

зондируемой активной среде химического лазера в данных опытах даже при 100%-ном превращении молекул CS_2 в молекулы CO концентрации CO в зоне химической реакции с $T = 1200 \text{ K}$ не превышает $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Концентрация молекул CO в активной среде электроразрядного CO -лазера обычно выше и составляет $(1 \div 3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а температура газовой среды не превышает 400 K для лазеров, охлаждаемых проточной водой, и 200 K — для лазеров с охлаждением жидким азотом [14].

Различие температур активных сред приводит к различию максимальных значений сечения усиления на рабочих переходах, поскольку при концентрациях частиц в среде порядка 10^{17} см^{-3} уширение спектральных линий из-за соударений частиц сравнительно невелико, и доплеровское уширение оказывает заметное влияние на форму спектральных линий. Ограничиваясь оценками, можно полагать, что для химического CO -лазера сечения усиления на рабочих переходах в 1,5—2 раза ниже, так как доплеровское уширение растет как $T^{1/2}$. Отсюда можно сделать вывод о том, что величина инверсной заселенности молекул CO в активной среде химического лазера того же порядка и, может быть, даже выше инверсной заселенности на рабочих переходах электроразрядных CO -лазеров, упомянутых в [4].

Поступила в редакцию
11/XII 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по лазерам. Под ред. А. М. Прохорова. М. Советское радио, 1978.
2. N. Djeu, H. S. Pilloff, S. K. Searles. Appl. Phys. Lett., 1971, 18, 538.
3. M. J. Linevsky, R. A. Carabetta. Appl. Phys. Lett., 1973, 22, 288.
4. Н. Н. Соболев, В. В. Соколов. — В сб.: Квантовая электроника, № 4 (10). М., Сов. радио, 1972.
5. В. А. Дудкин, В. Б. Либрович, В. Б. Рухин. ФГВ, 1978, 14, 1.
6. В. А. Дудкин, В. Б. Либрович, В. Б. Рухин. — В сб.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Черногоровка, 1977.

О НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЕ ПРОЦЕССА ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ПРЕССОВАННОМ ТРОТИЛЕ

Ю. М. Балинец, И. А. Карпухин
(Москва)

В настоящее время признан очаговый механизм возбуждения детонации ударными волнами (УВ) небольшой интенсивности в физически неоднородных твердых взрывчатых веществах (ВВ). Однако причины возникновения очагов химической реакции, время и место их зарождения, размеры очагов и их концентрация, развитие реакции в очаге, взаимодействие очагов и другие вопросы, важные для понимания механизма инициирования химической реакции УВ, до сих пор остаются открытыми. К сожалению, экспериментально трудно исследовать микромеханизм зарождения и развития очагов быстрых химических реакций, поэтому до сего времени доступна лишь косвенная информация, получаемая различными интегральными методами.

Широко распространенные методы определения критических параметров УВ, вызывающих инициирование химического превращения ВВ, способного при определенных условиях усилить распространяющийся

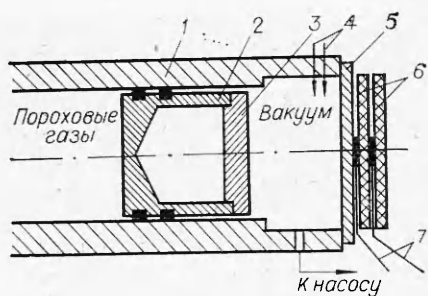


Рис. 1. Схема опытов по регистрации эволюции ударной волны в прессованном тротиле.

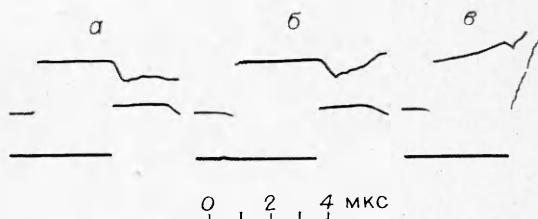


Рис. 2. Осциллограммы опытов по регистрации профилей давления. Профили давления на границе между экраном и образцом (верхние лучи) и на расстоянии 6 мм от экрана (нижние лучи) соответственно для давлений 11 (а), 16 (б) и 25 (в) кбар.

