

# 07 Эмиссия плазмы, вылетающей из гетерогенного тела (гранита) под влиянием электрического разряда около его поверхности

© В.И. Веттегрень, И.П. Щербаков, В.С. Куксенко, Р.И. Мамалимов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Victor.Vettegren@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 19 марта 2014 г.)

Электрический пробой воздуха около пластинки гранита вызывает последовательное выделение нескольких сотен струй плазмы, состоящей из электронов, положительно заряженных ионов и атомов Si, O и др. Длительность выделения каждой из струй не превышает  $\sim 10$  ns, а величина интервала между ними изменяется от  $\sim 10$  до  $\sim 300$   $\mu$ s. Предполагается, что ударная волна увеличивает деформацию кристаллической решетки в скоплениях дислокаций до таких значений, при которых начинают пересекаться уровни основного и возбужденного состояний. Это приводит к переходам между электронными уровнями, распаду межатомных связей и вылету положительно заряженных ионов и электронов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-05-00011-а).

## 1. Введение

В настоящее время достигнуты большие успехи в области исследования деформации твердых тел под действием ударных волн [1–8]. О механизме разрушения судили по результатам исследования поверхности образцов, полученных при тыльном отколе, или по изменению скоростной зависимости профиля поверхности при образовании трещин. Впервые исследование разрушения хрупких тел непосредственно во время действия ударной волны было проведено в [9,10]. В этих работах с использованием метода регистрации флуоресценции (FL) с временным разрешением 10 ns были проведены исследования разрушения кварца и гранита под влиянием электрического разряда в воздухе около их поверхности. Было обнаружено, что ударная волна вызывает выделение струй плазмы, состоящих из электронов, положительно заряженных ионов и атомов, входящих в состав структурной формулы кварца и гранита. Оказалось, что время выделения каждой струи не превышает 10 ns, а интервал между ними изменяется от нескольких десятков до нескольких сотен микросекунд.

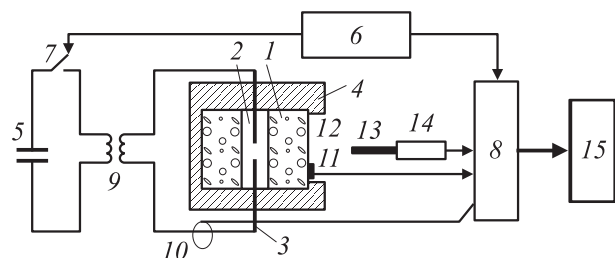
Настоящая работа продолжает цикл этих исследований. В ней предполагается выяснить механизм выделения ионов и ответить на вопрос: почему плазма выделяется в виде отдельных струй?

## 2. Объект и метод исследования

На рис. 1 представлена блок-схема установки. Для исследований был выбран образец гранита 1 с содержанием кварца  $\sim 30$  vol.% и полевого шпата  $\sim 70$  vol.%. Он представлял собой параллелепипед с размерами ребер  $10 \times 10 \times 5$  mm. Образец прижимался к другому параллелепипеду из такого же гранита с размерами ребер  $10 \times 10 \times 6$  mm, в котором прорезан паз 2 глубиной

и шириной  $\sim 1$  mm. В нем располагались медные электроды 3, расстояние между которыми составляло 3 mm. Оба параллелепипеда помещались внутрь медной камеры 4. После зарядки конденсатора 5 с помощью синхронизирующего генератора 6 запускался электронный ключ 7 и аналогово-цифровой преобразователь 8 (ADC) регистрируемых сигналов АСК-3106. После замыкания электронного ключа конденсатор разряжался через первичную обмотку высоковольтного трансформатора 9. Во вторичной обмотке трансформатора возникало высокое напряжение, которое приводило к разряду между электродами.

