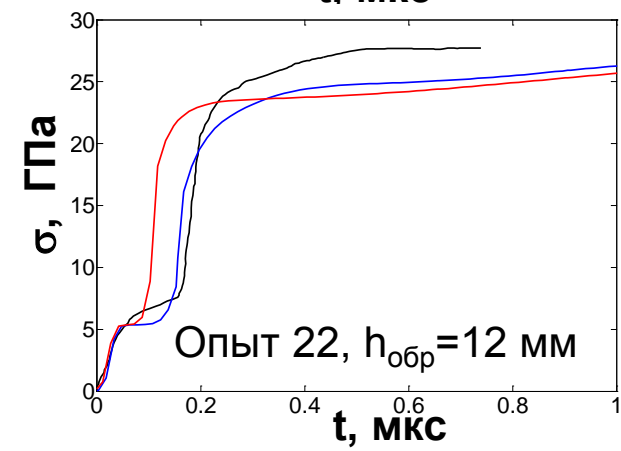
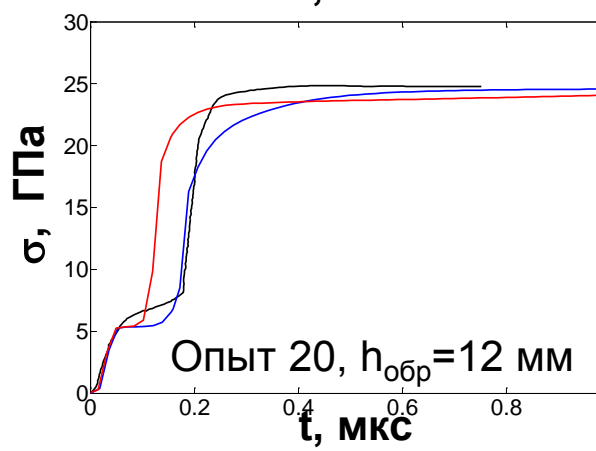
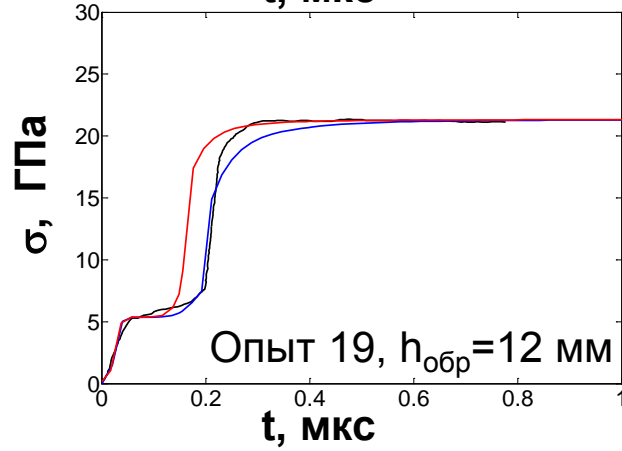
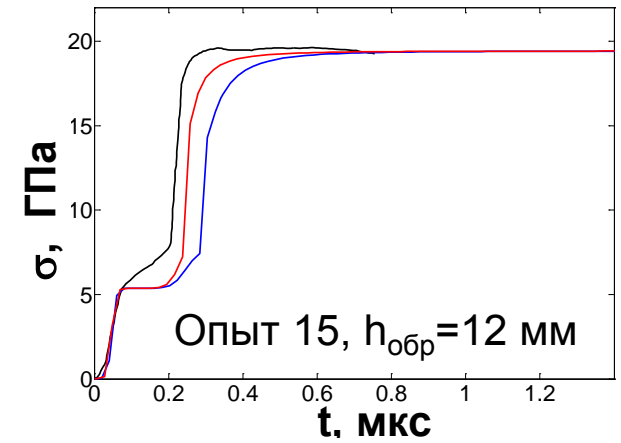
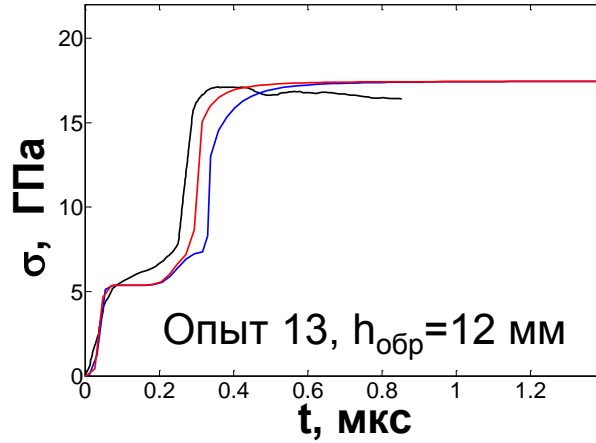
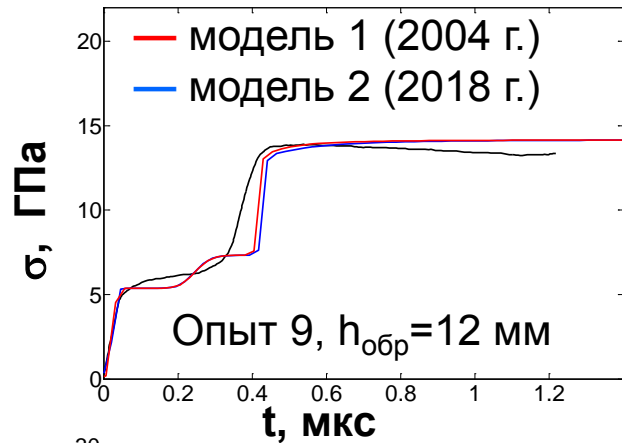
- 1 – Трунин Р.Ф., Симаков Г.В. и др. Изв. АН СССР, Физика Земли, 1, 13 (1971).
- 2 – Жугин Ю. Н. Препринт РФЯЦ-ВНИИТФ №151
- 3 – Chhabildas, L.C. SCCM-1995. Part 1, pp.601-605.
- 4 – LASL Shock Hugoniot Data, 1980
- 5 – Жугин Ю.Н., Крупников К.К. и др. Изв. АН СССР, Физика земли, 10, 16-22 (1994)
- 6 – McQueen, R.G. SWCM-1991 pp.75-78.)
- 7 – Grady, D.E., Murri, W.J., DeCarli, P.S. J. Geophys. Res., 80 (35), 4857-4861 (1975).
- 8 – Павловский М.Н. ПМТФ (5), 136-139 (1976).