волновой режим до детонационного, позволяют сравнивать восприимчивость различных взрывчатых систем к ударно-волновому импульсу. Внутренние методы, такие как электромагнитный способ измерения массовой скорости или запись давления манганиновыми датчиками, дают возможность на основании осредненных газодинамических параметров течения вещества за плоскими УВ судить о начале и месте энерговыделения [1—3], а в ряде случаев даже о скорости разложения вещества [4, 5].

В работах этого направления обычно исследуется эволюция профиля массовой скорости u или давления p в ударной волне с реакцией вплоть до формирования фронта нормальной детонации с использованием большого количества измерений в различных сечениях заряда при определенной интенсивности инициирующей ударной волны. Причем вследствие кратковременности существования плоскостности волны из-за разгрузки с боковой поверхности образца обычно используются ударные волны с интенсивностью, значительно превышающей критическую.

Исследования ударной сжимаемости ВВ [6, 7], как правило, проводят с большим шагом по интенсивности УВ, а в ряде случаев в диапазоне давлений, превышающих пределы инициирования детонации, в предположении, что на ударном фронте ВВ не успевает существенно разложиться. Отсутствие подробного исследования поведения ВВ при сжатии УВ, вызывающими химическое превращение вещества, затрудняет понимание механизма инициирования. В настоящей работе проводится исследование начальных стадий взрывчатого превращения прессованного тротила именно вблизи его пределов инициирования воспламенения и детонации при воздействии плоскими УВ ступенчатого профиля.

Схема эксперимента показана на рис. 1. В качестве плоскостного генератора УВ применялась пороховая пушка (внутренний диаметр ствола 1 составлял 50 мм, 2 — поршень). Скорость дюралюминиевого ударника 3 толщиной 9,2 мм измерялась с помощью двух электроконтактных датчиков 4 с погрешностью не более 0,5%. Значения скорости можно было предсказать с погрешностью 3%. Импульс давления с начальной амплитудой от 10 до 25 кбар вводился в образец 6 через дюралюминиевый экран 5 толщиной 5 мм. Образцы имели плотность 1,56 г/см³ и готовились прессованием молотого тротила, который представлял собой полидисперсный порошок с размерами частиц от 1 до 400 мкм (отдельные частицы). С помощью двух манганиновых датчиков давления 7, один из которых устанавливался на границе раздела экран — образец, а второй — во внутреннем сечении образца на расстоянии 6 мм от экрана, исследовалась эволюция УВ в образце. В экспериментах использовались датчики, полученные фототравлением из твердой манганиновой фольги марки МНМцАЖЗ-12-0, 25-0,2 толщиной 0,03 мм. Чувствительный элемент датчика занимал площадь 4 × 4 мм², начальное сопротивление датчика 3,5 Ом. От образца и экрана датчики изолировались фторопласто-

выми прокладками толщиной 60 мкм. Для регистрации использовалась электрическая схема, подобная описанной в работе [8]. Построение профилей давления производилось по результатам исследования зависимости относительного изменения сопротивления манганина от давления [9].

На рис. 2 приведены типичные осциллограммы опытов. Амплитуда инициирующей УВ определялась по профилю давления на контактной границе экран — образец, экстраполированному ко времени $t = 0$. Разброс значений давления на фронте для одной и той же скорости соударения, определенный по пяти опытам, не превышал 3%. Погрешность определения абсолютных значений давления составляет приблизительно 5—10%, так как включает в себя погрешность определения калибровочной кривой. Спад давления на осциллограммах соответствует приходу волны разрежения с тыльной стороны ударника. Первый датчик регулярно фиксировал упругий предвестник в дюралюминии. Его амплитуда 1—3 кбар, а опережение пластической волны 0,1—0,15 мкс, что согласуется с известной продольной скоростью звука в дюралюминии и размерами экрана. Второй датчик никаких характерных особенностей в структуре фронта волны не фиксировал, из чего можно заключить, что первый скачок давления на фронте при распространении волны по веществу быстро заглушается, а волна в тротиле в диапазоне 10—25 кбар не расщепляется. Кроме измерения профилей давления УВ в двух сечениях эксперимент позволяет определить осредненную на данной базе скорость УВ D и скорость волны разрежения.