Было проведено две серии экспериментов. Цель первой заключалась в том, чтобы получить спектр плазмы и исследовать ее состав. Для этой цели конденсатор 5 емкостью  $40 \mu$ F был заряжен до 2 kV, что соответствует запасенной энергии 80 J. При разряде конденсатора с поверхности гранита вылетала струя плазмы длиной до  $\sim 0.8$  m (фотография струи приведена в [9]). Излуча-



**Рис. 1.** Блок-схема установки. 1 — образец гранита, 2 — паз, 3 — медные электроды, 4 — медная камера, 5 — конденсатор, 6 — синхронизирующий генератор, 7 — электронный ключ, 8 — аналогово-цифровой преобразователь, 9 — высоковольтный трансформатор, 10 — пояс Роговского, 11 — пьезо-керамика, 12 — окно, 13 — кварцевый световод, 14 — фотоэлектронный умножитель, 15 — компьютер.

чение плазмы попадало на вход кварцевого световода, второй конец которого располагался перед входным окном спектрометра AvaSpec-ULS3648. Проследить за динамикой FL в таких условиях не удалось.

Поэтому во второй серии экспериментов емкость конденсатора и вторичная обмотка трансформатора были подобраны таким образом, чтобы за время измерения разряд не приводил к разрушению образца на фрагменты. Как показали предварительные измерения, энергия разряда, удовлетворяющая такому условию, составляет  $\sim 0.2$  Дж, а мощность —  $2 \cdot 10^5$  Вт.

Для исследования временной зависимости выделяемой при разряде энергии использовался пояс Роговского 10, соединенный с емкостью на входе ADC. Поэтому показания ADC соответствовали току, протекающему через пояс Роговского, величина которого пропорциональна току разряда.

Разряд приводил к колебаниям пластинки гранита, которые регистрировались с использованием датчика из пьезокерамики CTS-19 (11) (размеры датчика  $4 \times 4 \times 1$  мм). Для исследования временной зависимости FL перед окном 12 устанавливался один из концов кварцевого световода 13. Второй конец световода располагался перед поверхностью фотокатода фотоэлектронного умножителя PMT-136 (14).

Напряжения на пьезокерамике и выходе PMT подавались на вход АСК-3106 (8) и через каждые 10 нс записывались в память компьютера 15 для дальнейшего анализа и обработки.

На рис. 2 показана временная зависимость квадрата силы тока  $I$ , пропорциональная мощности, выделяемой при горении дуги. Видно, что разряд возникает через  $\sim 15$  мкс после замыкания электронного ключа. Через  $\sim 3.5$  мкс мощность, выделяемая при разряде, достигает максимального значения, а еще через  $\sim 12$  мкс разряд гаснет. Время существования разряда (ширина максимума на половине его высоты) составляет  $\sim 6.4$  мкс.

При электрическом разряде в промежутке между двумя медными проводниками образуется плазма, со-

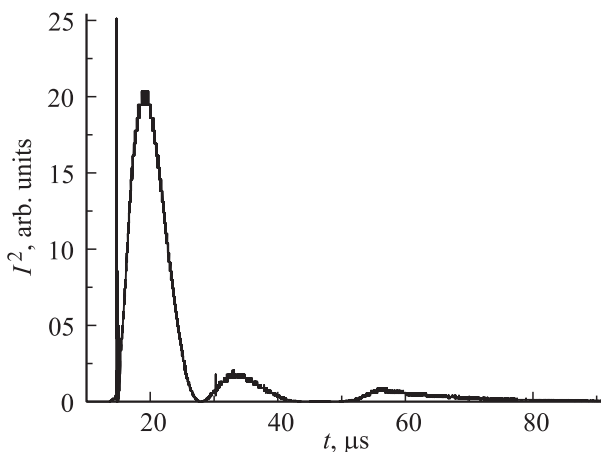


Рис. 2. Временная зависимость квадрата силы тока при разряде.

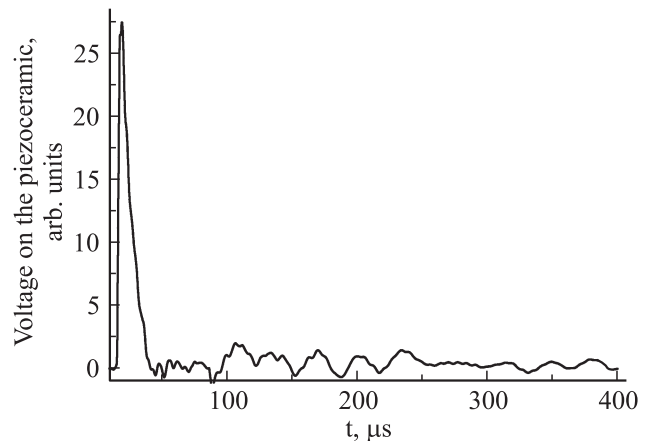


Рис. 3. Временная зависимость напряжения на пьезоэлементе.

