



# Высокоинтенсивные и кумулятивные процессы и явления (В и К П и Я)

*В.А. Симоненко  
РФЯЦ - ВНИИТФ  
им. Е.И. Забабахина*

***Нам не дано предугадать,  
как слово наше отзовется.***

***Ф. И. Тютчев***

Введение

1. Истоки

1. Становление и взлёт
2. Сунгульский десант

2. Сильные взрывные явления (СВ)

1. Сильные взрывы и кумулятивные явления
2. Сильные взрывы в плотных средах
3. СВ для исследований свойств веществ и процессов

3. Мегакумуляция в диссипативных средах

4. Микрокумулятивные явления

Заключение



20 марта 2017 г.

ЗНЧ - 2017, Снежинск

# Введение

1. Высказанная плодотворная идея начинает жить своей жизнью. Ей повезло, если она попала в среду, в которой она может «прирастать» другими идеями и быть использованной. Ей особенной повезло, если некоторое время на её развитие влияет автор.
2. Иногда как новая воспринимается полузабытая, слабо востребованная идея – **коллапс пузырька в несжимаемой жидкости** (Besant, 1859; Rayleigh, 1917). Новое время ставит для неё новые задачи и открывает новые возможности для использования. У такой идеи есть первый автор, но видят и воспринимают её в облике второго рождения – **коллапс полости в сжимаемой среде**.

3. Такая благоприятная атмосфера для работы естественно складывалась под влиянием Евгения Ивановича. Мне представляется, что мы продолжаем ощущать это и в настоящее время, о чём
4. Рассматриваются некоторые идеи, высказанные, привитые нам Е.И. Забабахиным или навеянные обсуждением с ним. Показаны пути их развития.
5. Принята форма свободного краткого изложения темы – эссе (с научным содержанием).
6. Все темы «генетически» связаны.

### **Справка**

*Эссе (франц. essai - опыт, набросок) – жанр философской, литературно-критической, историко-биографической, публицистической прозы, сочетающий индивидуальную позицию автора с непринужденным изложением, ориентированным на импровизационное восприятие .*

# ИСТОКИ



20 марта 2017 г.

ЗНЧ - 2017, Снежинск

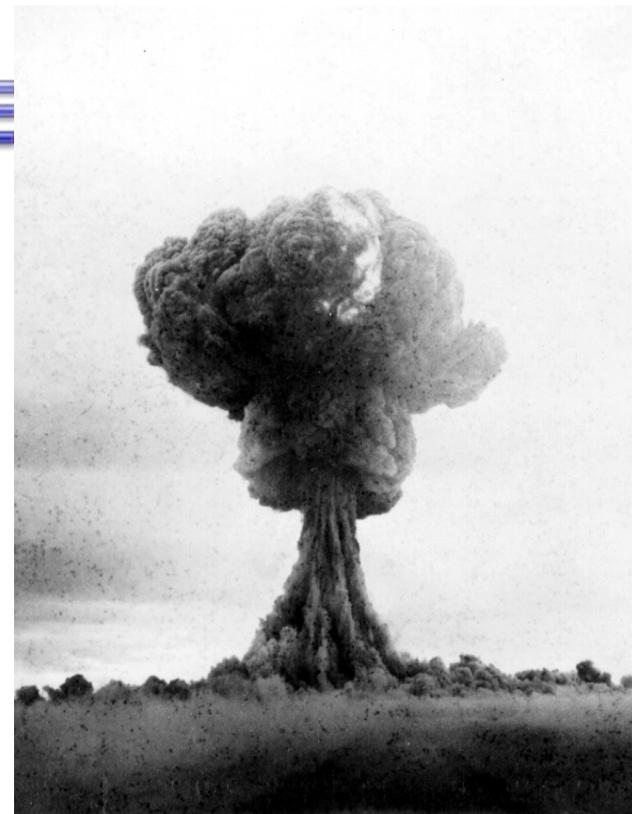
# Истоки и поток

- 1944-1947 гг. – кафедра баллистики ВВАИ им. Жуковского. 1947 г. Диссертация «**Исследования процессов в сходящейся детонационной волне**».
- Конец 1947г. – начало 1948 г. преподаватель кафедры баллистики, младший научный сотрудник ИХФ.
- С апреля 1947 г. – младший научный сотрудник КБ-11.

## **Уровень знаний**

1. Л. Ландау, Е. Лифшиц, *Механика сплошных сред*, ОГИЗ, 1944 г.
2. G. Guderley, *Strake kugelige und zylindrische Verdichtungsstosse in der Nane des Kugelmittelpunktes bzw. Der Zylinderachse*, *Luftfahrtforschung* 19, №9 (1942).
3. Л.Д. Ландау и К.П. Станюкович, *Автомодельная сходящаяся ударная волна*, 1944 г., опубликовано в книге К.П. Станюковича *Неустановившиеся движения сплошной среды*, М., Гостехиздат, 1955.
4. Л.Д. Ландау, К.П. Станюкович. *Об изучении детонации конденсированных ВВ // ДАН СССР. 1945. Т. 46, №9. С 399-402.*

# СТАНОВЛЕНИЕ И ВЗЛЁТ (1948-1955)



**Взрыв РДС-1**



**Приборная башня на  
испытательном  
полигоне**



**ЗНЧ - 2017, Снежинск**

20 марта 2017 г.

# Первые результаты (1948-51 гг.)

- Развитие приближённых методов расчетов гидрогазодинамических (ГД) течений в плотных средах\*:
  - Задачи: описание детонационных (ДВ) и ударных волн (УВ), передачи энергии от слоя к слою, включая ВВ, полёт слоя и оболочки, столкновение слоёв и др..
  - Методы: несжимаемые оболочки, акустическое приближение, сильные волны, автомодельная фокусировка ударной волны,, автомодельное движение сжимаемой оболочки.
- Описание свойств ВВ и реальных материалов в высокоинтенсивных ГД процессах. (*Е.И. Забабахин. Некоторые вопросы газодинамики взрыва, Снежинск, 1997 г.*)
- Применения при расчётах:
  - экспериментальных макетов и системы РДС-1,
  - экспериментальныхборок (плоских и сферических) для измерений ударной сжимаемости,
  - обоснования нового типа ГД-систем – предложение Л.В. Альтшулер, Е.И. Забабахин, Я.Б. Зельдович, К.К. Крупников (АЗЗК). *Ю.Б. Харитон, Ю.Н. Смирнов, Мифы и реальности советского атомного проекта (Арзамас-16, 1994)* ЗНЧ - 2017, Снежинск

# Эти работы стимулировали

1. Развитие вычислительных методов и создание вычислительных комплексов

2. Развитие теоретических исследований

1. Высокоинтенсивных и кумулятивных (ВиК) процессов, их устойчивости и эволюции;
2. Термодинамических (ТД) свойств веществ (широкодиапазонных уравнений состояния) и свойств диссипативных процессов, процессов переноса, ведущих к нарушениям адиабатичности и локального ТД равновесия.

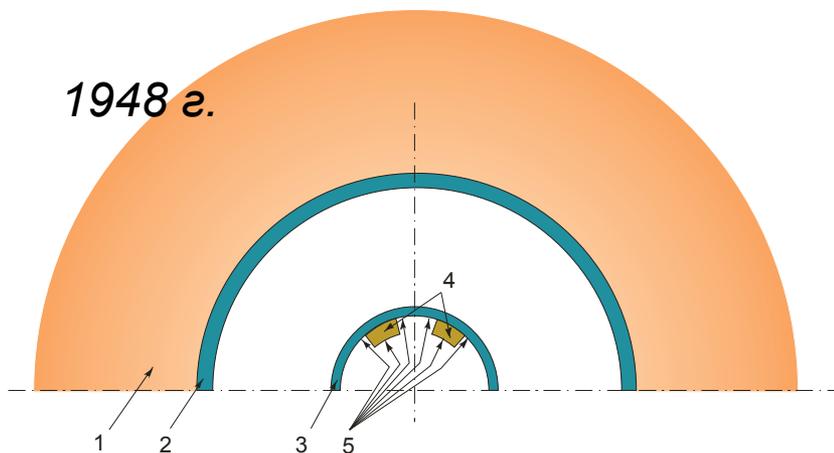
3. Развитие экспериментальных исследований и разработка новых применений высокоинтенсивных и кумулятивных процессов и явлений.

4. Изучение их проявлений в природе.

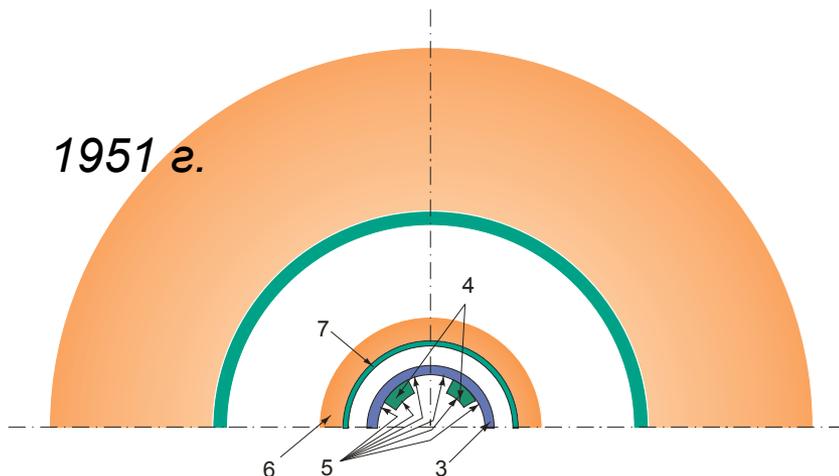
*Характерной особенностью этих и последующих работ Е.И. и его окружения была их практическая направленность при высоком теоретическом уровне. Работы по п.4, в основном, проводились инициативно, а позже, в 1990-2005 гг., часть из них поддерживалась грантами МНТЦ.*

# Использование предложений АЗЗК в экспериментах по ударной сжимаемости

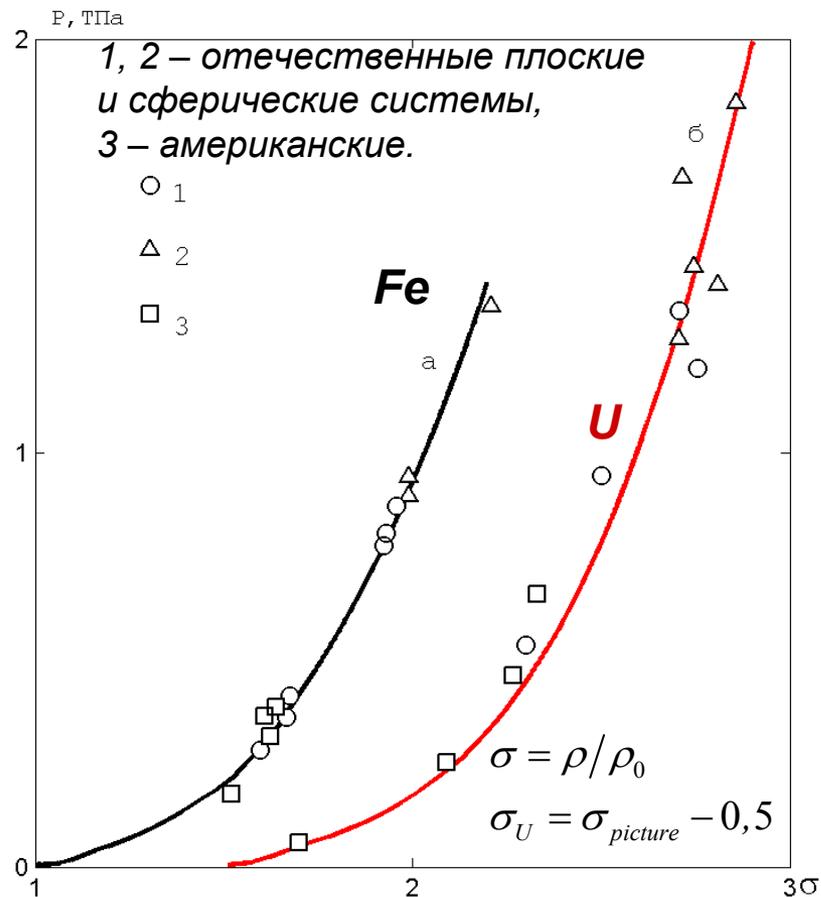
1948 г.



1951 г.



Л.В. Альтшулер, К.К. Крупников, Р.Ф. Трунин, Н.В. Панов, Взрывные лабораторные устройства для исследования сжатия веществ в ударных волнах, УФН, 1996, т.196, №5, с.575.



1. Л.В. Альтшулер, К.К. Крупников и др., ЖЭТФ, 34, с. 874, 1958.

2. Л.В. Альтшулер, А.А. Баканова, И.П. Дудолодов, М.И. Бражник и др., ЖЭТФ, 38 (3), 790, 1960.

Е. И. ЗАБАБАХИН

НЕКОТОРЫЕ  
ВОПРОСЫ  
ГАЗОДИНАМИКИ  
ВЗРЫВА

# Промежуточные ИТОГИ

- Методы и взрывные устройства для получения данных по ударной сжимаемости веществ.
- РДС-2 -1951 г.
- 1952-1953 лекции по газодинамики. Изданы в 1997 г.
- Уравнения состояния плотных сред; внимание к фазовым превращениям и прочностным свойствам веществ в динамических процессах.
- Каскадные и слоистые системы, периодическая слойка...
- РДС-6с – 1953 г.
- РДС-37 – 1955 г.

*Атомный проект СССР: документы и материалы. — Т. II, Атомная бомба. 1945—1954", книга 1, под общей редакцией Л.Д. Рябева.*

# Сунгульский десант



20 марта 2017 г.

ЗНЧ - 2017, Снежинск

13

# Явление кумуляции\*

1. **Кумуляция энергии** – существенное повышение плотности энергии  $\varepsilon_1$  в некоторой части системы (за счёт сжатия и/или повышения температуры), по сравнению с исходной  $\varepsilon_0$  путём самоорганизации или внешней организации течения при протекании процесса. Кумулятивные явления не ограничиваются МСС.
2. Кумуляция может существенно изменить характер протекания процесса, точнее привести к включению другого процесса.
3. Течения с кумуляцией являются подклассом автомодельных решений уравнений МСС, в том числе в активных и диссипативных средах (КТ).
4. Различаются изэнтропические и адиабатические КТ. В ряде случаев включение диссипативных процессов (вязкости, теплопроводности) видоизменяет протекание процесса, но сохраняет кумулятивность.

*Е.И. Забабахин, Ударные волны и их кумуляция. ЖЭТФ, 1957, т. 33, вып. 2(8).*

*Е.И. Забабахин, М.Н. Нечаев, Заполнение пузырьков в вязкой жидкости, ПММ, 1960, т. 24, вып. 6.*

*Е.И. Забабахин, Ударные волны в слоистых системах, ЖЭТФ, 1965, т. 49, вып. 2 (8).*

*Е.И. Забабахин, Кумуляция энергии и её границы, УФН, 1965, т. 85, вып. 4.*

*Е.И. Забабахин, Б.П. Мордвинов, Примеры стационарной неограниченной кумуляции, ЖЭТФ, 1965, т. 48, в. 1.*

*Е.И. Забабахин, В.А. Симоненко, Сходящаяся ударная волна в теплопроводном газе, ПММ, 1965, т. 29, № 2.*

*К.В. Брушлинский, Я.М. Каждан. Об автомодельных решениях некоторых задач газовой динамики// Успехи мат. Наук. 1983. Т. 18. Вып. 2(110).*

\* **Как явление народу.** (Более полно в докладе И.Е. Забабахина.)

## 5. Практические применения

5.1. Для понимания протекания процессов, упрощённых оценок результатов, для верификации моделей и кодов.

5.2. Для достижения состояний, недоступных в иных лабораторных экспериментах с целью изучения.

5.3. Для получения состояний, при которых включаются принципиально новые процессы (фазовые, химические превращения, деление или синтез).

5.4. Для понимания широкого спектра природных явлений

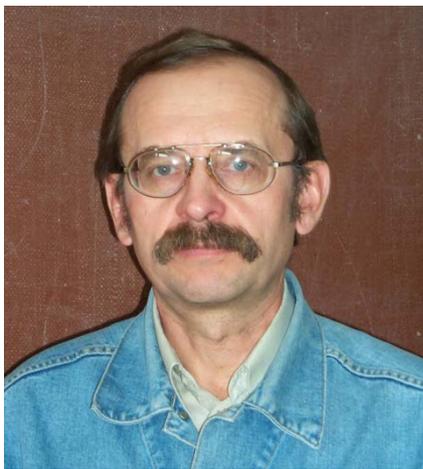
6. Первичными источниками энергии могут быть конденсированные ВВ, источники запасённой электромагнитной энергии, мощные лазерные системы, ядерная энергия (деления синтеза), кинетическая, гравитационная...

7. Кумулятивные режимы могут создаваться при внешних воздействиях в квазистационарных или периодических «СИЛОВЫХ» полях.

# Взгляд из прошлого



в уже свершившееся “будущее”



*А.В. Петровцев*

20 марта 2017 г.