Кривая ударного сжатия прессованного тротила в координатах $p - z$ строилась по экспериментально измеренным скорости ударника, давлению на фронте УВ на границе экран — образец и известной ударной адиабате материала ударника и экрана [10]. На основе приближения слабых волн строилась изэнтропа разгрузки экрана, пересечение с которой изобары, соответствующей начальной амплитуде УВ, дает точку на искомой ударной адиабате прессованного тротила.

Ударная адиабата, построенная по этим точкам, показана на рис. 3, *д*. Кривая 1 имеет слабо выраженный S-образный характер, и соответственно этому виду ее можно разбить на три участка: нижнюю ветвь до 13 кбар, переходной участок 13—21 кбар и верхнюю ветвь выше 21 кбар. На этом же рисунке приведены профили давления в двух сечениях для четырех различных интенсивностей УВ.

Анализируя совместно отдельные участки ударной адиабаты и соответствующие им профили давления, можно сделать ряд ценных выводов. Характерные для нижнего участка кривой профили давления имеют неизменный прямоугольный вид с равной амплитудой в обоих сечениях, что свидетельствует об отсутствии каких-либо химических реакций в тротиле, способных за время наблюдения усилить волну, т. е. нижняя часть кривой соответствует ударному сжатию «инертного» вещества. Выше какого-то определенного давления, в данном случае выше 13 кбар, что соответствует и началу переходного участка кривой сжатия, волна от сечения к сечению начинает усиливаться. А отсюда сразу следует, что поток за ее фронтом является реагирующим и что в тротиле происходит инициирование быстрого химического превращения. В работе [11] начало химического превращения прессованного тротила при приблизительно той же интенсивности УВ классифицировано как предел инициирования зажигания ТНТ.

При более детальном рассмотрении профилей давления, соответствующих переходному участку кривой сжатия, можно выделить два режима усиления инициирующей УВ: рост амплитуды давления на фронте от сечения к сечению и формирование в широкой зоне за фронтом скачка сжатия, который догоняет и усиливает головную часть волны. При малых интенсивностях УВ, когда скачок сжатия формируется на значительном

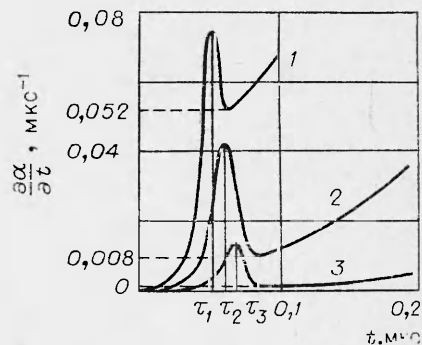
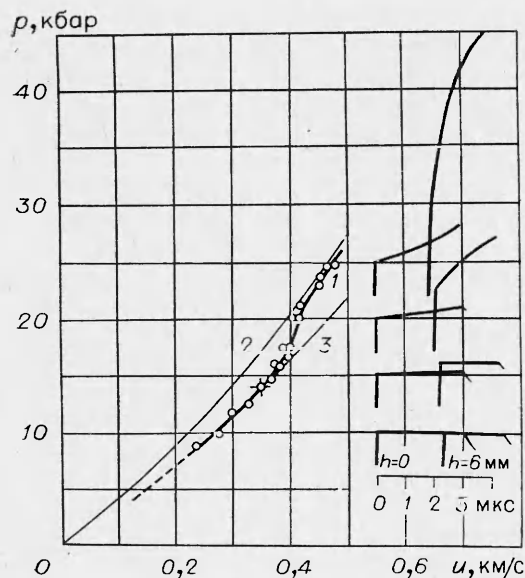


Рис. 4. Схема начальной стадии разложения ТНТ.

Рис. 3. p - u -зависимости для тротила и эволюции УВ различной интенсивности.

1 — экспериментальная ударная адиабата прессованного ТНТ с $\rho_0 = 1,56$ г/см³; 2 — ударная адиабата литого тротила с $\rho_0 = 1,614$ г/см³; 3 — предполагаемая ударная адиабата прессованного тротила с «замороженными» химическими реакциями.