стоящая из микрочастиц, атомов и ионов Cu [11]. Она вызывает появление в граните ударной волны сжатия, которая через  $\sim 16$  мкс после замыкания электронного ключа добегает до поверхности образца. Напряжение на пьезоэлементе начинает расти и достигает максимального значения еще через  $\sim 6$  мкс (рис. 3). Затем напряжение уменьшается и еще через  $\sim 13$  мкс начинает осциллировать вокруг среднего значения. Амплитуда осцилляций монотонно уменьшается и через  $\sim 500$  мкс становится незаметной.

### 3. Спектр фрактолюминесценции гранита, вызванной ударной волной

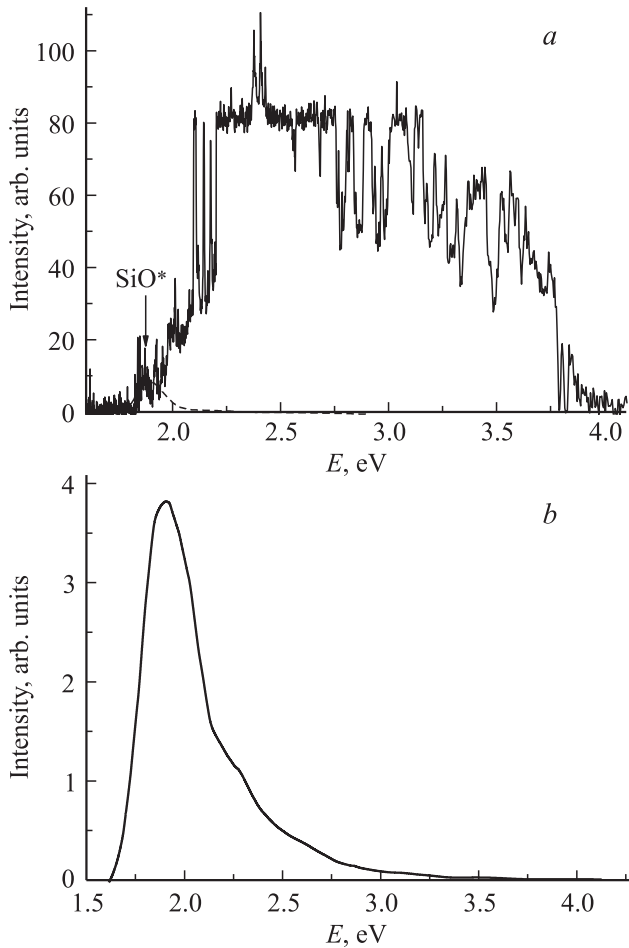
Через  $\sim 1$  мкс после разряда возникает FL. Ее спектр состоит из нескольких десятков наложенных друг на друга линий (рис. 4, а). Для примера одна из линий показана на рис. 5. Воспользовавшись таблицами спектральных линий [12], мы установили, что они соответствуют излучению возбужденных ионов и атомов Si, O, Ca, Al, Fe, N и Cu. Таким образом, под влиянием ударной волны часть гранита распыляется до отдельных заряженных ионов и нейтральных атомов.

Измерив ширину линий  $\Gamma$ , можно оценить среднее время  $\tau$  существования ионов и атомов в возбужденном состоянии:  $\tau \approx 1/2\pi c\Gamma$ , где  $c$  — скорость света. Так, например, линия 2.145 эВ, показанная на рис. 5, соответствует излучению иона  $\text{Cu}^+$  [12]. Ее ширина (на половине высоты) равна  $\sim 0.006$  эВ, и среднее время существования иона  $\text{Cu}^+$  в возбужденном состоянии составляет  $\tau \approx 1$  нс. Приблизительно такие же времена ( $\tau \approx 1-10$  нс) были получены и для других ионов и атомов.