*Г.В. Коваленко*

ЗНЧ - 2017, Снежинск

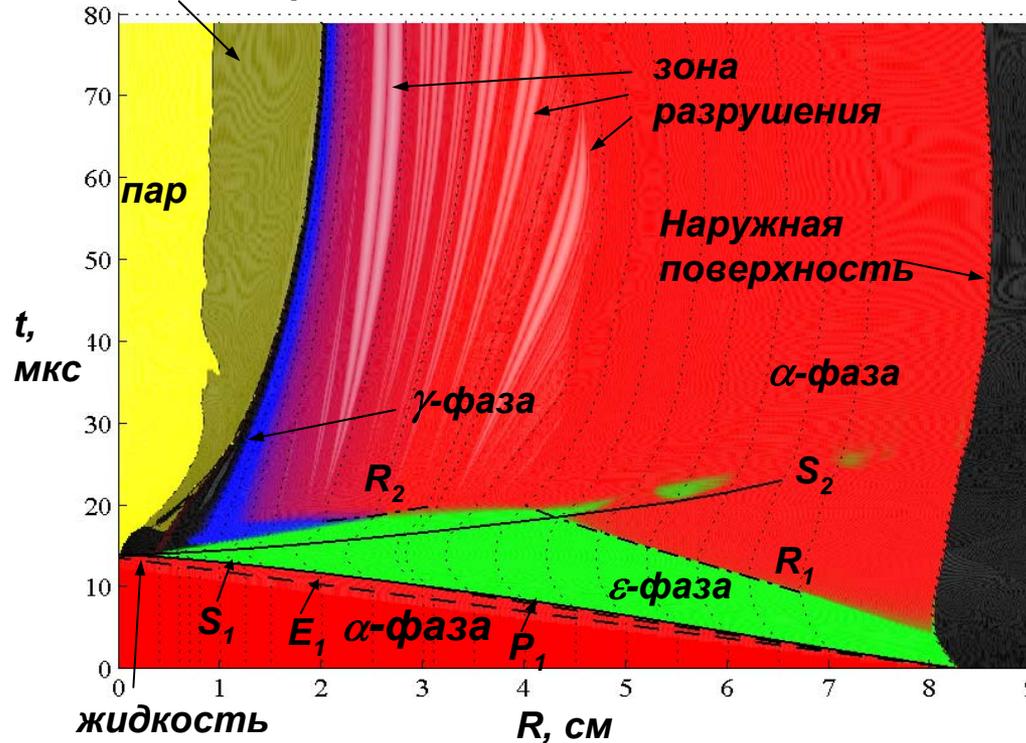


*Е.А. Козлов*



# Обжатие стального шара при сходящейся детонации в слое ВВ

Жидкость + пар



- Диаметр шара 166 мм.
- Детонация слоя ВВ создает «треугольный» импульс нагрузки на наружной поверхности шара.
- Возникающее к центру течение имеет многоволновую структуру  $E_1-P_1-S_1$ , зависящую от параметров нагрузки. Вещество переводится в высокоплотную  $\varepsilon$  фазу.
- На глубоком радиусе происходит плавление во фронте основной пластической волны  $S_1$
- При отражении от центра  $S_1 \rightarrow S_2$  возникает волна разрежения.

Происходит разгрузка вещества в волнах разрежения, движущихся с наружной поверхности и из центра. Вещество переходит в состояние пара, смеси пара и жидкости,  $\gamma$  фазы и, в основной части образца, --  $\alpha$  фазы.

- Ударные волны разрежения  $R_1$  и  $R_2$  образуются на участках разгрузки
- При взаимодействии волн разрежения протекают процессы образования повреждений. На завершающей стадии остановки системы происходит залечивание повреждений.

20 марта 2017 г.

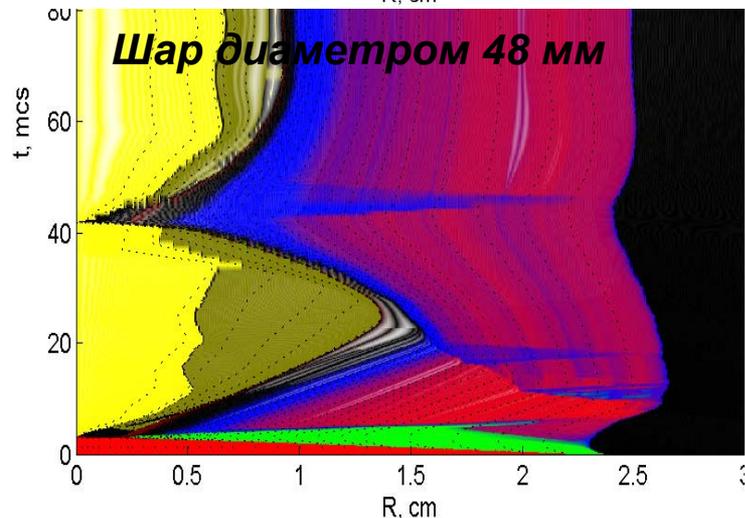
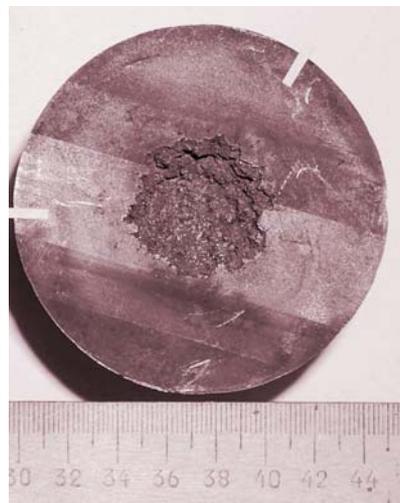
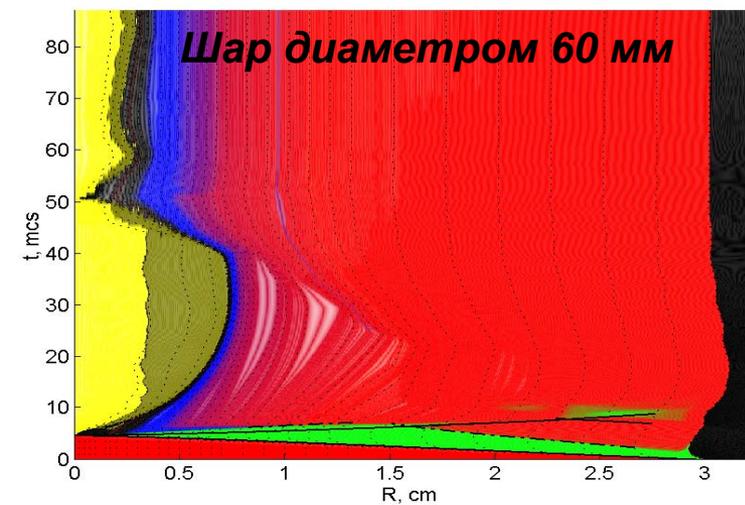
ЗНЧ 2017. Снежинск

17

<sup>1</sup> Г.В.Коваленко, Е.А.Козлов, А.В.Петровцев. XIII ЗНЧ, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006, с.129-136

<sup>2</sup> V.V.Dremov, G.V.Kovalenko, E.A.Kozlov, A.V.Petrovtsev, D.A.Varfolomeev et.al. SCCM-2007, AIP CP 955, 2008, pp.251-254

# Влияние интенсивности нагрузки на кумуляцию



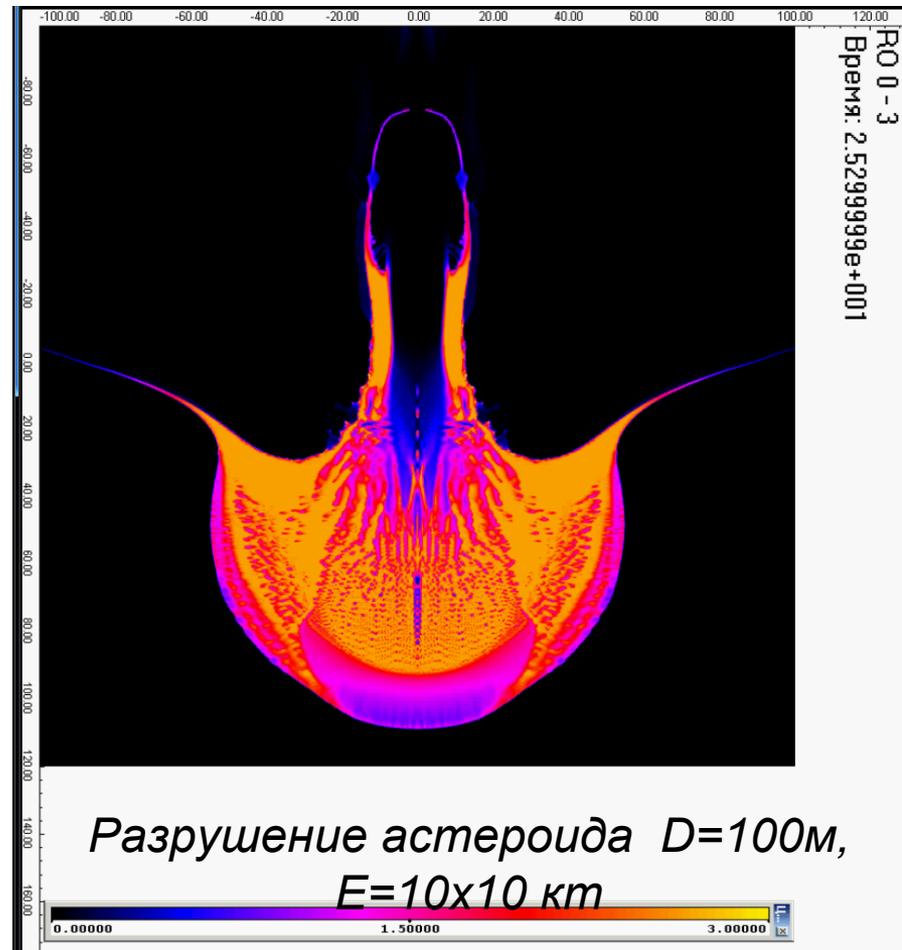
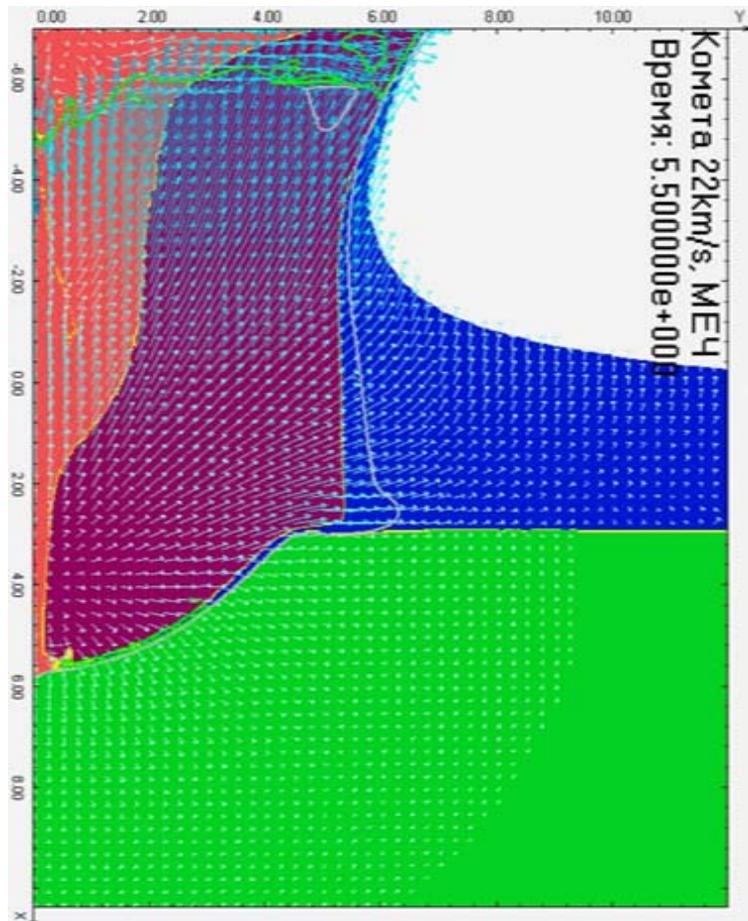
Образец		Ø60	Ø48
Остаточная деформация	Э:	1.016	1.024
	Р:	1.006	1.020
Область разрушения $R_{fr0} (\Delta R_{fr})$ , см	Э:	1.2 (1.6)	Везде
	Р:	1.2-1.7	1.5
Граница зоны рекристалл. материала $R_{rc0} (\Delta R_{rc})$ , см	Э:	1.1 (1.6) 0.7(1.85)	Везде
	Р:	1.1 0.7	Везде
Масса расплавленного железа, $M_{liq}$ , г	Э:	1.73	32.9
	Р:	4.1(4.8)	13.7 (37.0)

1. Более высокая интенсивность деформаций, повторная фокусировка полости.
2. Более интенсивный нагрев приводит к увеличению расплава и массы новой высокотемпературной  $\gamma$ -фазы.
3. Более интенсивное разрушение и неполное заживление повреждений.

20 марта 2017 г.

СПИЧ - 2017, Снежинск

# Сильные взрывные явления (СВЯ)



20 марта 2017 г.

ЗНЧ - 2017, Снежинск

19

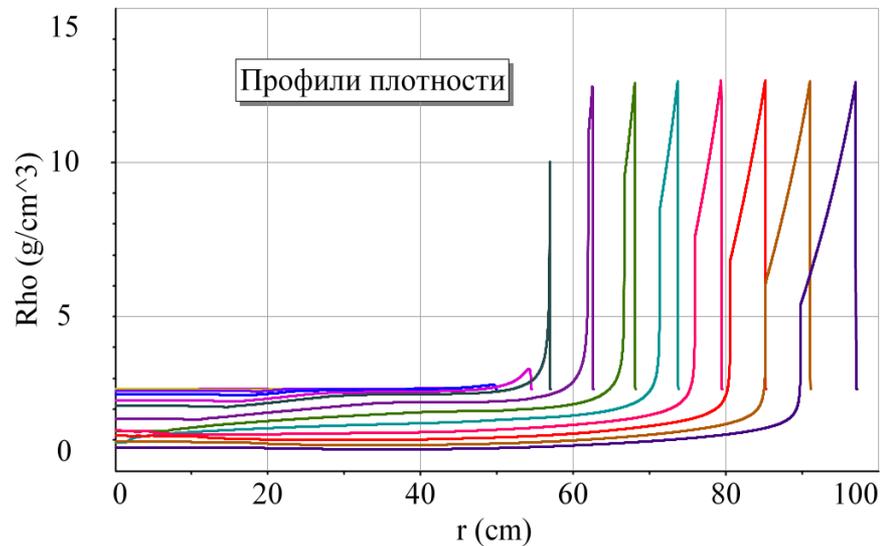
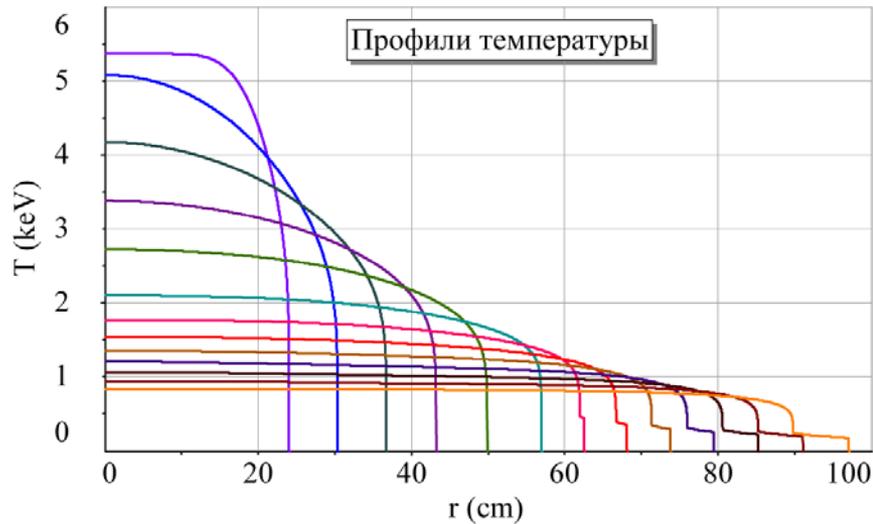
# СВ и кумулятивные явления (КЯ)

1. Особый интерес представляют кумулятивные явления, которые приводят к созданию условий для выделения большой дополнительной энергии и к большим превращениям в соответствующей области (в реакциях химических превращений, деления или синтеза ядер и др.).
2. Для общности такие явления будем называть **сильными взрывами** (СВ). Не будем интересоваться тем, что происходит в самих устройствах или в областях выделения энергии. Будем рассматривать сопровождающие процессы.
3. По характеру протекающих процессов к СВ примыкают явления, сопровождающие высокоскоростные удары (например, космических тел), либо фокусировку мощного лазерного импульса, разряд мощного электромагнитного заряда.
4. В ряде случаев при протекании таких явлений возникают кумулятивные процессы.

# СВ в воздухе

1. Процессы, сопровождающие сильные взрывы в воздухе, фактически синхронно с пониманием их публиковались. Они очень полно описаны в книге Я.Б. Зельдовича и Ю.П. Райзера. Тем не менее некоторые процессы, сопровождающие СВ, по инициативе Е.И. либо при его поддержке рассматривались в 1961 г. и позже. *Я.Б. Зельдович, А.С. Компанеец, К теории распространения тепла при теплопроводности, зависящей от температуры, в Сб., посвящённом 70-летию академика А.Ф. Иоффе, М.: Изд. АН СССР, 1950.*
2. Сильные взрывы в плотных средах. Необходимо было учитывать меньший линейный масштаб тепловой стадии, конденсированность состояния среды. В частности, были необходимы достаточно точные знания ТД свойств различных горных пород.