удалении от фронта волны или может быть заблокирован волной разгрузки, приходящей с тыльной стороны ударника, рост давления на фронте волны не может быть объяснен перекачкой энергии от волны сжатия к фронту. Пояснить нарастание фронта волны можно лишь при допущении, что существует энерговыделение в области, локализованной в непосредственной близости от фронта ударной волны. На рис. 3 при интенсивности УВ 15 кбар амплитуда давления на фронте волны растет от сечения к сечению без заметного искажения профилей давления за фронтом. Скачок сжатия не наблюдается из-за малости времени индикации, и так как он блокируется «тыльной» волной разрежения, то усиление волны сзади маловероятно. Следовательно, усиление волны на фронте связано со скачком превращения вещества за времена, соизмеримые с характерным временем ширины фронта и меньшие временного разрешения методики (< 100 нс). А если это так, то измеренная ударная адиабата будет неявным образом отражать влияние скачка глубины химического превращения.

Предполагая монотонный характер кривой ударного сжатия химически инертного вещества, можно считать правомерным экстраполяцию нижней ветви кривой 1 к более высоким параметрам, считая ее как гипотетическую ударную адиабату прессованного тротила с «замороженными» химическими реакциями (см. рис. 3, 3). Кривую 3 можно описать линейной зависимостью $D = (1,92 + 1,7u)$ км/с, а кривую 2 — зависимостью $D = (2,3 + 2,15u)$ км/с, полученной усреднением данных [2,7]. Кривая 2 приведена в качестве примера ударной адиабаты вещества (литой тротил), предел инициирования детонации которого лежит значительно выше рассматриваемого диапазона давлений. Сравнивая ход кривых 1—3 и учитывая, что измеренная ударная адиабата несет в себе информацию о скачке превращения вещества на фронте УВ, можно предположить, что разница в положении кривых 1 и 3 и будет соответствовать энерговыделению на этом скачке.

При увеличении интенсивности УВ скачок сжатия начинает формироваться все ближе к голове УВ, и процесс инициирования определяется в основном скоростью энерговыделения во всей области за фронтом, а не в области, локализованной в непосредственной близости от фронта

(см. рис. 3, $p_{УВ} = 20$ кбар). При переходе к верхней части кривой ($p_{УВ} > 21$ кбар) можно наблюдать, что скачок сжатия начинает формироваться сразу же за фронтом УВ, что ведет к очень быстрому ускорению волны. Детали завершающей стадии перехода инициирующей УВ в детонационную в работе не исследовались. В [11] приблизительно тот же диапазон давлений ($p > 17$) назван пределом инициирования детонации прессованного тротила ($\rho_0 = 1,56$ г/см³).

Анализ профилей давления и особенностей ударной адиабаты прессованного ТНТ позволяет сделать по крайней мере два существенных вывода. Во-первых, существуют два режима усиления волны и, во-вторых, наблюдается немонотонность тепловыделения за счет химических реакций разложения во фронте УВ. Эта особенность проявляется в том, что выделение тепла происходит в очень узкой зоне, соизмеримой с шириной фронта. Здесь уместно пояснить, какой физический смысл вкладывается нами в термин фронт ударной волны. В физически неоднородных ВВ ударный фронт существенно неодномерен в отличие от однородных ВВ, и его ширину в первом приближении можно оценить как величину, пропорциональную размеру частиц ВВ. Эта зона характеризуется максимальными градиентами скорости вещества, давления, плотности и температуры, направление которых может не совпадать с направлением потока вещества. По этой причине здесь могут возникнуть высокие локальные разогревы, значительно превышающие средние значения по потоку.

Двустадийному характеру нарастания газодинамических параметров должна соответствовать и двустадийность протекания химической реакции в макрокинетическом смысле. Если предположить, что из-за неоднородности вещества на фронте УВ локальные разогревы возникают за счет вязкого трения зерен ВВ между собой в местах контакта, то толщина прогретого слоя будет определяться прежде всего механизмом трения, который, в свою очередь, зависит от физических свойств ВВ и интенсивности УВ. Учитывая очень короткие времена существования узкой зоны с высокими градиентами параметров или времена неоднородности, можно показать, что процесс разогрева в местах контакта зерен имеет адиабатический характер. Если при данной интенсивности УВ температура очагов достаточна, чтобы произошло их воспламенение за времена неоднородности, то будет иметь место усиление УВ. В противном случае произойдет тепловое рассасывание очага. Увеличивая интенсивность инициирующей УВ, всегда можно добиться того, что произойдет тепловое воспламенение отдельных горячих очагов за характерные времена неоднородности фронта. В нашем случае это приблизительно 13 кбар. При этом происходит выгорание прогретого за счет трения слоя вещества с высокой скоростью (взрывное горение), после чего при контакте фронта горения с холодным ядром зерна происходит погасание или замедление реакции до скорости, которая, в свою очередь, лимитируется теплопередачей.