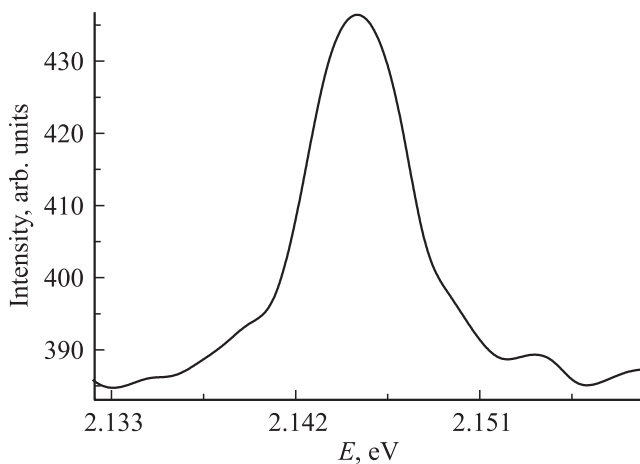
Атомы Si и O входят в состав структурной формулы кварца. В состав полевого шпата кроме них входят атомы Al и Ca. Поэтому ионы Si, O, Al и Ca образовались при распылении кристаллов кварца и полевого шпата. Ионы Cu, вероятно, вылетели из медных электродов, а ионы азота появились при бомбардировке молекул азота

воздуха потоками ионов и электронов, вылетевших из образца. Атомы Fe входят в качестве примеси в состав кварца и полевого шпата.

Одновременно с вылетом струи образцы гранита разрушались на фрагменты с линейными размерами от  $\sim 1 \mu\text{m}$  до 2–3 mm.



**Рис. 4.** Спектры FL гранита, инициированные ударной волной (a) и возникающие при трении (b).



**Рис. 5.** Линия 2.145 eV в спектре FL гранита.

Ранее проведенные исследования [13–19] показали, что при трении, размоле и ударе бойком по поверхности гранита и кварца в спектре FL наблюдается полоса с максимумом  $\sim 1.9 \text{ eV}$  (рис. 4, b). Она была приписана возбужденным радикалам  $\text{SiO}^*$ , образующимся при разрывах связей Si–O–Si [13–19]. Рассмотрение поверхности кварца и гранита в оптический микроскоп показало, что удар бойком по их поверхности вызывает появление трещин с линейными размерами от  $10 \mu\text{m}$  до нескольких миллиметров [17]. На этом основании было сделано заключение, что возбужденные ионы  $\text{SiO}^*$  располагаются на берегах растущих микротрещин.

В то же время рассмотрение спектра FL, вызванной ударной волной (рис. 4, a), показывает, что на фоне линий излучения плазмы эту полосу не удается выделить. Такой же результат был получен в [9,10] при исследовании разрушения кварца и гранита под влиянием разряда около их поверхности: в спектрах излучения этих тел полосу с максимумом  $\sim 1.9 \text{ eV}$  не удалось обнаружить. Рассмотрение поверхностей гранита и кварца в оптический микроскоп показало, что после разряда около поверхности кварца и гранита на них отсутствуют микротрещины.

Это показывает, что механизмы разрушения при трении и воздействии ударной волны различны.

Очевидно, что скорость разрушения при трении, размоле и механическом ударе не может быть выше скорости деформации материала. Для гранита и кварца она равна  $\sim 1 \text{ km/s}$  [18,19], а скорость ударной волны, вызванной разрядом около поверхности гранита, в 5 раз выше ( $\sim 5 \text{ km/s}$ ) [10]. По-видимому, это различие скоростей и является основной причиной различия механизмов разрушения.

В работах [20–27] был предложен механизм разрушения, не связанный со скоростью роста трещин. Авторы показали, что при значительном растяжении химических связей в полимерах энергия ионизации макромолекул понижается настолько, что возможен переход электронов в глубокие ловушки с последующим распадом ослабленных связей в макромолекулах. Затем они же установили, что при сильных искажениях кристаллической решетки в скоплениях дислокаций в ионных кристаллах возможно пересечение уровней основного и возбужденного состояний. Это может приводить к неадиабатическим переходам между электронными уровнями и последующему распаду межатомных связей.