# Сильные взрывы в плотных средах



**Смена режима  
переноса энергии  
ТВ→УВ**

**Затухание тепловой  
волны**

**Формирование  
ударной**

# Свойства сред

- “Теплопроводность”
- Уравнения состояния

$$P = P_c(\rho) + P_T(\rho, T); \quad \varepsilon = \varepsilon_c(\rho) + \varepsilon_T(\rho, T)$$

$$\rho_0 c_0^2$$

**Газы**

**Конденсированные среды**

$$r_d = \left( E_0 / \rho_0 c_0^2 \right)^{1/3} \text{ -- динамический радиус взрыва}$$

$E_0$  -- энергия взрыва

# Тепловая волна → Ударная волна

- Смена режимов переноса энергии
  - Тепловой → газодинамический

$$r_{T \rightarrow G} = a(n, \gamma) \left( \frac{\kappa_0^2 E_0^{2n-1}}{B^{2(n+1)} \rho_0^{2n+2m+1}} \right)^{1/(6n-1)} .$$

$$P = B \rho T \quad \kappa_0 = 4l_0 c a / 3 \quad l = l_0 T^{n-3} / \rho^m$$

$$\varepsilon_{thr} = a T^4 \quad r_{T \rightarrow G} (cm) \approx 20 \cdot [E (km)]^{0,315}$$

Параметр	Плотность высокой фазы $\rho_0 \text{ г/см}^3$	Начальная плотность $\rho_{00} \text{ г/см}^3$	Скорость звука $c_0 \text{ км/с}$	Динамический радиус $r_d \text{ м/км}^{1/3}$	Радиус смены режимов При $E_0 = 1 \text{ км}$ $r_{T \rightarrow G} \text{ (м)}$
Среда					
Воздух		$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,365	289	4,7
Вода		1	1,5	12,3	0,34
Каменная соль		2,16	3,9	5,03	
Кварцит	4,21	2,65	9,15	2,28	$\sim 0,20$
Гранит	3,64	2,56	6,33	3,06	$\sim 0,20$
Алюминий	2,7	2,7	5,20	3,85	$\sim 0,14$
Железо	7,85	7,85	3,80	3,33	$\sim 0,11$

# Сильные взрывы для исследований свойств веществ и процессов

## 1. Ударная сжимаемость

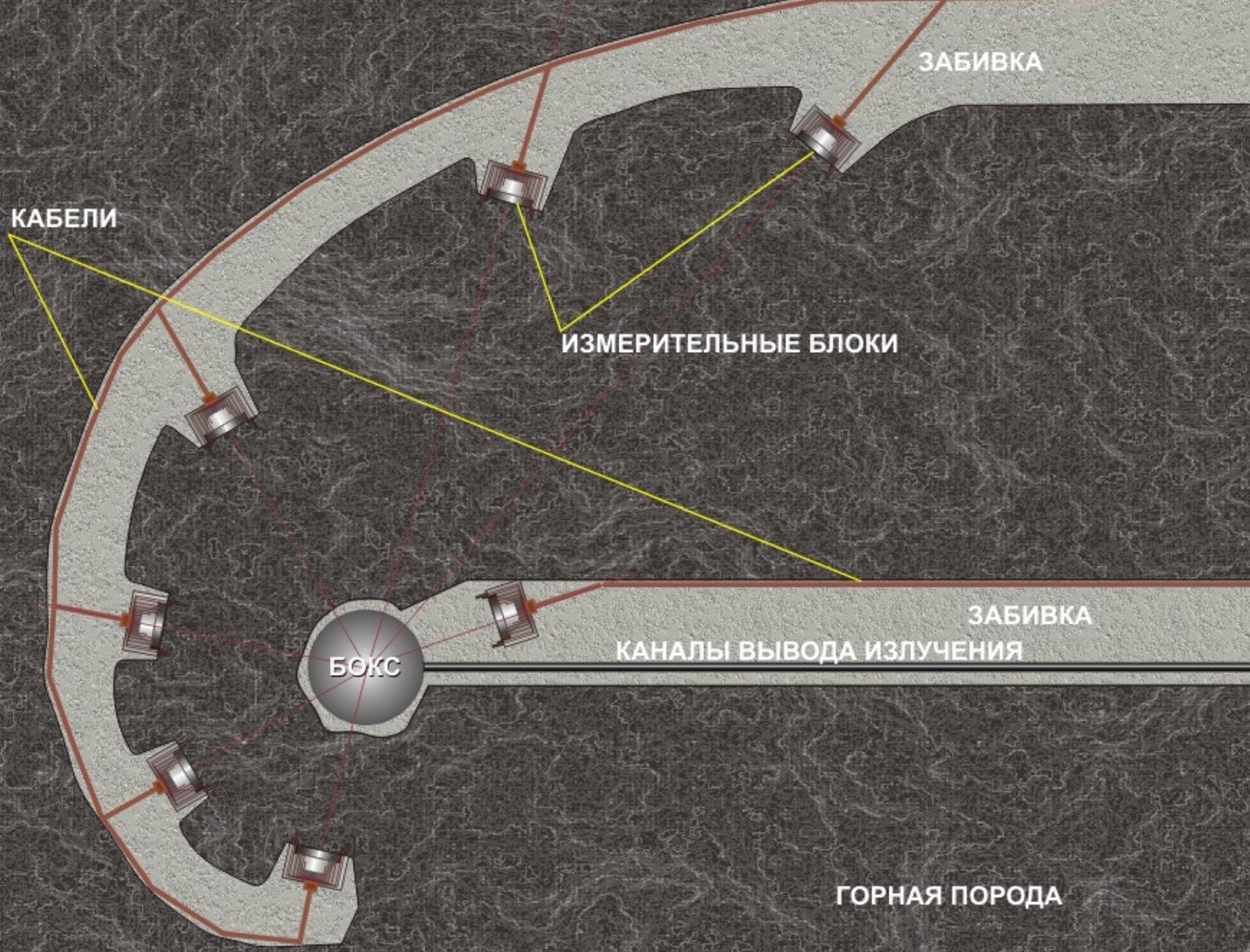
1. Для построения широкодиапазонных уравнений состояния (60 блоков с контактными датчиками);

1. Для уточнения теоретических моделей вне области применимости квантово-статистического подхода.

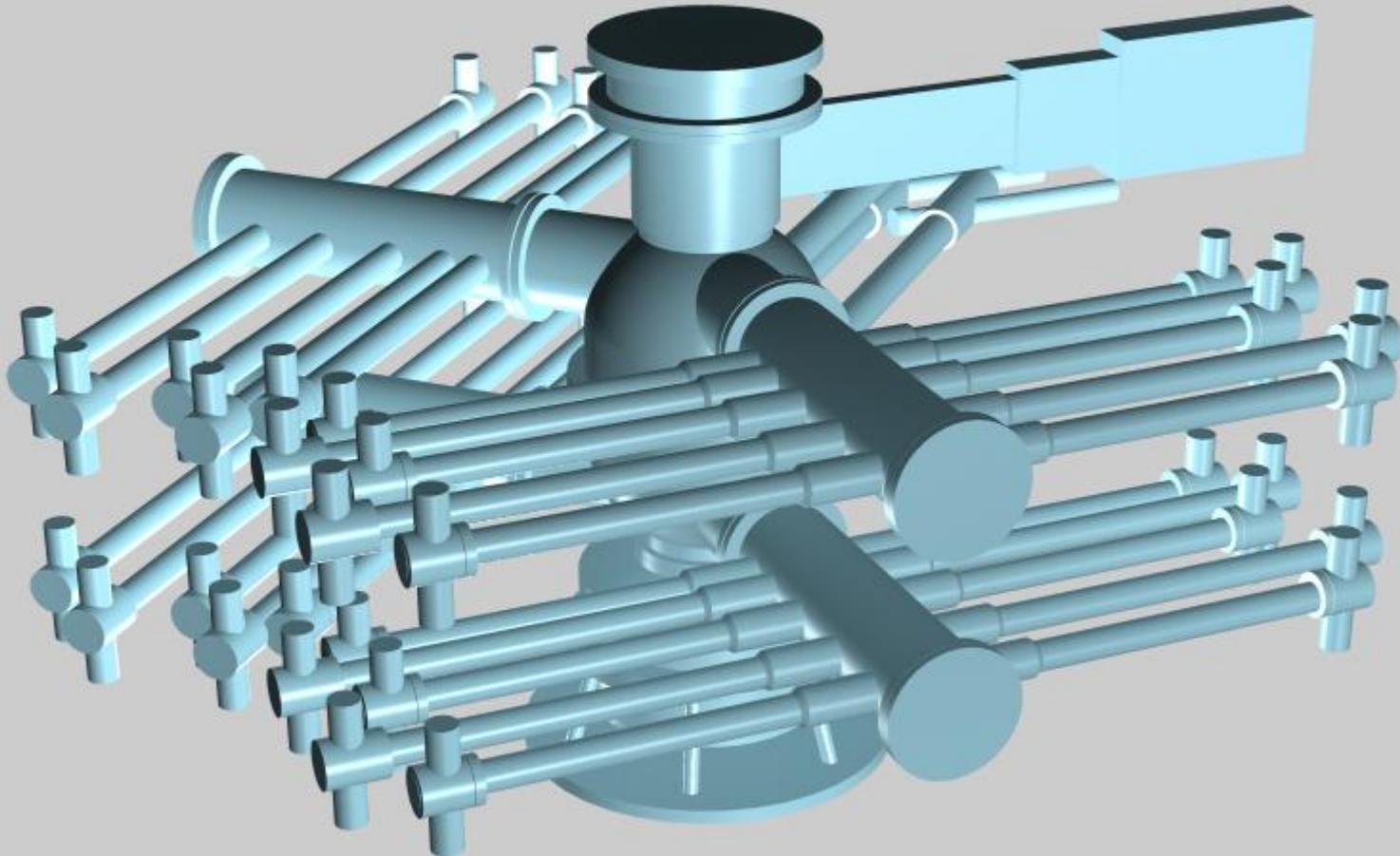
2. Оценка коэффициента нелинейной теплопроводности.

3. Изучение кинетики полиморфных превращений пород.

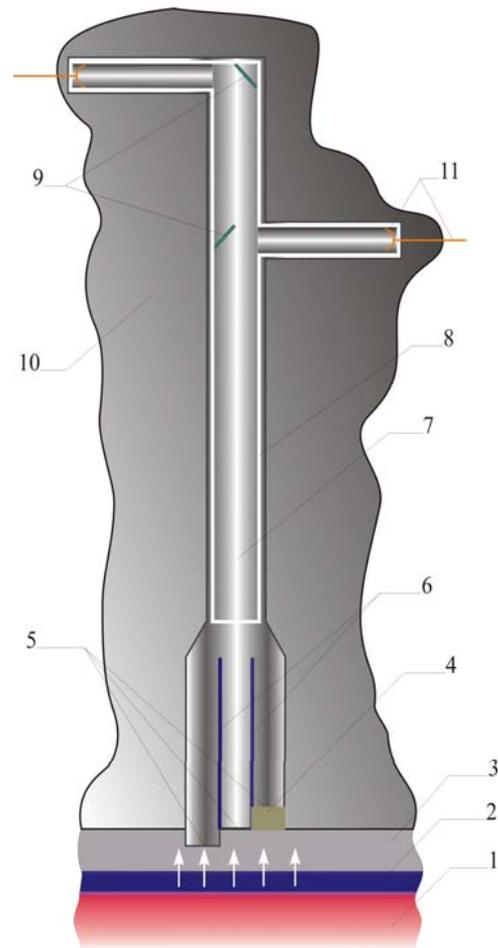
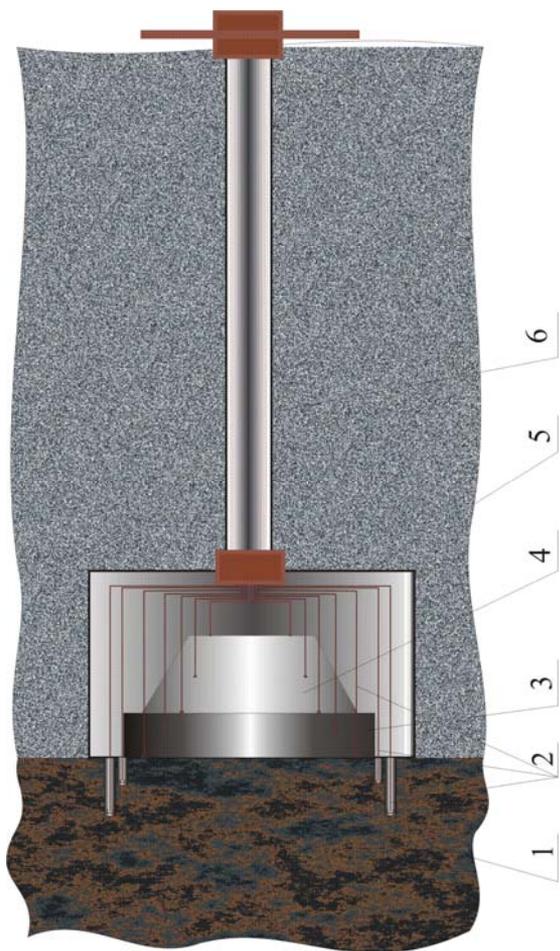
4. Интегральная оценка применяемых уравнений состояния