Другим фактором, определяющим срыв реакции на первой стадии, может быть, по наш взгляд, газодинамическая разгрузка очага, т. е. волновые пульсации по зерну создают в зоне очага трещины, куда устремляются горячие продукты разложения, снижая тем самым температуру и давление в очаге. По мере роста интенсивности инициирующей УВ растет концентрация и температура очагов, с чем связано уменьшение времени задержки воспламенения. При этом доля разложившегося ВВ, а соответственно и тепловыделение, идущее непосредственно на усиление фронта увеличиваются, а вероятность полного погасания очагов с приходом разгрузки уменьшается (см. рис. 3, $p = 13-20$ кбар — кривая 1 все более отходит от кривой 3). При достижении давления в инициирующей УВ 20—22 кбар концентрация очагов, по-видимому, становится столь значительной, что происходит их взаимодействие до прихода в очаг

Номер кривой на рис. 4	$p_{УВ}$, кбар	τ_p , мкс	α_I , %	$\left(\frac{\partial \alpha_{II}}{\partial t}\right)_0$, мкс ⁻¹
1	25	0,060	0,2	0,052
2	19	0,062	0,1	0,008
3	10	0,071	0,01	0,0014

рис. 3) замедляется, так как концентрация очагов достигает своего максимума и рост тепловыделения в последующем определяется ростом параметров в самих очагах и, вероятно, дроблением. Этим можно объяснить второй перегиб на кривой 1.

Дальнейшее химическое превращение и основное тепловыделение происходит в широкой зоне за фронтом УВ. Оно развивается из реакционноспособных очагов, т. е. очагов, в которых реакция не затухла до конца, а происходит в виде горения с поверхности зерен, скорость которого лимитируется теплопередачей. Достаточно убедительные доводы в пользу такого механизма приведены в работах [11, 12]. При этом, если концентрация очагов была ниже максимальной, происходило расширение горячей поверхности в самом очаге и с какой-то задержкой — поджигание новых поверхностей расширяющимися горячими продуктами. Когда горение охватит всю поверхность зерен ВВ (сразу за фронтом УВ при максимальной концентрации очагов или через какое-то время за фронтом при меньшей концентрации очагов), реализуется режим горения частицы ВВ с поверхности в практически замкнутом объеме, равном начальному объему частицы, если пренебречь остаточной пористостью за фронтом и выгоранием слоя ВВ на первой стадии. При этом на скорость разложения влияют два конкурирующих фактора: рост давления в замкнутом объеме и уменьшение поверхности горения по мере разложения. Конечно, все это рассматривается при условии отсутствия волны разгрузки с поверхности заряда, которая сама может вызвать частичный или полный срыв реакции и соответственно замедлить или полностью прекратить (в зависимости от скорости и глубины разложения) развитие детонации в заряде.

Все изложенное выше иллюстрируется схемой на рис. 4 и таблицей. Здесь τ_p — время реакции на первой стадии. Поскольку определить (даже предположительно) время выгорания прогретого слоя частицы тротила в горячем очаге не представлялось возможным, τ_p определялось как время прохождения УВ по слою ВВ толщиной 100 мк и возвращения обратно волны разгрузки при соответствующей интенсивности УВ. α_I — это степень превращения вещества на первой стадии. Она рассчитывалась как приращение удельной внутренней энергии при переходе из состояния на кривой 3 в состояние на кривой 1 рис. 3

$$\Delta E_1 - \Delta E_3 = 1/2 \cdot p_1(v_0 - v_1) - 1/2 \cdot p_3 \cdot (v_0 - v_3).$$

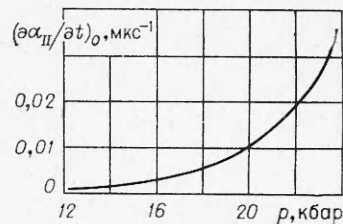
$(\partial \alpha_{II} / \partial t)_0$ — это начальная скорость разложения ТНТ на стадии II, подсчитанная по методу работы [13] по экспериментальному профилю давления УВ на контактной границе и зависимости скорости УВ от времени.