Важно, что при распаде макромолекул и кристаллической решетки в ионных кристаллах выделяются положительные ионы и электроны. Плазма, вылетающая из гранита и кварца [9,10], тоже состоит из положительных ионов. Кроме ионов в спектре плазмы наблюдаются также нейтральные атомы. Согласно [20], они образуются при столкновении положительно заряженных ионов и электронов. Таким образом, в согласии с механизмом, предложенным в [21–27], под влиянием ударной волны, вызванной электрическим разрядом, из гранитов и

кварца выделяются положительно заряженные ионы и электроны.

Это позволяет предложить следующий механизм разрушения твердых тел под действием ударной волны. Пробегая через скопления дислокаций, она „дотягивает“ сильно деформированные межатомные связи около дислокаций до таких значений, при которых начинают пересекаться уровни основного и возбужденного состояний. Это приводит к неадиабатическим переходам между электронными уровнями, последующему распаду межатомных связей и вылету положительно заряженных ионов и электронов.

Существенно, что этот механизм разрушения не включает в себя явление зарождения микротрещин путем последовательного разрыва связей SiO под влиянием термических флуктуаций. Разрушение происходит атермическим путем и не зависит от температуры и скорости нагружения.

При скоростях нагружения, меньших скоростей деформации материала, он маскируется дислокационным механизмом разрушения. Действительно, авторы работ [21–27] наблюдали в вакууме выделение положительных ионов и электронов при скоростях нагружения, существенно меньших скорости звука. В оптических спектрах, полученных при трении кварца и гранитов, нам не удалось зафиксировать спектры возбужденных ионов (рис. 4, *b*). По-видимому, интенсивность их излучения в атмосфере воздуха намного меньше интенсивности возбужденных радикалов SiO\* на берегах микротрещин.

Наоборот, при нагружении со скоростью, близкой к скорости звука, и выше дислокационный механизм образования микротрещин отсутствует и его место занимает механизм разрушения путем выделения положительно заряженных ионов и электронов.

#### 4. Временная зависимость FL

Временная зависимость FL представляет собой серию вспышек (рис. 6 и 7). Длительность серии зависит от энергии разряда. Так, при энергии разряда 0.08 J длительность серии составляет  $\sim 100 \mu\text{s}$  (рис. 6). При увеличении энергии разряда до 0.2 J длительность свечения растет, и наряду с первой серией появляется вторая (рис. 7). Первая серия длится от 16 до  $316 \mu\text{s}$ , а вторая — от 376 до  $641 \mu\text{s}$ . Таким образом, длительность свечения значительно превышает время разряда ( $\sim 6.4 \mu\text{s}$ ) и, вероятно, задана временем до затухания ударной волны в образцах.

Анализ формы вспышек показал, что они одинаковы: сначала (в течение  $t_i \approx 10 \text{ ns}$ ) интенсивность достигает максимального значения, а затем уменьшается экспоненциально в зависимости от времени со средним временем затухания  $t_r \approx 20 \text{ ns}$  (рис. 8). Постоянство значений  $t_i$  и  $t_r$  обусловлено особенностями конструкции прибора, так как интервал между двумя записями интенсивности

сигнала ADC составляет 10 ns, а среднее время уменьшения интенсивности сигнала от него после прекращения свечения (определяемое величиной паразитной

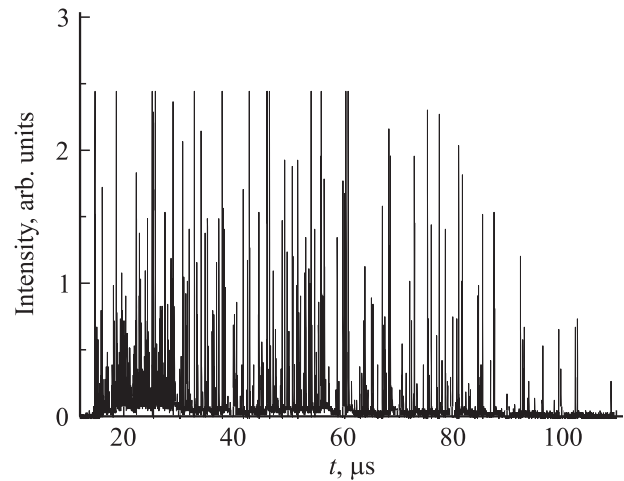


Рис. 6. Временная зависимость интенсивности FL при энергии разряда 0.08 J.