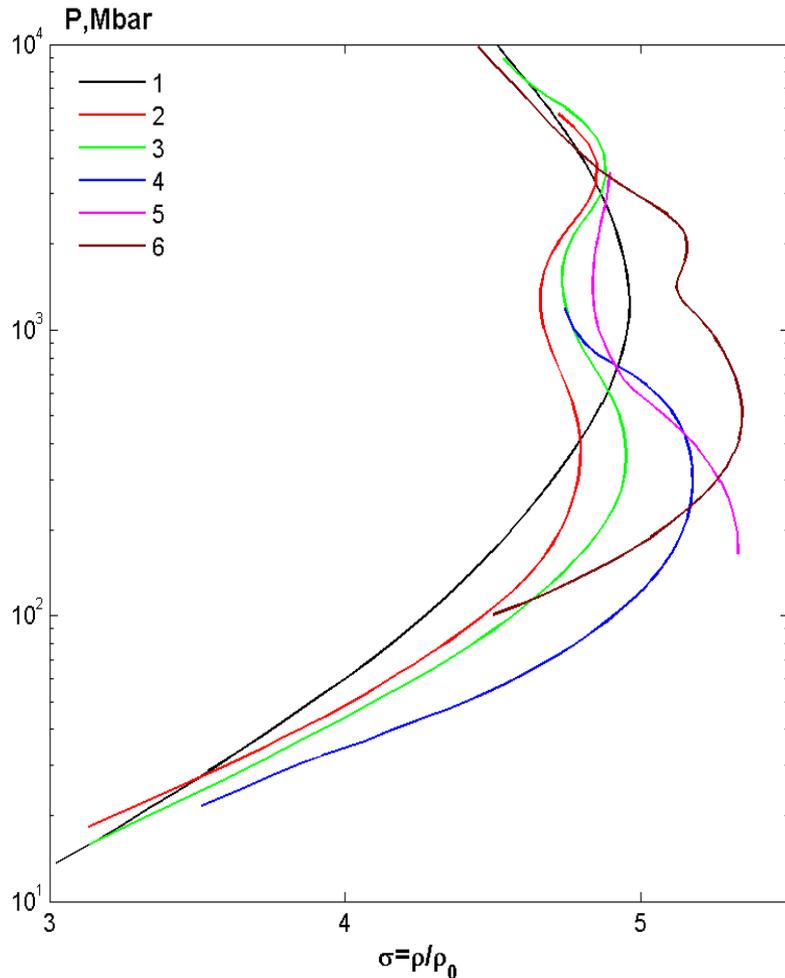
# Опыт 1983 года



# Контактные и световые измерения

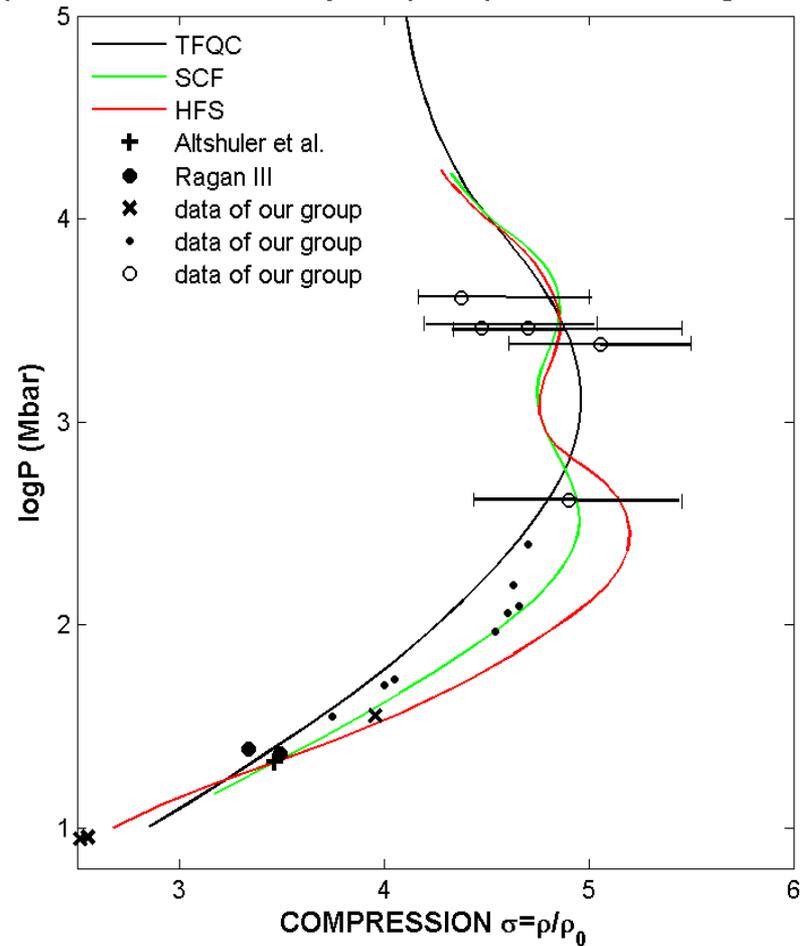


# Нормальная ударная адиабата Al



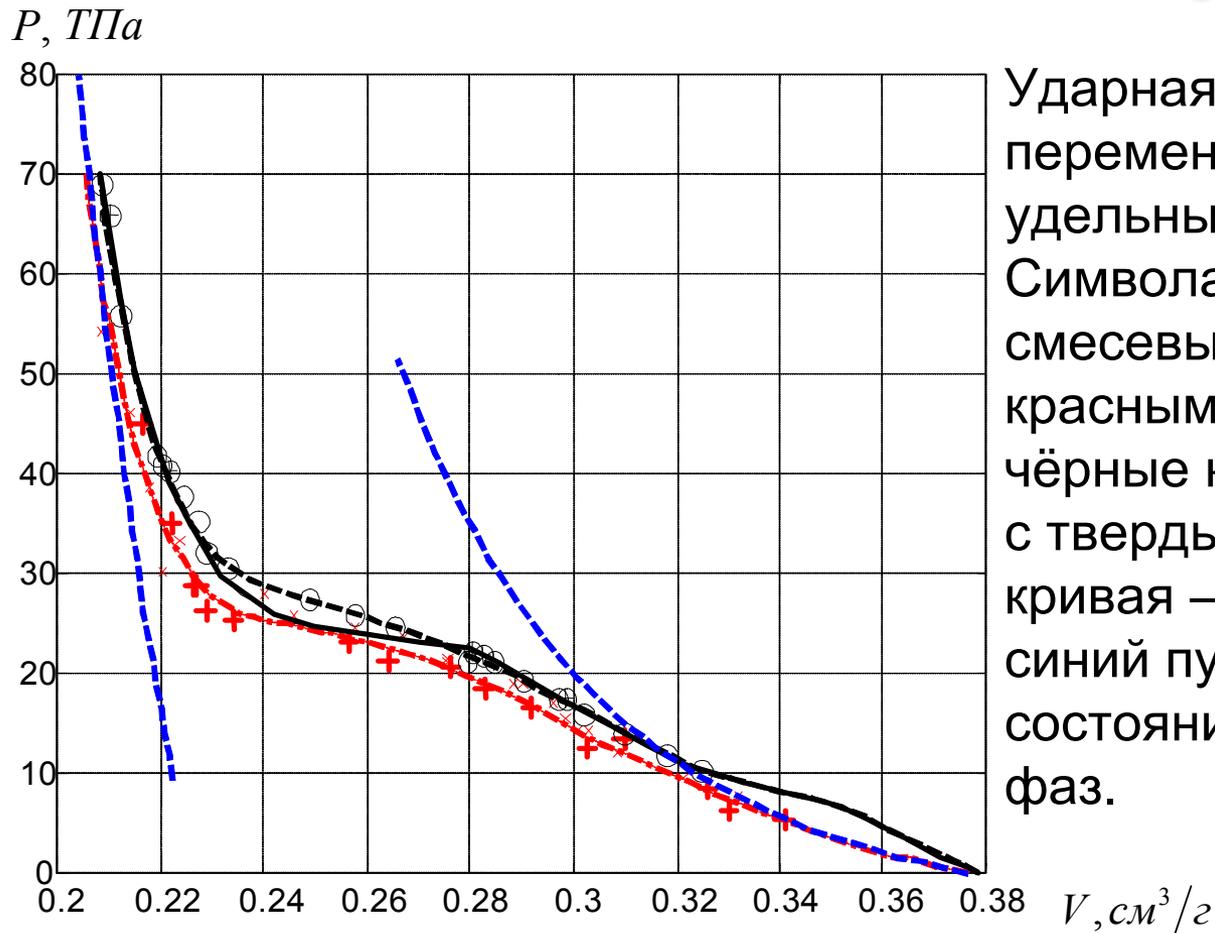
Сравнение теоретических моделей  
 1 – ТФПК, 2 – КУРС, 3 – ССП,  
 4 – МХФС, 5 – АСТЕХ, 6 – INFERNO.

20 марта 2017 г.



Сводные экспериментальные данные  
 и теоретические ударные адиабаты.  
 Experimental data summery and principal  
 theoretical Hugoniot.

# Переход кварц-стишовит при динамическом нагружении



Ударная адиабата кварца в переменных давление (ТПа) – удельный объём  $V$  ( $\text{cm}^3/\text{г}$ ). Символами + и  $\times$  -- данные, смесевых экспериментов, красным – их интерполяция; чёрные кружки – данные опытов с твердыми образцами, черная кривая – их интерполяция; синий пунктир – по уравнению состояния нижней и верхней фаз.

# **Предотвращение столкновений астероида с Землёй с помощью ЯВ**

**Изучались:**

**Поля скоростей**

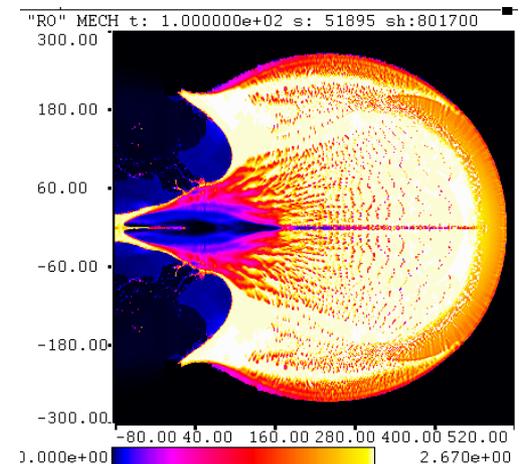
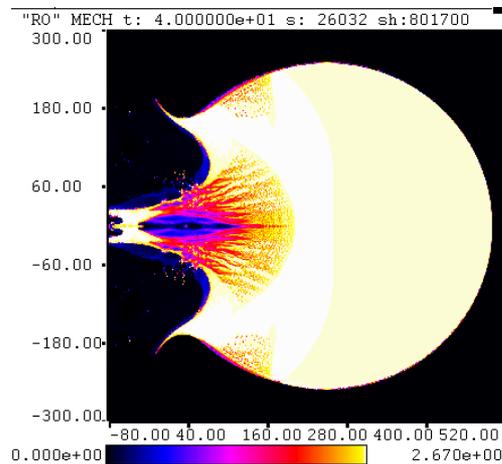
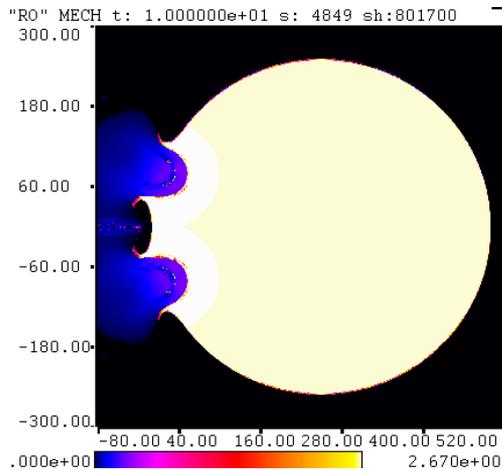
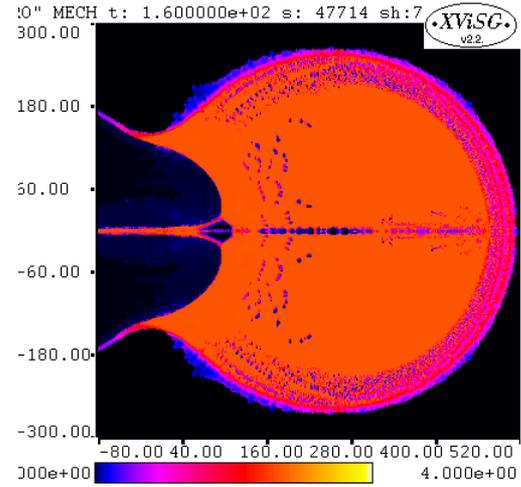
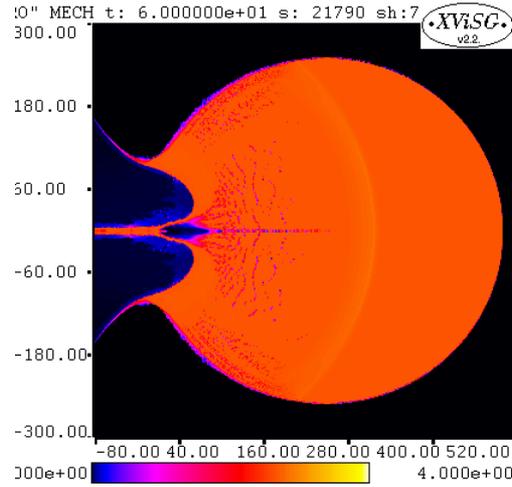
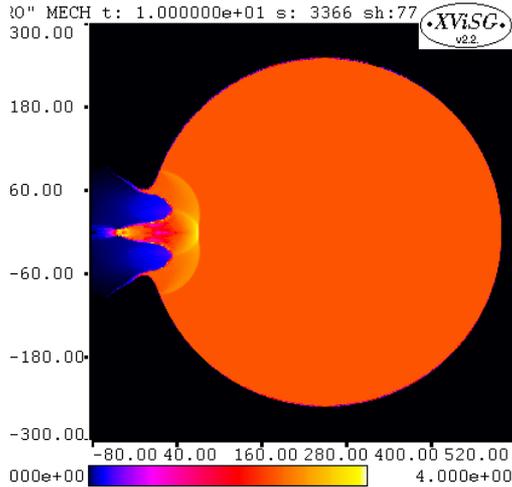
**Размеры фрагментов**

**Разлёт испарённого вещества**

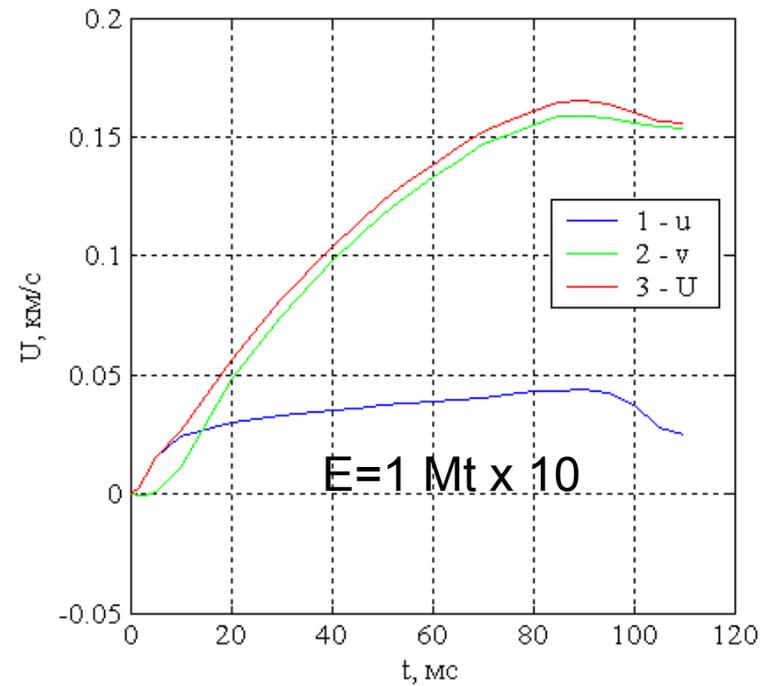
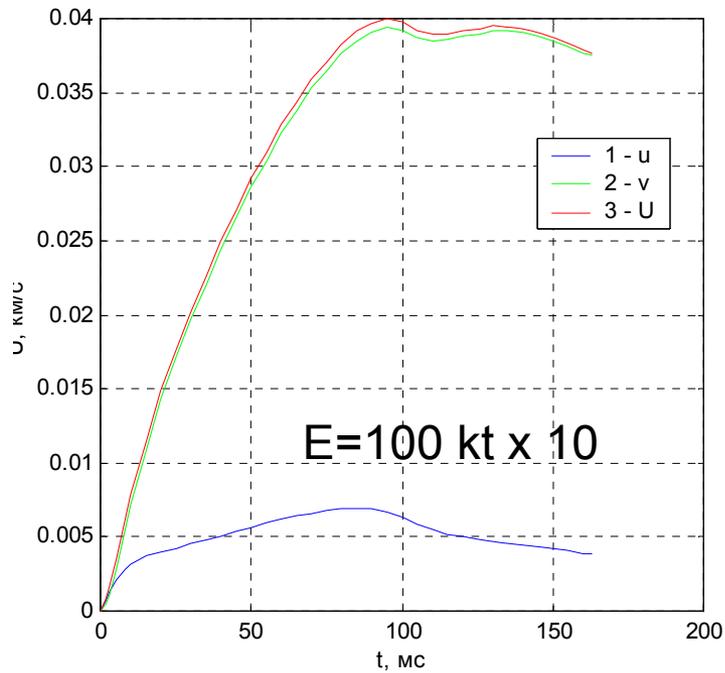
**Диспергирование объектов**

- 1.  $R=50\text{м}$  (типа Тунгусского) одиночным взрывом с  $E=10\text{ kt}$ ,  $100\text{ kt}$  и  $1\text{ Mt}$ , и десятью взрывами по  $10\text{ kt}$ .**
- 2.  $R=250\text{м}$  десятью взрывами с  $E=100\text{ kt}$  и  $1\text{ Mt}$ .**

# R=250m, E=100kt x 10 и E=1Mt x 10



# Скорости диспергирования

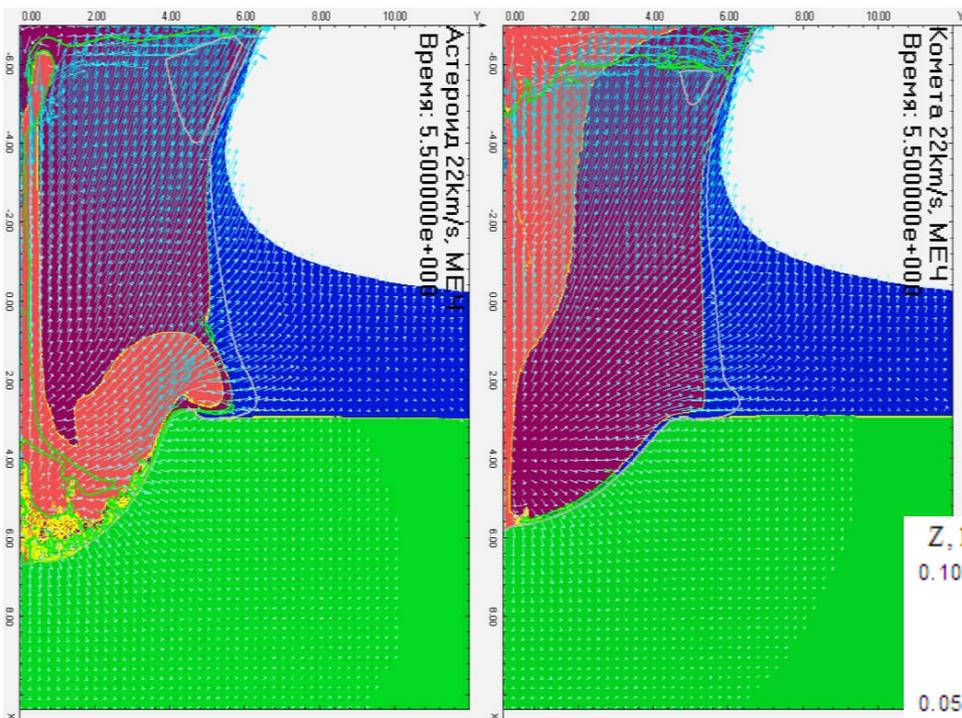


# **Мегакумулятивные процессы в диссипативных средах**

- 1. В условиях планет.***
- 2. В звездных системах.***

# Падения астероида и кометы в океан

- Вертикальное падение в океан глубиной 3 км каменного астероида и ледяной кометы одинаковой массы. Скорость -- 22 км/сек. Породы дна океана аналогичны граниту. Диаметр астероида 1 км. Характерное время процессов в окрестности удара составляет ~ 1с, а время движения цунами в океане – тысячи секунд.