# Взрывные эксперименты Ю.Н. Жугина. Методика манганинового датчика

Схема постановки экспериментов



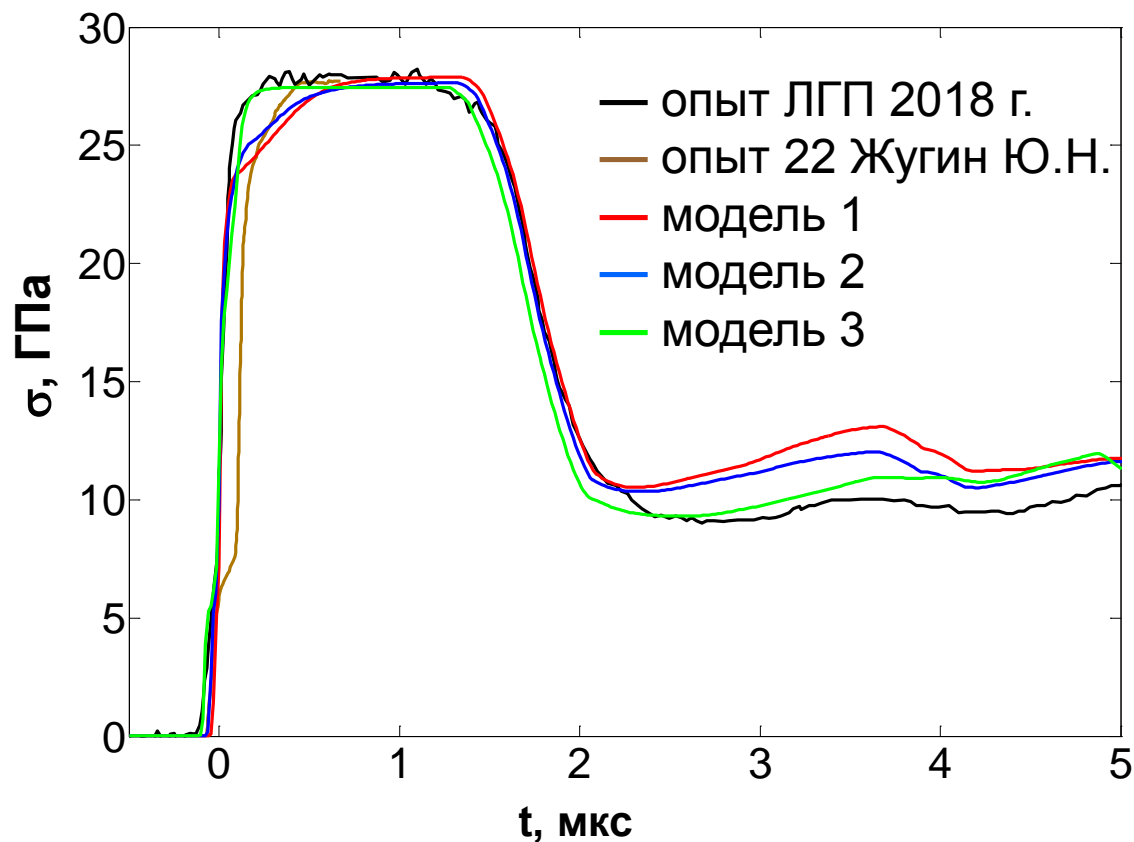
№ опыта	$\sigma$ , ГПа	Ударник	$W_y$ , км/с	Экран
9	14.16	Ф-4	2.47	Cu
13	17.46	Cu	1.62	Cu
15	19.43	Cu	1.78	Cu
19	21.33	Al	2.58	Al
20	24.62	Al	2.84	Al
22	27.41	Ф-4	4.25	Al