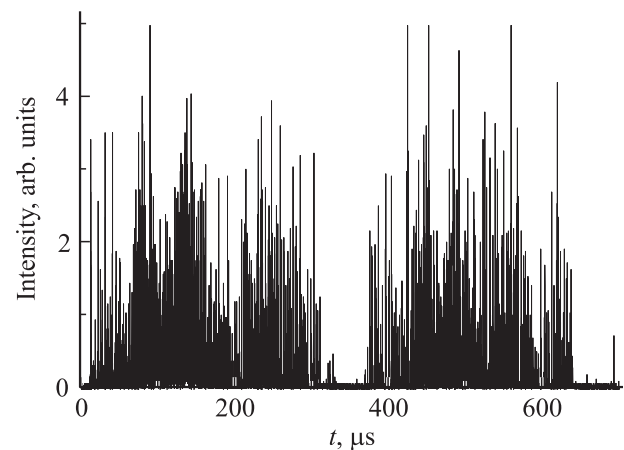


Рис. 7. Временная зависимость интенсивности FL при энергии разряда 0.2 J.

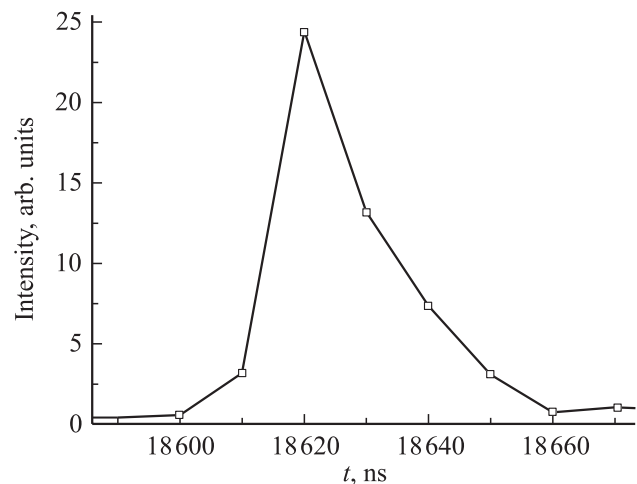
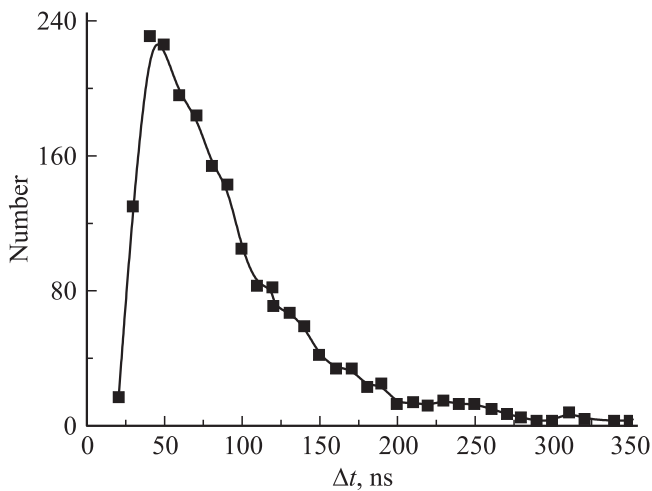


Рис. 8. Форма одиночной вспышки FL.



**Рис. 9.** Распределение временных интервалов между вспышками.

емкости и сопротивлением нагрузки)  $\sim 20$  ns. Таким образом, наша установка позволяет только зарегистрировать появление вспышек, но не обладает достаточным временным разрешением для того, чтобы определить временную зависимость их интенсивности.