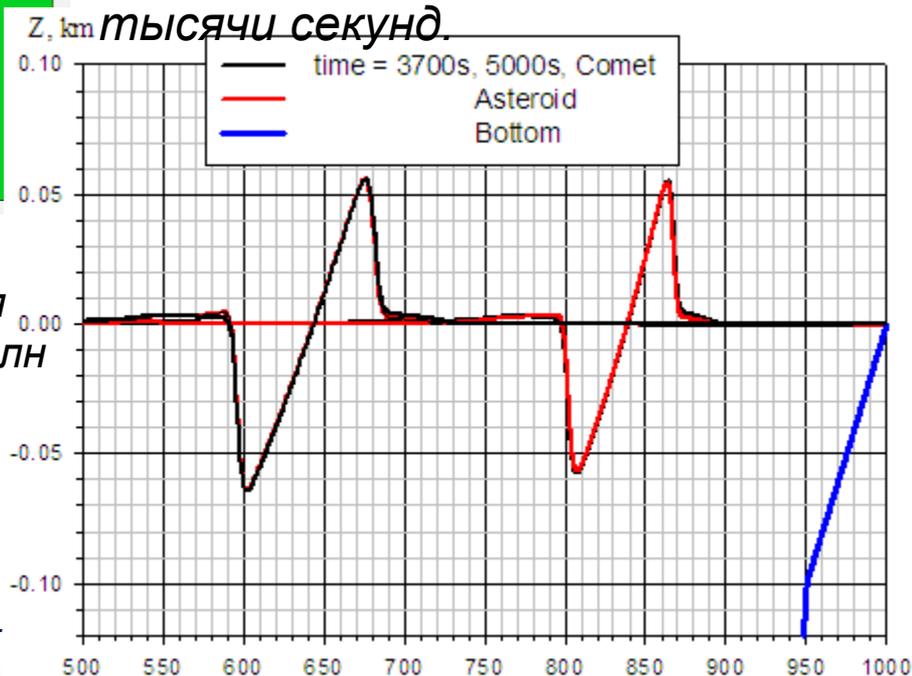
Два момента времени: приход волны к началу шельфа и к точке излома профиля шельфа. Высота волны 54 м. Профили волн практически неразличимы.

В.А. Симоненко, В.П. Елсуков, Н.А. Скоркин, Т.А. Иванкова, С.Г. Кутепова, А.С. Углов, С.Ю.

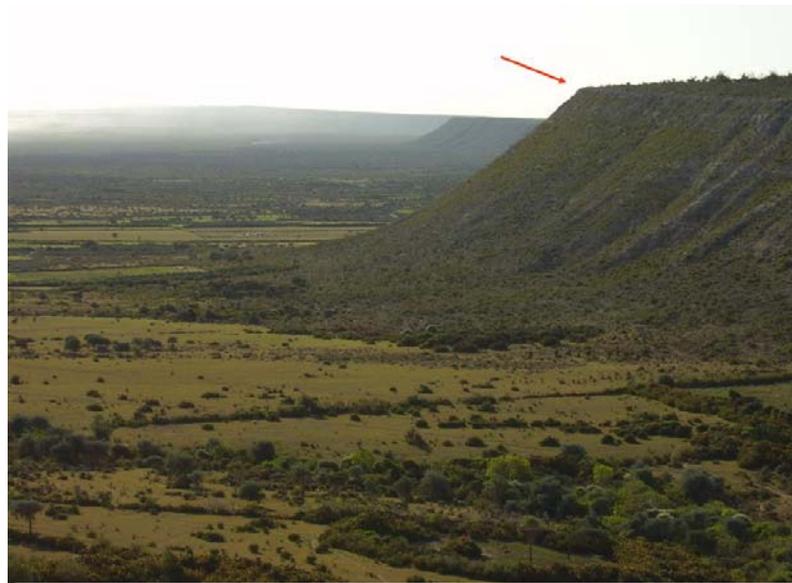
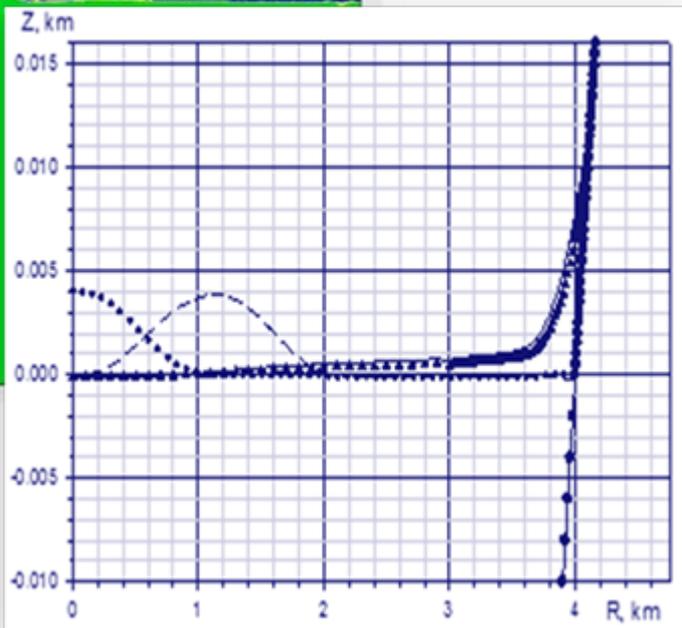
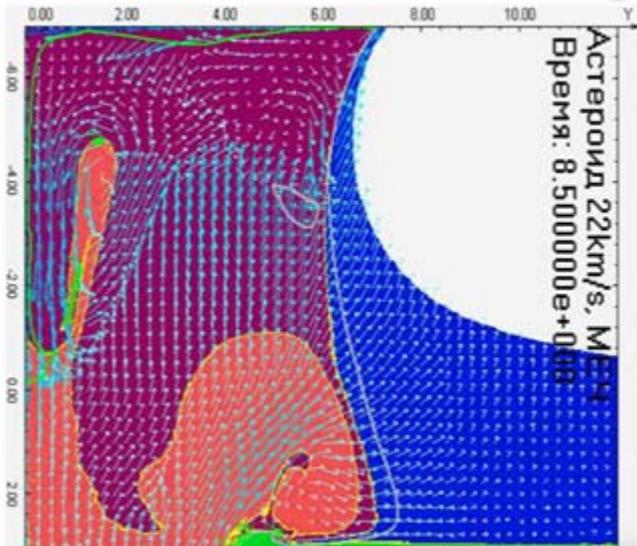
Филатов, **Математическое моделирование цунами, обусловленных падением астероидов и комет, Тезисы ЗНЧ 2007, с. 17..**

20 марта 2017 г.

ЗНЧ - 2017, Снежи

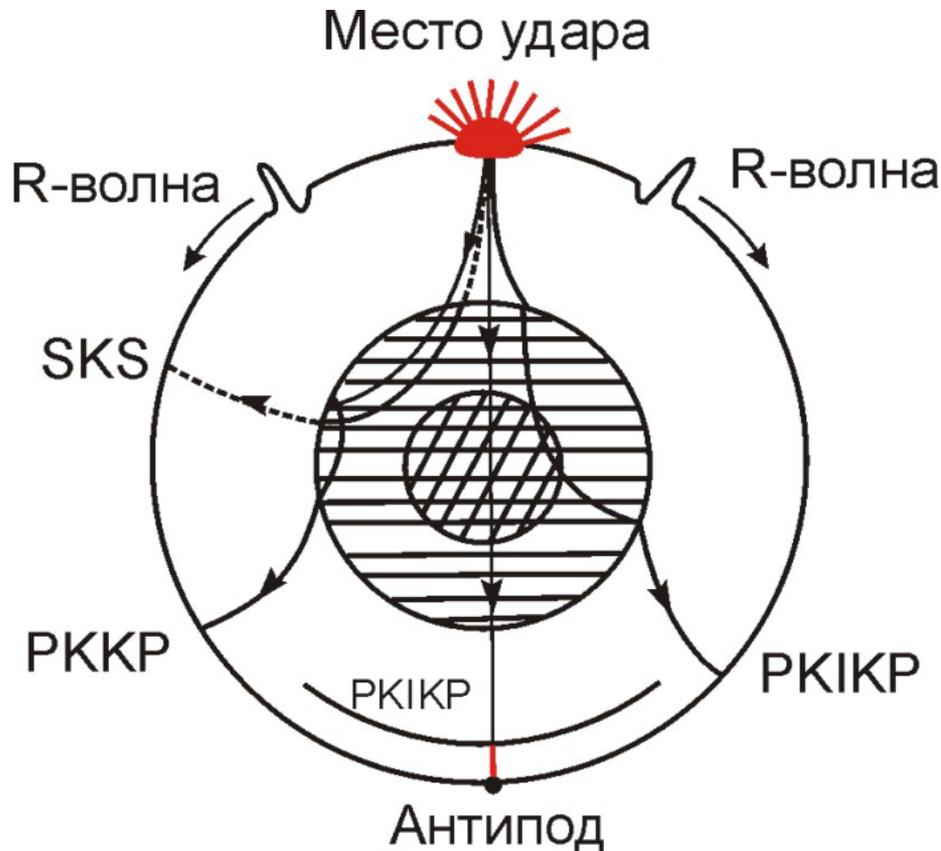


# Волна цунами



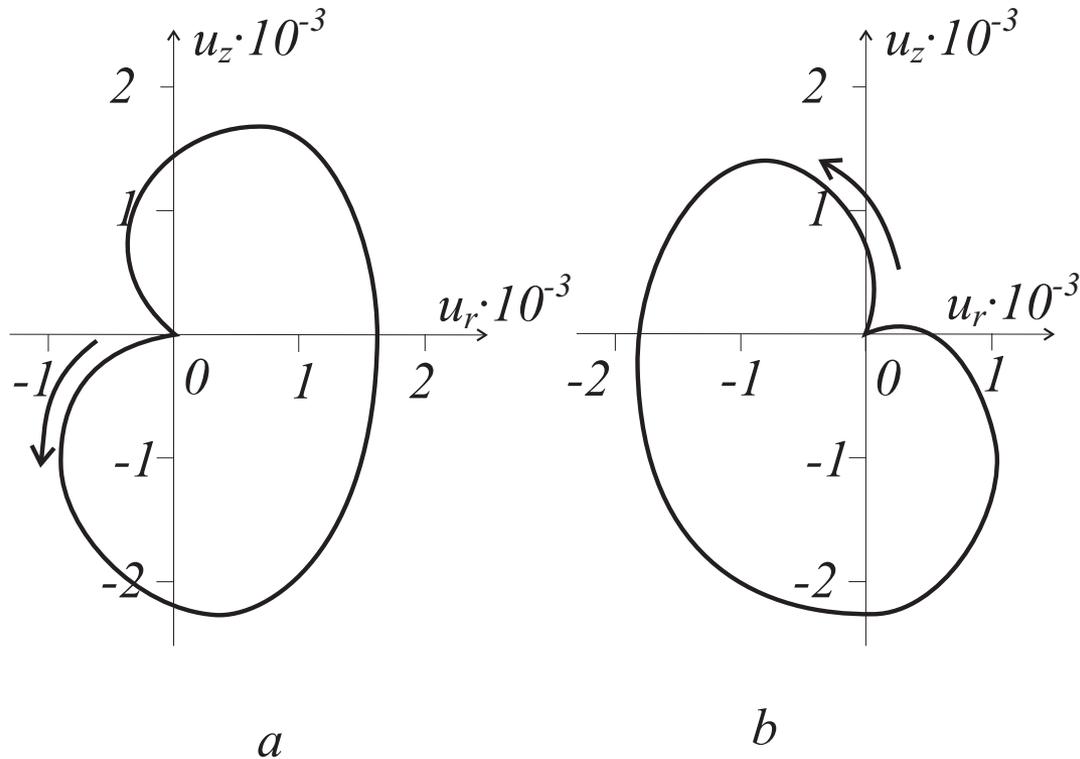
*Шевронные дюны Мадагаскара*

# Удар ОКО по поверхности Земли. Фокусировка волны Рэлея.

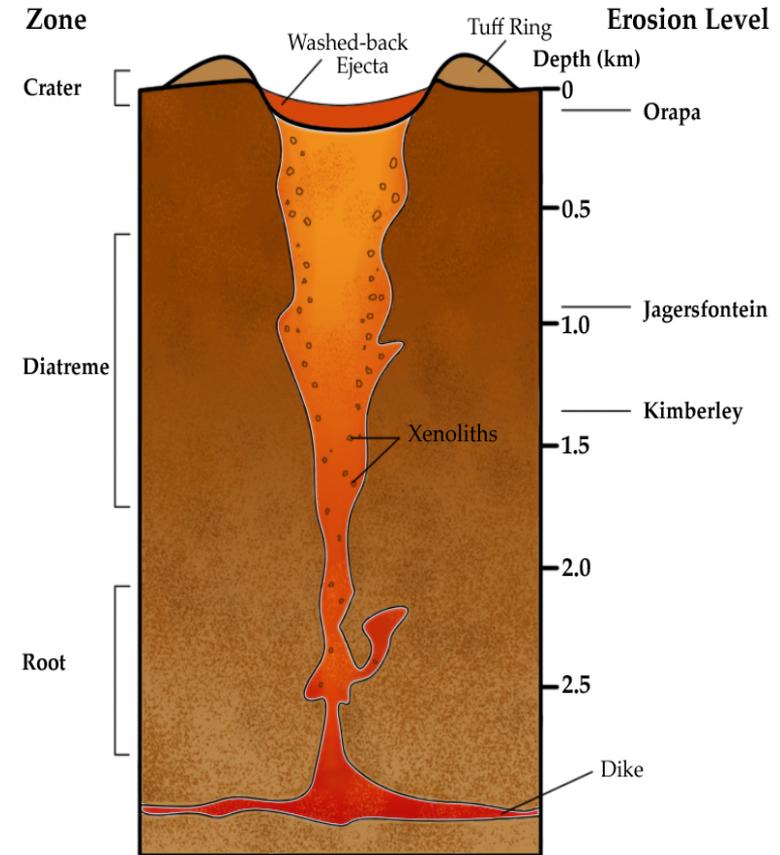


- Фокусировка на поверхности планеты волны Релея столкновительного происхождения в антиподе
  - В области фокусировки образуется либо поле диатрем, либо кимберлитовая трубка

# Импактная теория трубок взрыва.

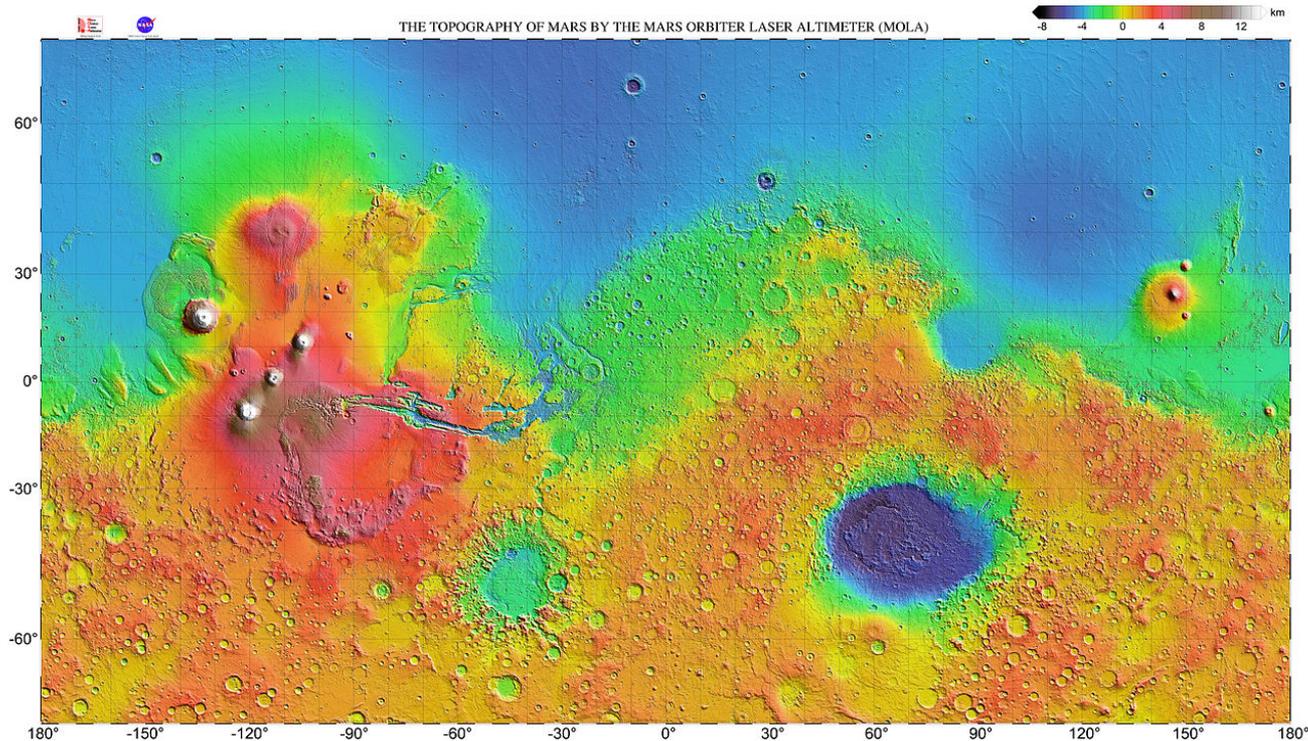


*Смена фаз движения частиц на условном экваторе по отношению к точке удара*



*В.А. Симоненко, Н.И. Шишкин, Роль кумуляции сейсмических волн в процессе образования кимберлитовых трубок. ПМТФ, 44, №6, 2003.*