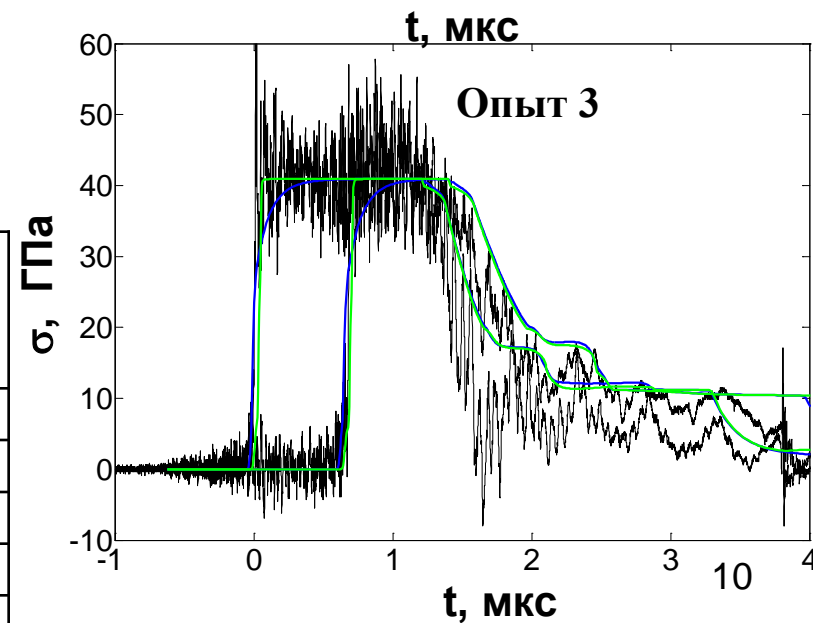
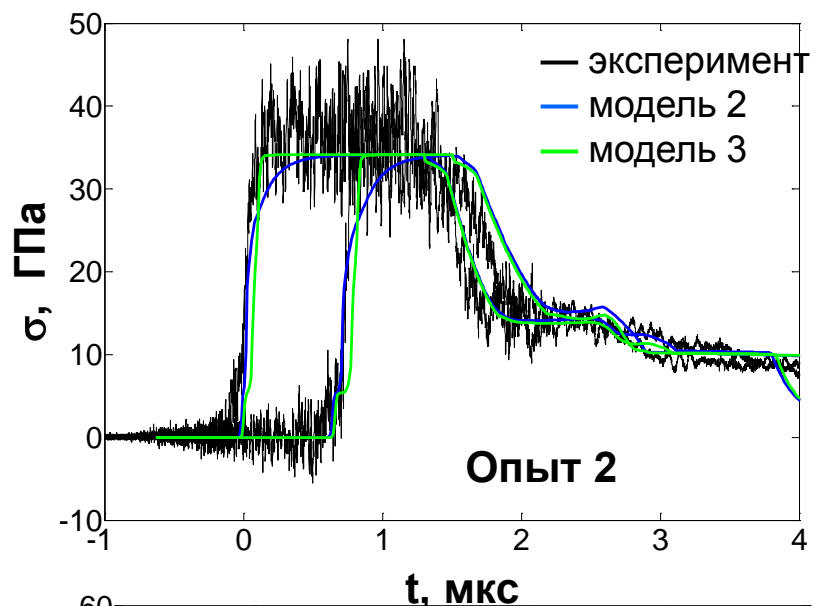
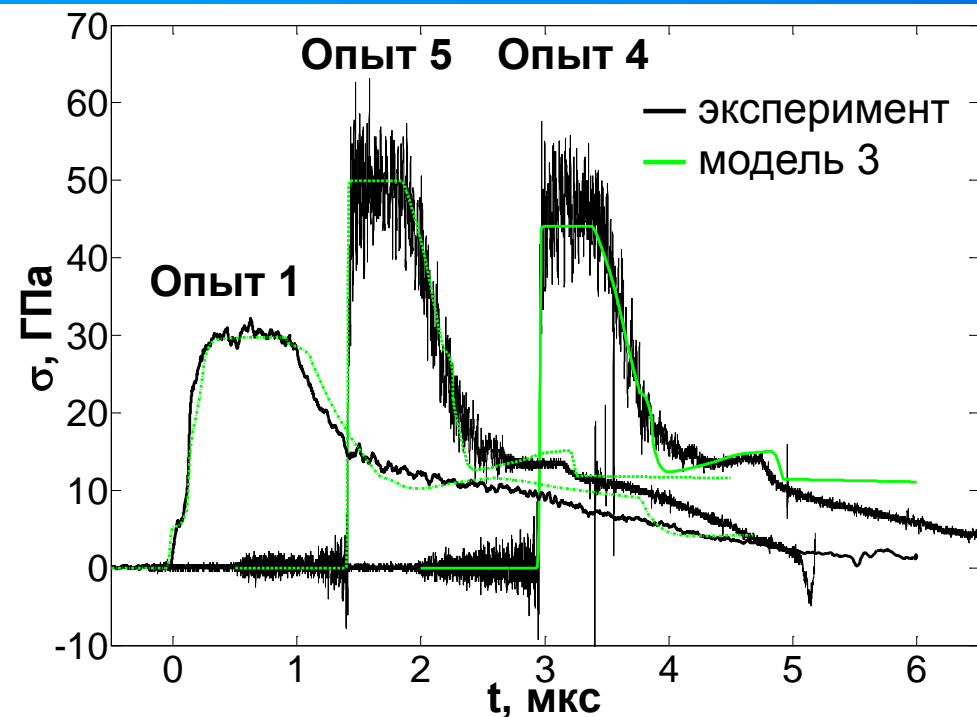