Оказалось, что распределение временных интервалов  $\Delta t$  между вылетами струй плазмы не зависит от энергии разряда и имеет выраженную асимметрию в сторону больших времен (рис. 9). Вероятно, оно отражает распределение времен, при которых ударная волна „дотягивает“ наиболее деформированные межатомные связи около дислокаций до их распада, приводящего к вылету положительных ионов и электронов.

## 5. Выводы

1. Ударная волна вызывает появление нескольких сотен струй плазмы, состоящей из положительно заряженных ионов.

2. Время выделения каждой струи меньше 10 ns, а величина интервала между ними изменяется от 20  $\mu$ s до нескольких сотен микросекунд.

## Список литературы

- [1] M.A. Meyers, C.T. Aimon. *Progr. Mater. Sci.* **28**, 1 (1983).
- [2] R.W. Armstrong, S.M. Walley. *Int. Mater. Rev.* **53**, 105 (2008).
- [3] В.В. Адушкин, А.А. Спивак. *Геомеханика крупномасштабных взрывов*. Недра, М. (1993). 319 с.
- [4] В.Е. Фортов. *УФН* **177**, 348 (2007).
- [5] Г.И. Канель, В.Е. Фортов, С.В. Разоренов. *УФН* **177**, 809 (2007).
- [6] G.I. Kanel, S.V. Razorenov, V.E. Fortov. *Shock-wave phenomena and the properties of condensed matter*. Springer, NY. (2004). 322 p.
- [7] H.I.P. Galvez. *Miner. Eng.* **24**, 1638 (2011).
- [8] Г.А. Малыгин, С.Л. Огарков, А.В. Андрияш. *ФТТ* **55**, 721 (2013).
- [9] В.И. Веттегрень, А.В. Воронин, В.С. Куксенко, Р.И. Мамалимов, И.П. Щербаков. *ФТТ* **56**, 315 (2014).
- [10] В.И. Веттегрень, И.П. Щербаков, А.В. Воронин, В. С. Куксенко, Р.И. Мамалимов. *ФТТ* **56**, 981 (2014).
- [11] К.Б. Абрамова, И.П. Щербаков, А.И. Русаков. *ЖТФ* **69**, 2, 137 (1999).
- [12] А.Н. Зайдель, В.К. Прокофьев, С.М. Райский, Е.Я. Шрейдер. *Таблицы спектральных линий*. Физматгиз, М. (1952). 608 с.
- [13] G.N. Chapman, A.J. Walton. *J. Appl. Phys.* **54**, 5961 (1983).
- [14] А.Н. Стрелецкий, А.Б. Пакович, П.Ю. Бутягин. *Изв. АН СССР. Сер. хим.* **50**, 3, 477 (1986).
- [15] Y. Kawaguchi. *Phys. Rev. B* **52**, 9224 (1995).
- [16] Y. Kawaguchi. *Phys. Rev. B* **54**, 9721 (1996).
- [17] В.И. Веттегрень, А.Я. Башкарев, Р.И. Мамалимов, И.П. Щербаков. *ФТТ* **50**, 29 (2008).
- [18] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, И.П. Щербаков. *ЖТФ* **81**, 4, 148 (2011).
- [19] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, И.П. Щербаков. *ФТТ* **54**, 1342 (2012).
- [20] И.А. Семиохин. *Элементарные процессы в низкотемпературной плазме*. Изд-во МГУ, М. (1988). 142 с.
- [21] В.А. Закревский, В.А. Пахотин. *ФТТ* **20**, 371 (1978).
- [22] В.А. Закревский, В.А. Пахотин. *Высокомолекуляр. соединения А* **23**, 658 (1981).
- [23] В.А. Закревский, В.А. Пахотин. *ФТТ* **52**, 1083 (2010).
- [24] В.А. Закревский, В.А. Пахотин. *Механика композит. материалов I*, 139 (1981).
- [25] V.A. Zakrevskii, A.V. Shuldiner. *Phil. Mag. B* **71**, 2, 127 (1995).
- [26] В.А. Закревский, А.В. Шульдинер. *ФТТ* **41**, 900 (1999).
- [27] A.V. Shuldiner, V.A. Zakrevskii. *Rad. Protection Dosimetry* **65**, 1–4, 113 (1996).