# Фокусировка объёмных волн?



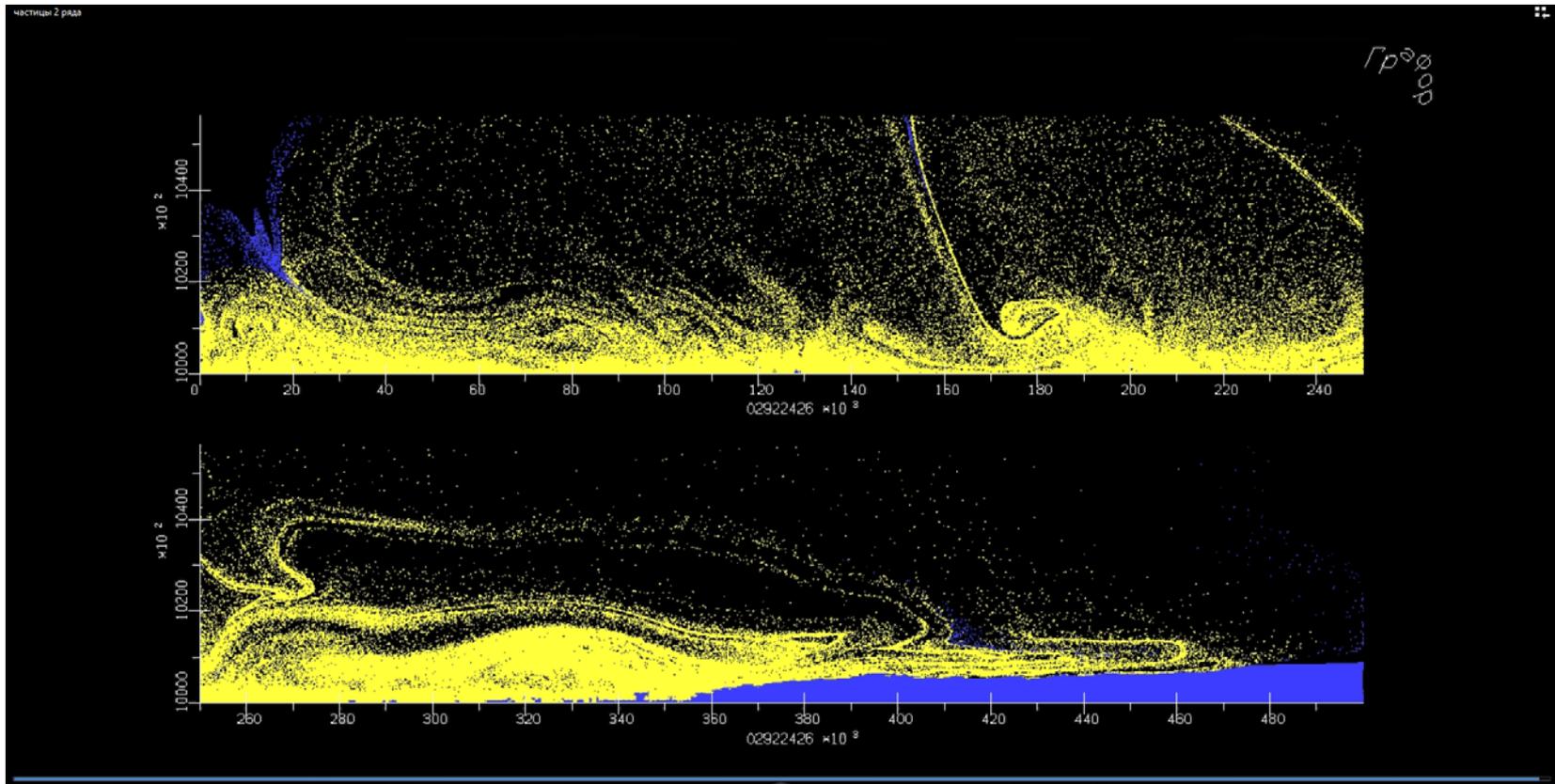
*Связаны ли базальтовые излияния с ударными кратерами?*

1. Равнина Эллада ([лат.](#) *Hellas Planitia*) (-7км)
2. Петера Альба (+6,8км относительно среднего уровня поверхности)

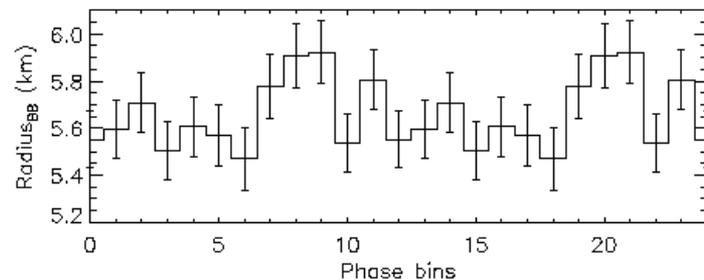
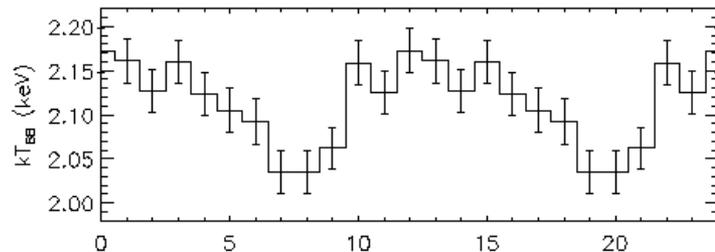
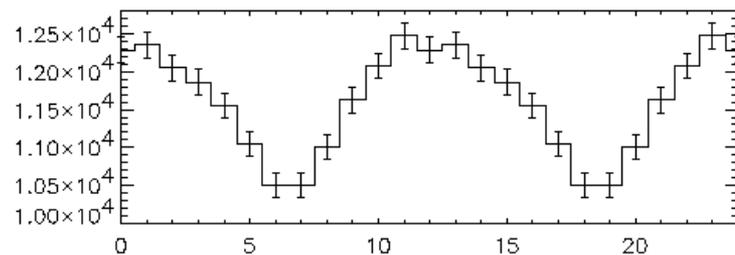
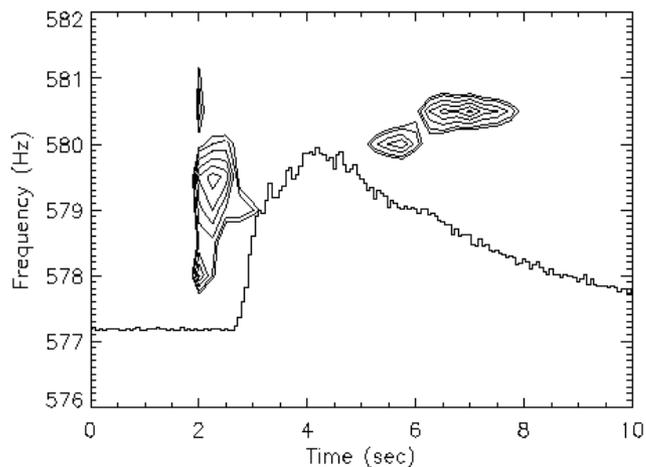
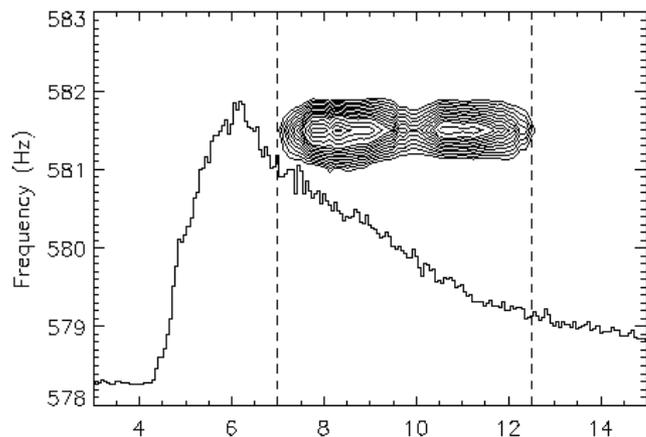
# Диссипативная кумуляция в астрофизике

1. В 1965 г. Е.И. обратил внимание на кумулятивность процессов при взрыве сверхновой.
2. С таких позиций образование звезды из протозвёздного облака, планеты из протопланетного вещества – кумулятивные процессы, эволюция звезды.
3. Выход ударной волны на поверхность атмосферы. Образование космических лучей.
4. Тесные двойные системы. Аккреция вещества с обычной звезды на нейтронную (НЗ). Погружение накапливаемого вещества в атмосферу НЗ

# Термоядерные вспышки на поверхности нейтронных звёзд



# 4U 1636-54



Осцилляции яркости двух вспышек. Слева – формы сигналов, справа – скорость счёта, температура и радиус. Strohmayer et al 1998, *ApJ* **498**, L135.

20 марта 2017 г.

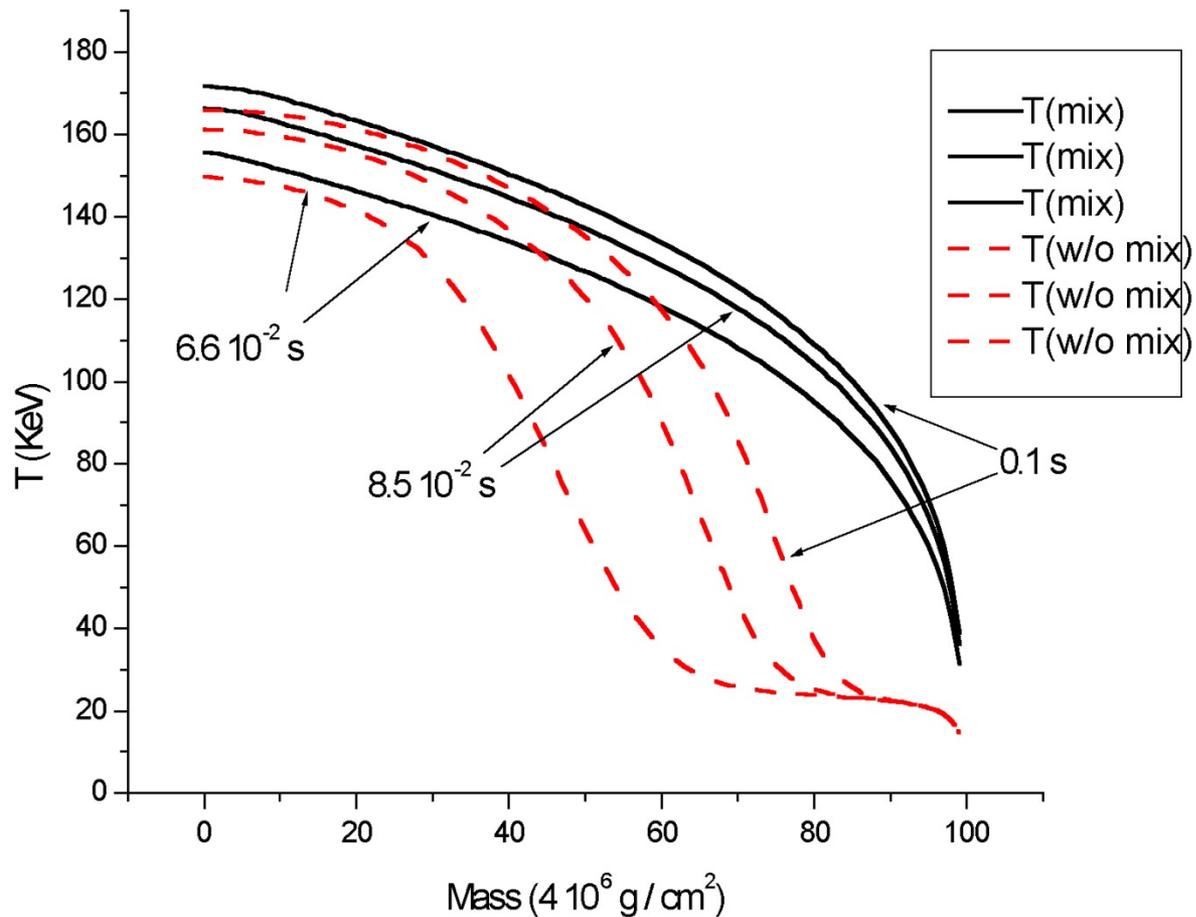
ЗНЧ - 2017, Снежинск

43

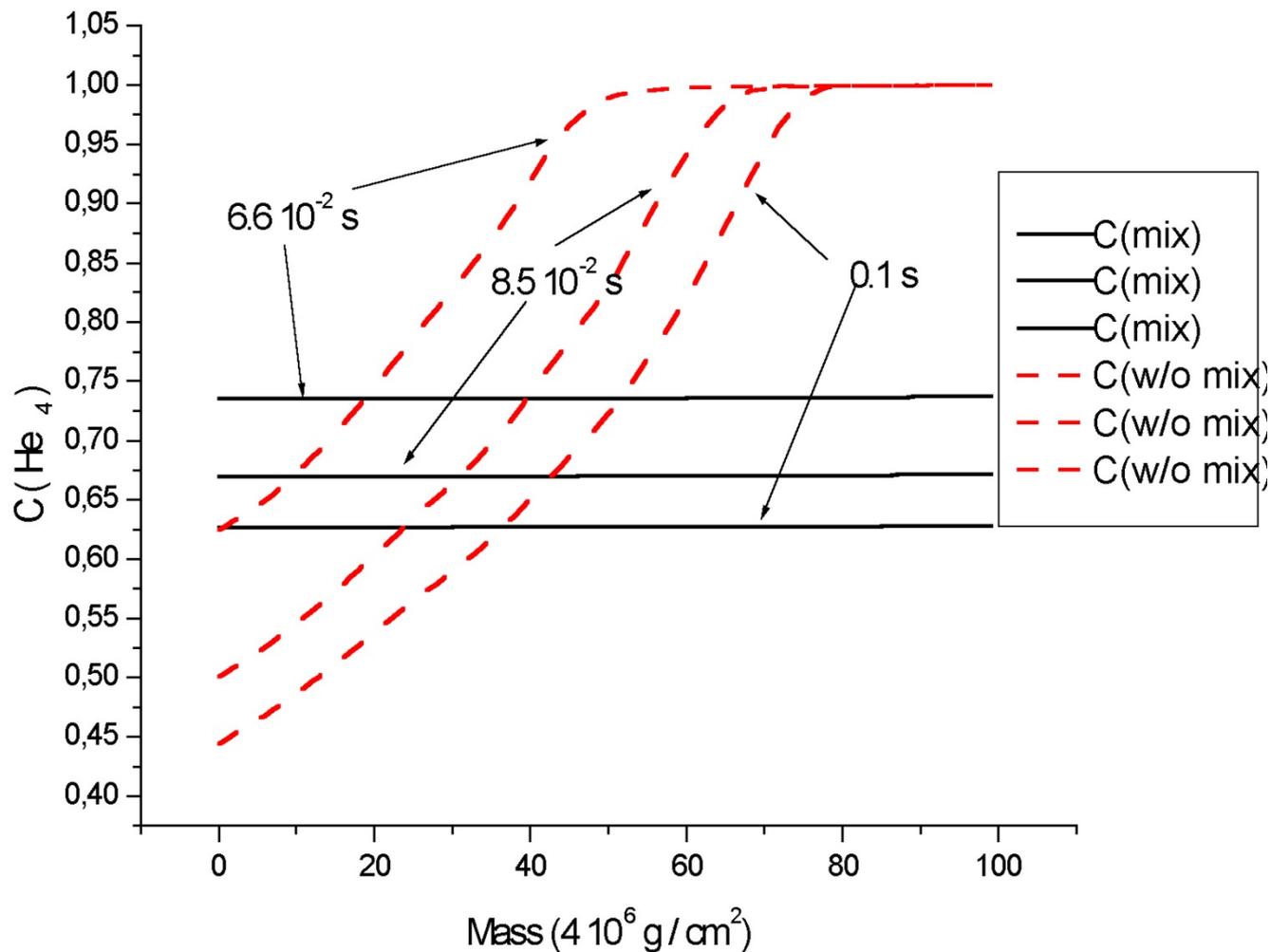
# Термоядерные вспышки нейтронных звёзд

Источники	Частота осцилляций (Hz)	Разделение КПО (Hz)
KS 1731-26	524	260
4U 1728-34	363	363 – 280
Galactic Center	589	Unknown
4U 1636-53	580, 290	276 – 251
Aql X-1	549	Unknown
4U 1702-429	330	330
X1658-298	567	Unknown
4U 1916-053	270	290 – 348
4U 1608-52	619	312
SAX J1808-365	401	200
SAX J1750-290	601	Unknown