Зависимость $(\partial \alpha_{II} / \partial t)_0$ от интенсивности УВ приведена на рис. 5. Следует заметить, что абсолютные значения параметров разложения, приведенных в таблице, сугубо оценочные и, по нашему мнению, отражают лишь качественный характер процесса. Кривые скорости разложения ТНТ на первой стадии проведены из соображений экспоненциального характера зависимости скорости химической реакции при воспламенении от времени таким образом, чтобы площадь под кривой равнялась

разгрузки, т. е. фронт УВ поджигает практически всю поверхность частиц ВВ.

При дальнейшем наращивании интенсивности УВ скорость роста тепловыделения в зоне близкого действия, а следовательно, и расхождение кривых 1 и 3 (см.

Рис. 5. Зависимость начальной скорости разложения тротила за фронтом от амплитуды УВ.



степени разложения на первой стадии. Начальный участок зависимости скорости разложения на второй стадии построен, исходя из анализа литературных данных по ТНТ [5].

Хорошо подтверждает сказанное выше приемлемое согласие начальной скорости разложения за фронтом УВ для диапазона $p > 21$ кбар со скоростью разложения, вычисленной по линейной скорости горения ТНТ, полученной по экстраполяционной формуле из работы [14], $u = 0,25 + 45 p$ (мм/с), где p — в кбарах. Из рис. 5 для $p_{УВ} = 24$ кбар $(\partial\alpha_{II}/\partial t)_0 = 0,043$ мкс⁻¹. Скорость разложения, определенная по скорости горения, для сферических частиц, горящих по всей поверхности, равна для частиц размером 50 мкм 0,051 мкс⁻¹, а для частиц размером 100 мкм — 0,03 мкс⁻¹.

Поступила в редакцию
25/XII 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детоначионные волны в конденсированных средах. М., Наука, 1970.
2. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов.— В сб.: Взрывное дело, № 63/20. М., Недра, 1967.
3. С. А. Колдунов. Канд. дис. ОИХФ АН СССР, 1978.
4. Г. И. Канель, А. Н. Дремин. ФГВ, 1977, 13, 1.
5. Ю. М. Балинец, А. Н. Дремин, Г. И. Канель. ФГВ, 1978, 14, 3.
6. I. O. Egkman, D. I. Edwards. Sixth Simpos. on Detonation. USA, 1976.
7. N. Coleburn, T. Liddiard. J. Chem. Phys., 1965, 44, 1929.
8. Г. И. Канель. Применение манганиновых датчиков для измерения давления ударного сжатия конденсированных сред. ВИНТИ, № 477-74, Деп., 1974.
9. L. M. Lee. J. Appl. Phys., 1973, 44, 9, 4017.
10. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко и др. Физика взрыва. М., Наука, 1975.
11. B. C. Taylor, L. H. E zvin. Sixth. Simpos. on Detonation. USA, 1976.
12. P. Howe, R. Frey et al. Sixth Simpos. on Detonation. USA, 1976.
13. Г. И. Канель. ПМТФ, 1977, 5.
14. А. П. Глазкова, И. А. Терешкин. ЖФХ, 1961, 35, 7.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ТВЕРДЫХ ВВ

Н. Х. Ахмадеев

(Уфа)

Исследование физико-химических превращений, происходящих при распространении ударных волн в различных твердых средах и существенно влияющих на структуру и параметры течения, привели к необходимости разработки соответствующей модели реагирующей двухфазной сплошной среды. К числу таких физико-химических превращений можно отнести детонацию твердых взрывчатых веществ [1], когда в результате химической реакции образуются газообразные продукты взрыва, а также фазовые превращения с образованием новой кристаллической структуры, наблюдаемые в железе, углероде, во многих минералах и горных породах. Экспериментальные исследования показали, что времена подобных пре-