# Опыт 2018 г. на легко-газовой пушке калибра 50 мм. Методика манганинового датчика.

Нагружающая система	$\sigma$ , ГПа	Ударник				Образец 1, мм	Образец 2, мм
		Тип	Материал	толщина	Скорость, км/с		
ЛГП	28.09	составной	Полиэтилен сталь	10 6	2.552	4	20
Взрывной	27.41	простой	Ф-4	12	4.250	12	8



# Эксперименты 2018-19 с разгоном ударника зарядом ВВ. Методика манганинового датчика

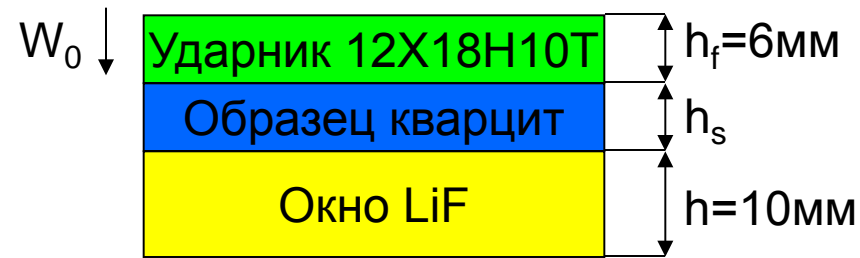


Ударник Образец 1 Д Образец 2 Д Образец 3 Экран

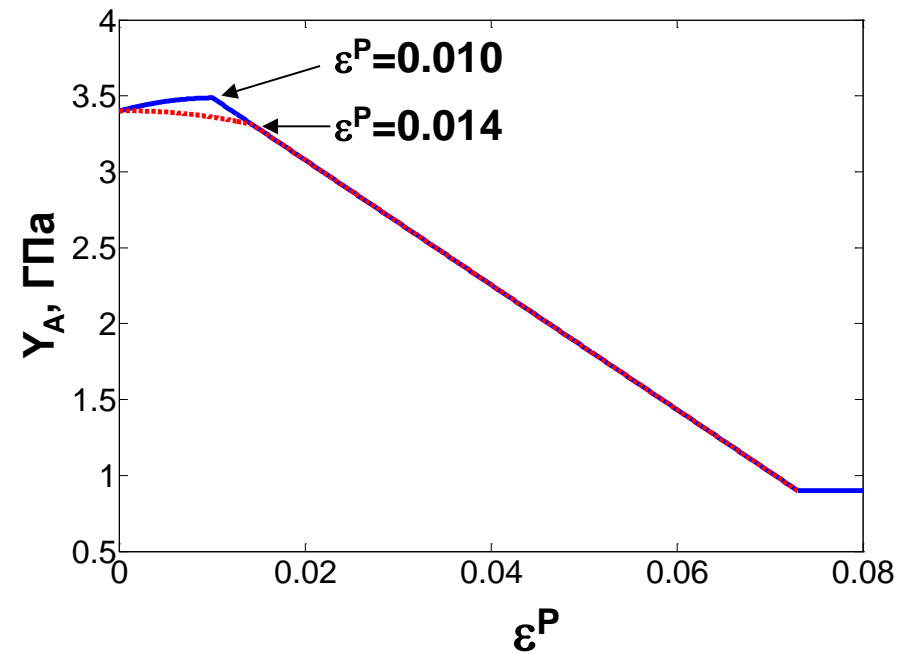
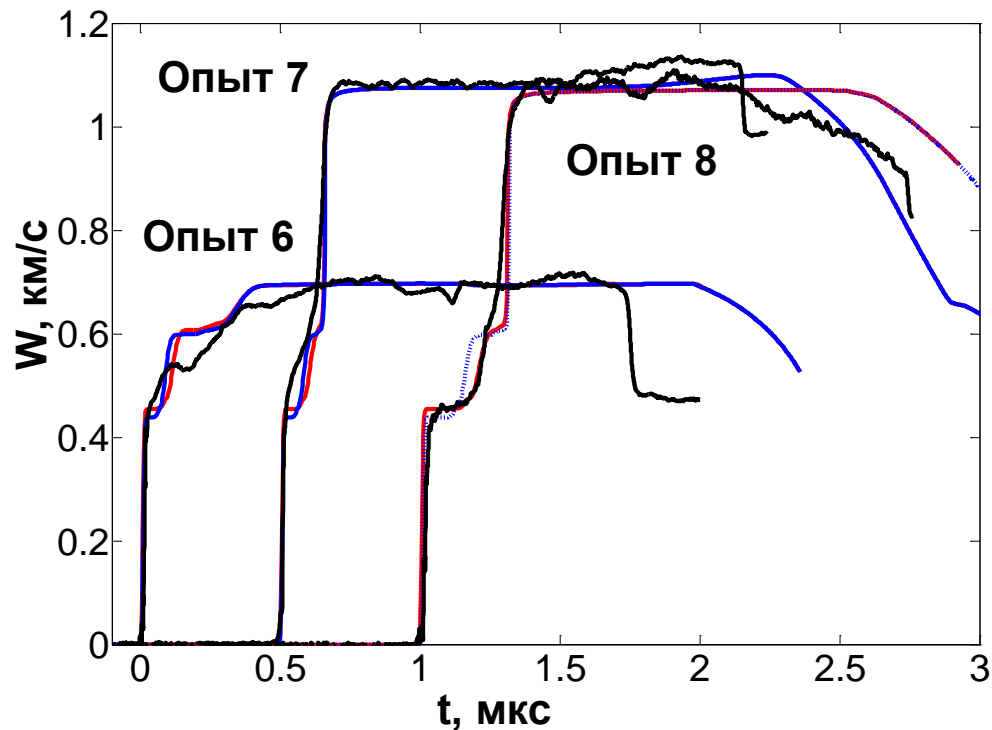
№ Опыта	Ударник			Образец			экран	$\sigma_{\max}$ , ГПа
	материал	$h_f$ , мм	$W_f$ , км/с	$h_1$ , мм	$h_2$ , мм	$h_3$ , мм		
1	Al	8	3.56	8	20	—	+	29.74
2	Al	8	4	4	4	8	—	34.10
3	Al	8	4.5	4	4	8	—	40.86
4	Сталь	4	3.6	6	8	—	+	43.91
5	Сталь	4	3.9	6	8	—	+	48.58

# Эксперименты 2018 г на ЛГП с регистрацией скорости свободной поверхности в «окне» из LiF

Одномерная постановка расчетов



№ Опыта	$W_0$ , км/с	$h_s$ , мм	$\sigma_{\text{расч.}}$ , ГПа
6	0.783	4	8.0
7	1.242	4	13.5
8	1.235	8	13.5



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Представлена модель, позволяющая описать ударно-волновые свойства кварцита с учетом его сдвиговой прочности и изменений фазового состояния.
- Модель с высокой точностью воспроизводит ударную адиабату кварцита.
- Параметры модели определялись на основе сравнения результатов расчетов с экспериментальными профилями волн, полученными в ряде взрывных и ударно-волновых опытов.
- Полученная модель позволяет воспроизводить профили напряжений в ударно-волновых и взрывных опытах в диапазоне нагружающих импульсов от 10 до 50 ГПа.
- Необходимо получение более полной систематической экспериментальной информации для проверки модели. Такие работы в настоящее время проводятся