# Профили температуры



# Концентрация гелия



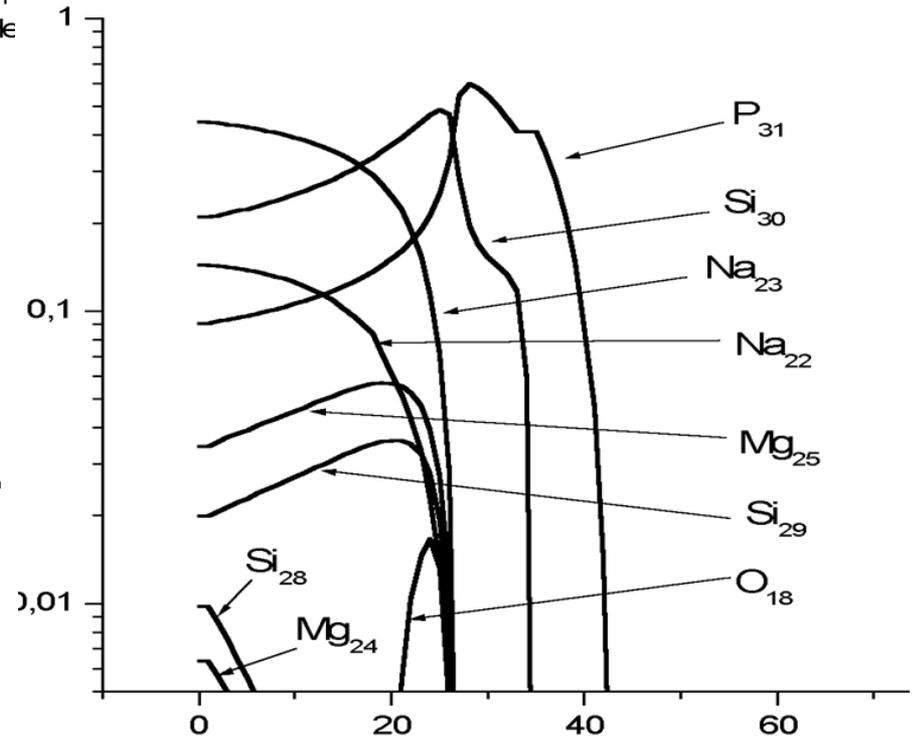
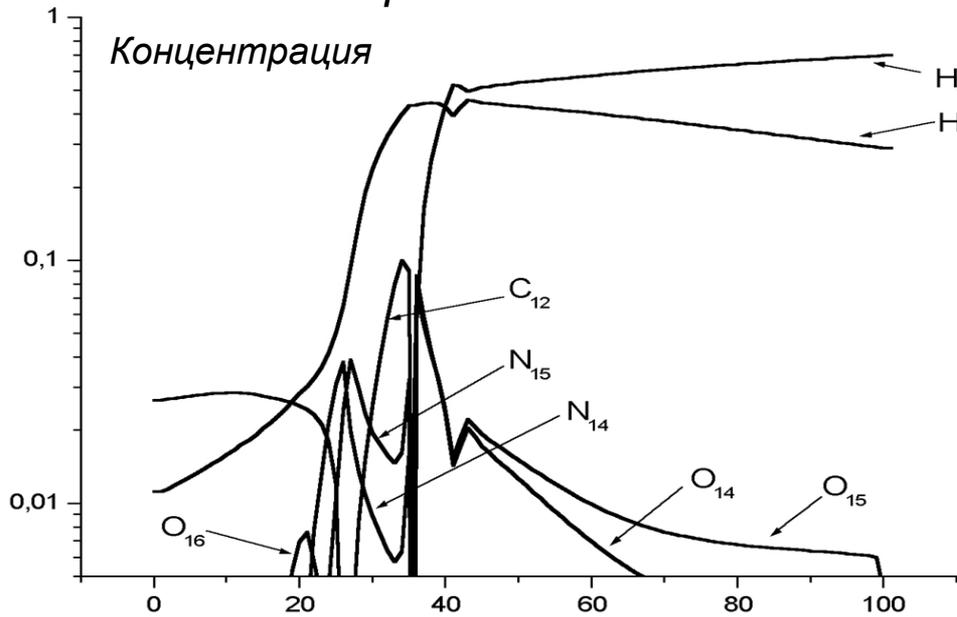
# Эволюция состава атмосферы НЗ при аккреции вещества звезды-спутника

**Квазистационарная кумуляция в диссипативной среде**

**и внешнем силовом поле. Режим пикноядерных реакций (плотно)**

Состав перед ТЯ вспышкой  $He^4$

Состав после ТЯ вспышки  $He^4$



Относительная глубина  
(масса слоя в % от массы  
атмосферы НЗ).

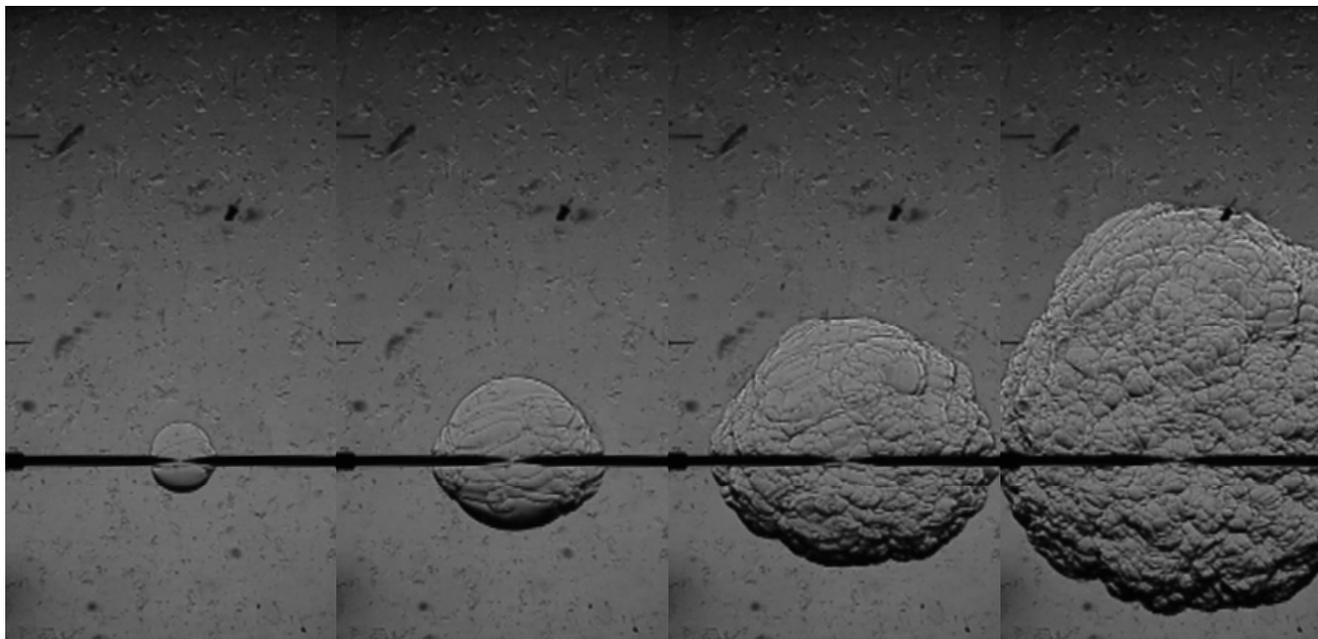
# Микрокумулятивные явления

1. *Фронт пламени при ламинарном горении*
2. *Однопузырьковая звуколюменисценция*
3. *Резонансный коллапс кластера пузырьков в дейтерированном ацетоне*

# Фронт пламени при ламинарном горении

1. Кумуляция энергии в нём определяется сильной зависимостью скорости выделения энергии от температуры.
2. Уникальность этого процесса в том, что он, в основном, контролируется теплопроводностью среды и диффузией реагентов.
3. При повышенной концентрации реагентов развивается ряд неустойчивостей, искажающих фронт, но локально ламинарность пламени долго сохраняется.
4. Для достаточно высоких концентрации при развитии горения происходит усиление хаотической газодинамической составляющей перед фронтом. Это приводит к так называемому пузырьковому режиму горения.
5. Дальнейшее развитие процесса ведёт к переходу волны горения в режим волны детонации.

# Волна горения

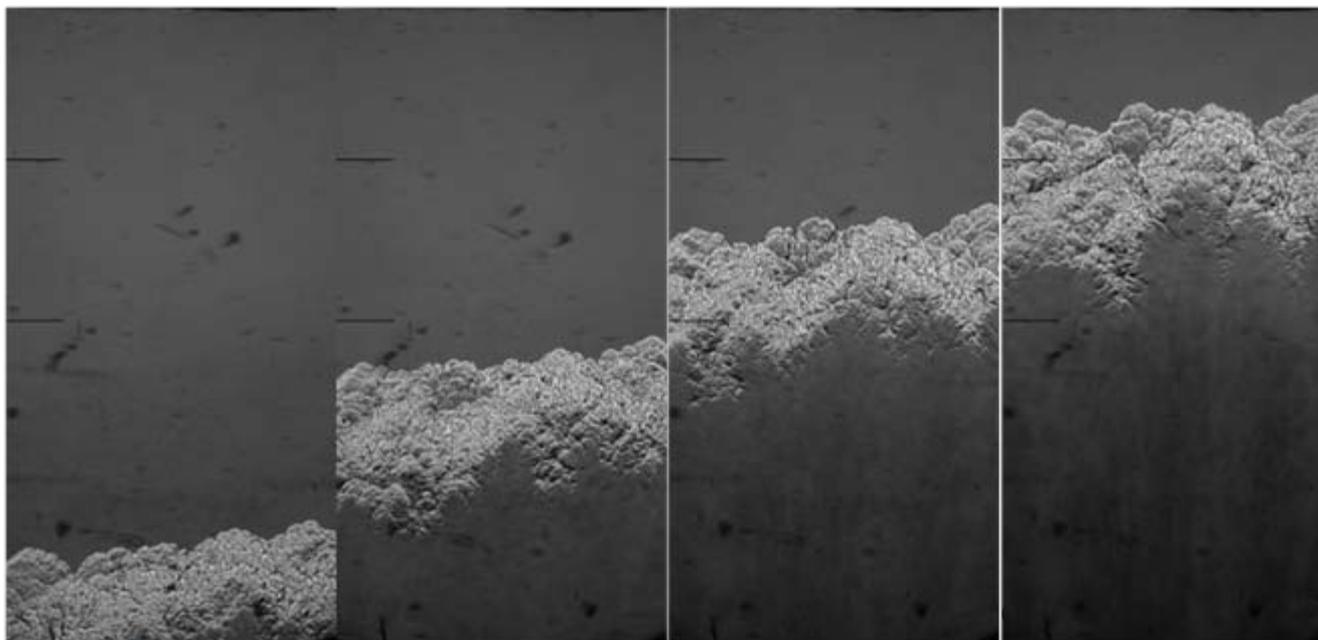


а) 5 мс

б) 10 мс

в) 15 мс

г) 20 мс

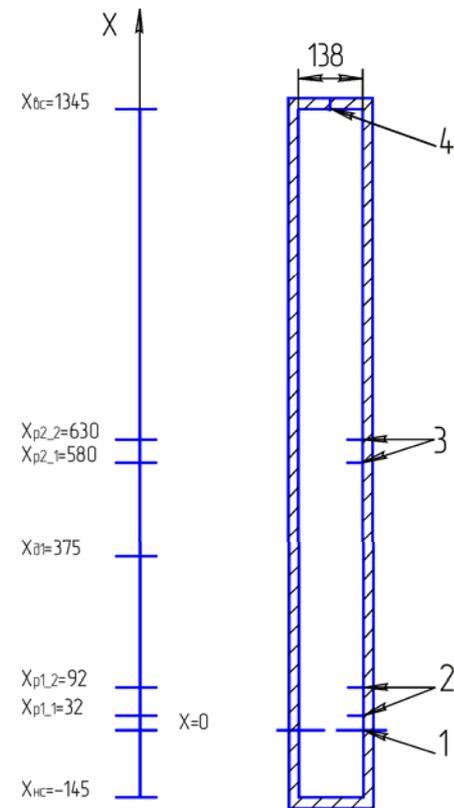


а) 60 мс

а) 67,5 мс

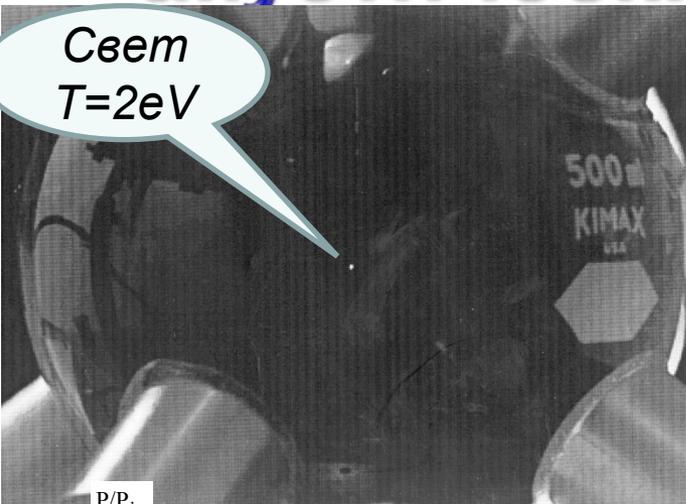
а) 75 мс

а) 82,5 мс



# Микрокумуляция в резонансных акустических полях в жидкости

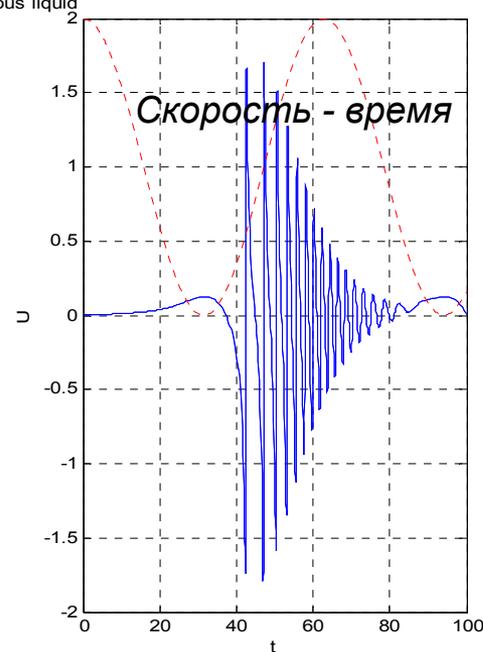
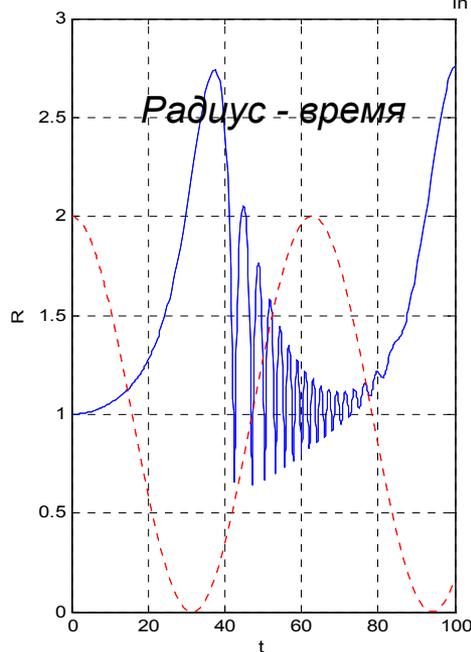
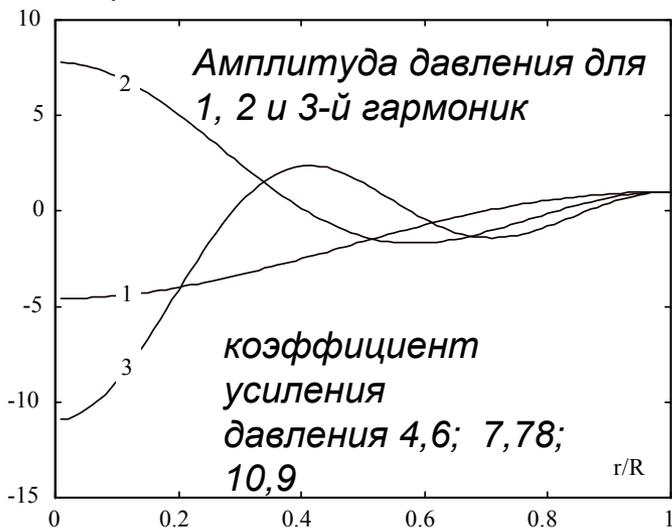
Свет  
 $T=2eV$



Однопузырьковая  
сонолюменисценция  
Повышение плотности  
энергии в  $10^{11}$  раз

Gaitan, D.F., Crum, L.A., "Observation of sonoluminescence from a single, stable cavitation bubble in a water/glycerin mixture," *Frontiers of Nonlinear Acoustics: 12<sup>th</sup> International Symposium on Nonlinear Acoustics*, edited by M/ Hamilton and D., Blackstock (Elsevier, New York, 1990), pp. 459-463

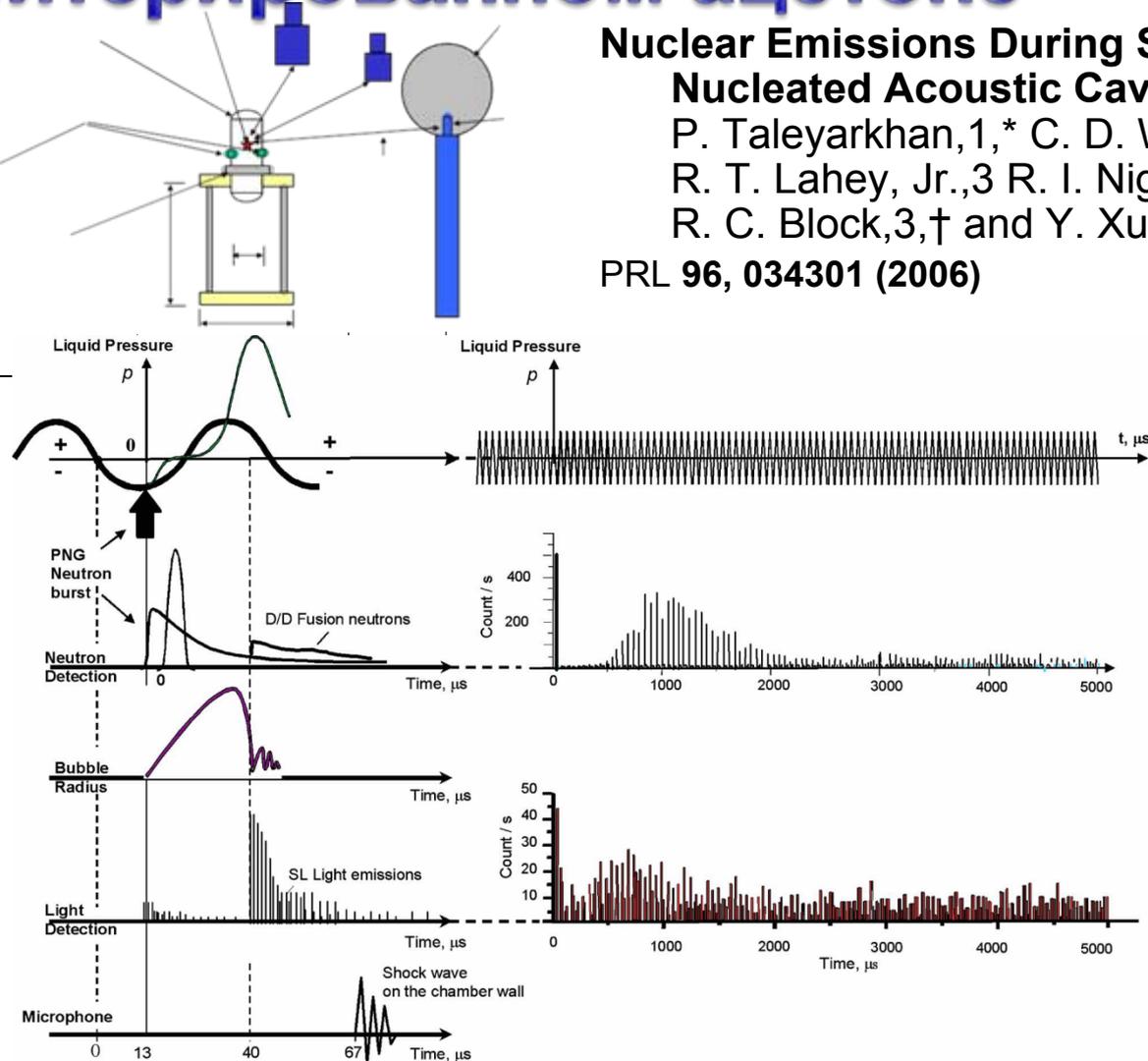
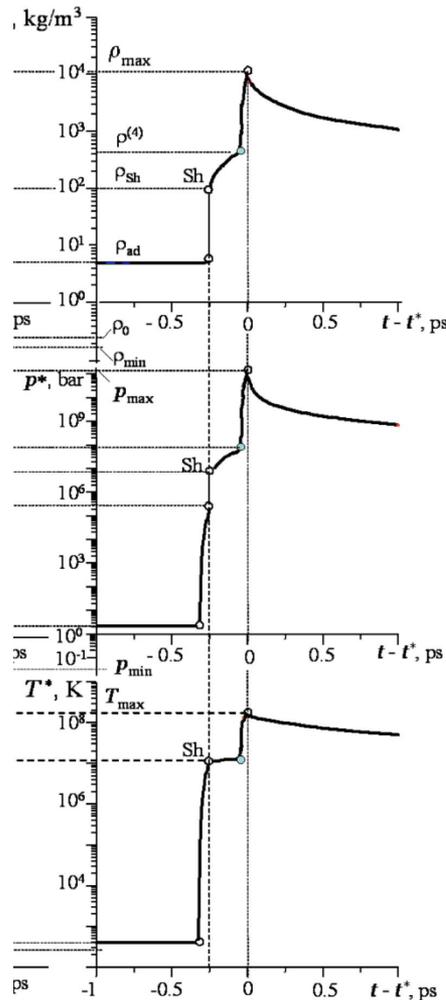
Gas-filled bubble scaled radius  $R$  and wall velocity  $U$  versus time under oscillating pressure  $P=P_0-P_1\cos(\Omega t)$  in viscous liquid



Scaled values:  $P_0=1$ ,  $P_g=2$ ,  $\Gamma=5/3$ ,  $P_1=1$ ,  $\Omega=0.1$ ,  $\text{Nu}=0.05$ .

# Резонансный коллапс кластера пузырьков в дейтерированном ацетоне

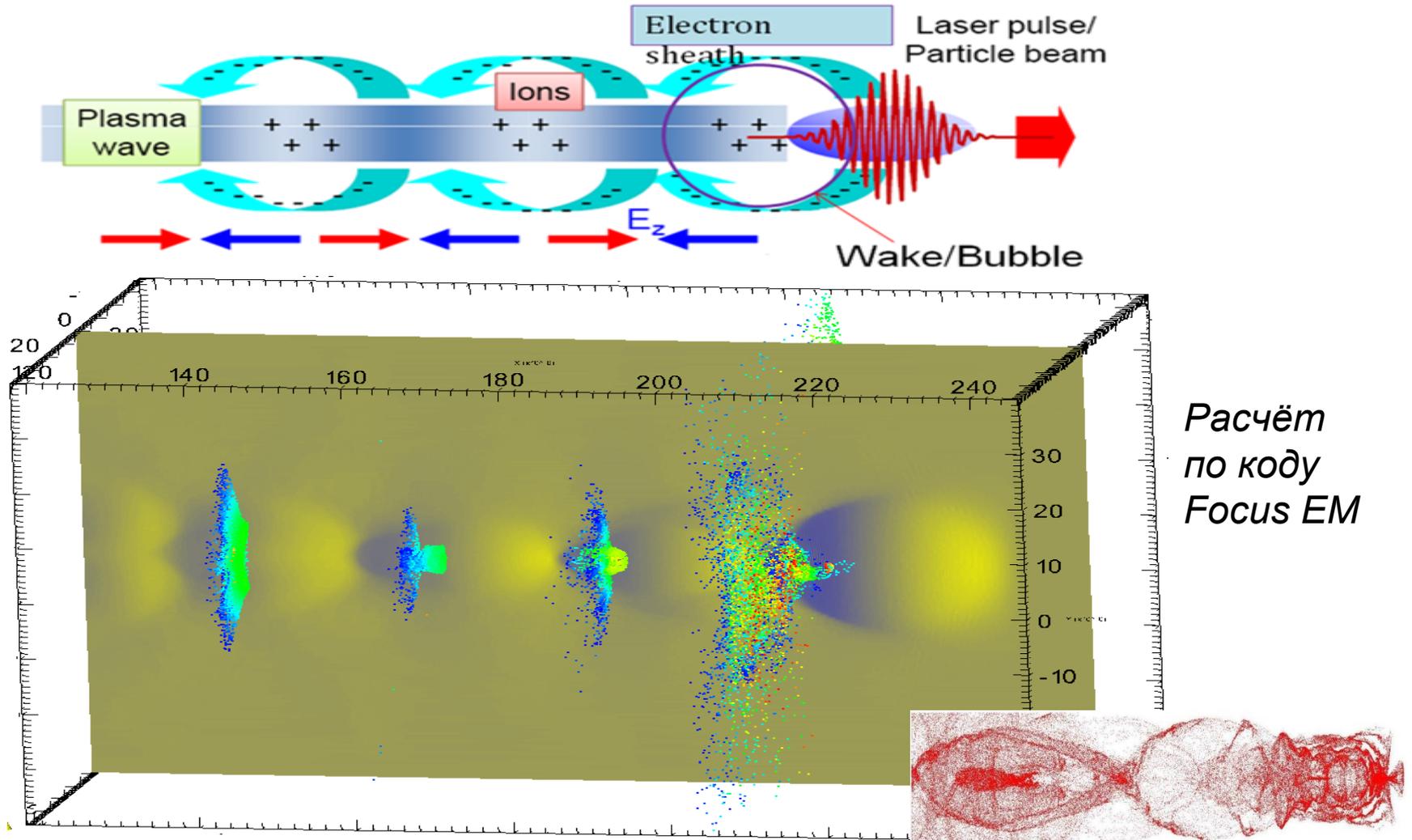
**Nuclear Emissions During Self-Nucleated Acoustic Cavitation**  
 R. P. Taleyarkhan,<sup>1,\*</sup> C. D. West,<sup>2,†</sup>  
 R. T. Lahey, Jr.,<sup>3</sup> R. I. Nigmatulin,<sup>4</sup>  
 R. C. Block,<sup>3,†</sup> and Y. Xu<sup>1</sup>  
 PRL **96**, 034301 (2006)



20 марта 2017 г.

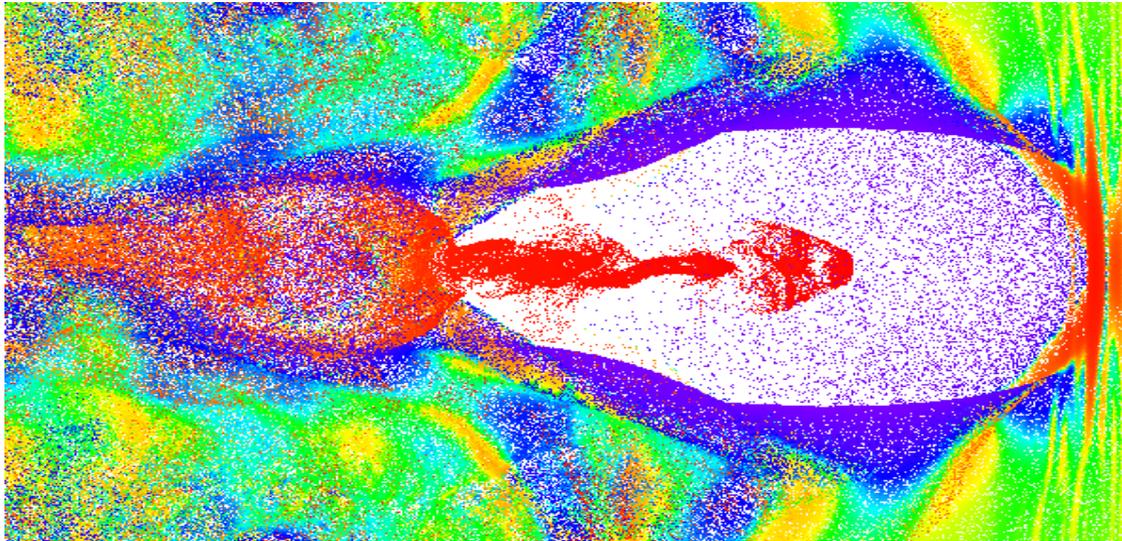
ЗНЧ - 2017, Снежинск

# Кильватерная волна при фокусировке фемтосекундного лазерного излучения



# Проявление кумулятивных процессов

при воздействии фемтосекундного лазерного импульса на мишень.



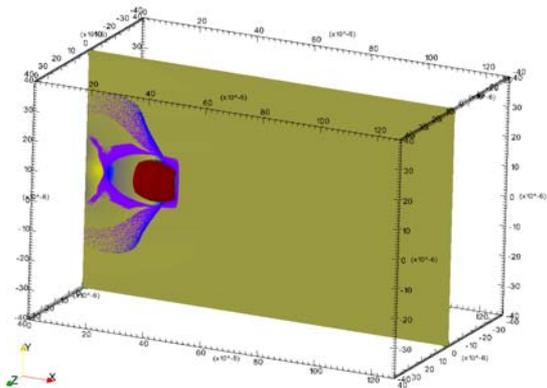
*Электроны плазмы кумулируются в торцевой части вакуумной структуры.*

*Течение самоподдерживающееся, размер кумулятивной струи зависит от нелинейного взаимодействия лазерного импульса с плазмой*

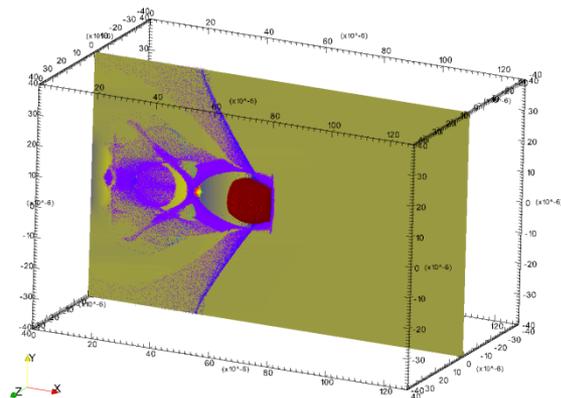
*C. McGuffey, A.G.R. Thomas, W. Schumaker, T. Matsuoka, V. Chvykov, F.J. Dollar, G. Kalintchenko, V. Yanovsky, A. Maksimchuk, K. Krushelnick, V.Yu. Bychenkov, I.V. Glazyrin, and A.V. Karpeev. PRL, 104, 025004 (2010)*

# Кильватерная волна

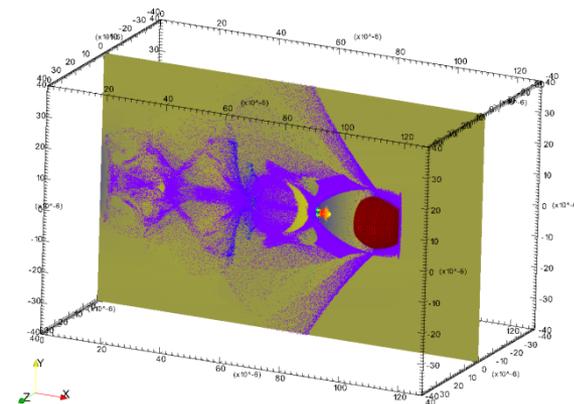
Record: 11 Step: 11 Time: 1,09864e-13



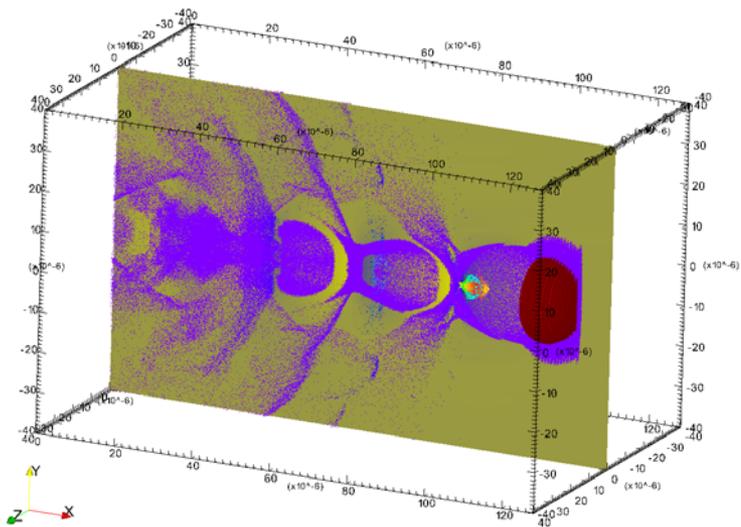
Record: 21 Step: 21 Time: 2,0974e-13



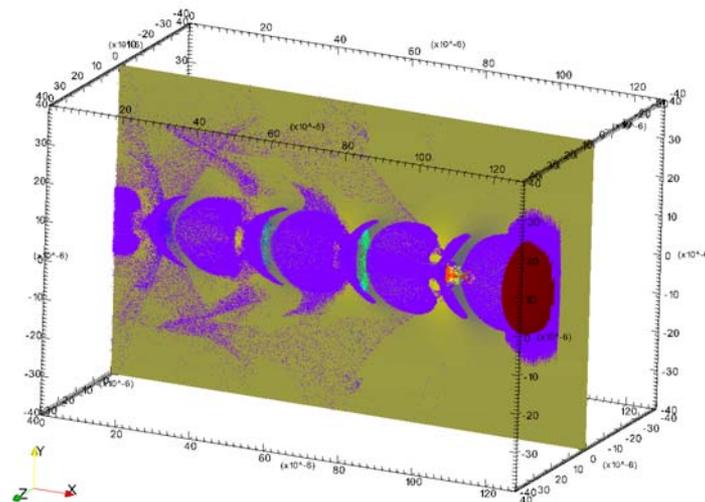
Record: 34 Step: 34 Time: 3,39578e-13



Record: 71 Step: 71 Time: 7,09119e-13



Record: 107 Step: 107 Time: 1,06736e-12



20 марта 2017 г.

ЗНЧ - 2017, Снежинск

55

# Заключение

1. Уже на начальном этапе работы Е.И. Забабахина оказали громадное влияние на формирование направлений и содержания исследований высокоинтенсивных и кумулятивных.
2. Успешная реализация первоначальных положений способствовала созданию мощной теоретической и экспериментальной поддержки этих исследований.
3. Благодаря влиянию Е.И. создание нового центра на Урале способствовало не только продолжению начатых в Сарове исследований, но и углубленному расширению их как по изучению свойств и разнообразия кумулятивных процессов, так и по изучению свойств веществ при высокоинтенсивных процессах.

4. Переход к технологии проведения сильных взрывов в плотных средах открыл хорошие возможности для расширения исследований высокоинтенсивных явлений, так и соответствующим им свойств веществ.

5. Эти работы выполнялись при непосредственной поддержке Е.И. и привели к получению результатов, которые оказываются востребованными и в настоящее время.

6. Е.И. продолжал и поддерживал также работы по расширению исследований и применений кумулятивных процессов. В частности, теоретические работы по обострению импульса нагружения при адиабатическом сжатию мишеней, по использованию экспериментов с сохраняемыми сферическими образцами для изучения свойств сред после динамического нагружения.

7. Понимание явления сильных взрывов в плотных средах способствовало изучению опасных столкновений астероидов и комет с Землёй и возможностей предотвращения их с помощью

8. Новые возможности для исследований высокоинтенсивных процессов открыло использование мощных лазерных систем. Мы почти не затрагивали это мощное направление исследований. Мы привели очень богатый по физическому содержанию пример процессов кумуляции в кильватерной волне фемтосекундного импульса.

9. Интересные примеры, рекордные по степени концентрации энергии ( $10^9 \div 10^{12}$ ), были получены при коллапсе резонансных акустических волн в полостях, наполненных водой и дейтерированным ацетоном.

10. В последнем случае дополнительно создавался кластер пузырьков, и были получены нейтроны термоядерного происхождения.

11. Приведенный далеко не полный анализ обсуждаемого направления показывает, что исследования по нему продолжают расширяться и раскрывают перед нами всё более глубокие и интересные возможности.

# *Спасибо за внимание*

*Гора Вишнёвая  
11 марта 2017 г.*

*20 марта 2017 г.*

*ЗНЧ - 2017, Снежинск*

*60*