

## Динамика деформации и разрушения гетерогенного тела (гранита) под влиянием электрического разряда

© В.И. Веттегрень, И.П. Щербаков, А.В. Воронин, 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 21 ноября 2013 г.)

Построена установка, позволяющая одновременно регистрировать с временным разрешением 10 ns флуоресценцию, а также электромагнитную эмиссию и деформацию поверхности твердого тела, возникающие при его разрушении под действием ударной волны. На ней исследованы временные зависимости деформации и разрушения пластинки гранита, вызванной электрическим пробоем с энергией 0.2 J в воздухе около ее поверхности. Найдено, что пробой вызывает появление в граните ударной волны, скорость которой составляет  $\sim 5$  km/s. Ударная волна стимулирует выделение с ее поверхности плазмы, состоящей из атомов и ионов, входящих в состав гранита. Предполагается, что появление плазмы вызвано кумуляцией энергии ударной волны в микропорах, содержащихся в граните.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-05-00011-а).

### 1. Введение

К настоящему времени достигнуты большие успехи в области исследования деформации твердых тел под действием ударных волн [1–9]. Использование лазерных доплеровских интерферометров и манганиновых датчиков позволило надежно регистрировать профили скорости поверхности твердых тел, подвергнутых действию ударной волны, и определять напряжение откольного разрушения. Начато строительство модели ударной волны на основе рассмотрения эволюции дислокационной структуры [10].

Однако экспериментальные исследования динамики разрушения на микроуровне в поле ударной волны до настоящего времени отсутствовали. О механизме разрушения судили по результатам исследования поверхности образцов, полученных при тыльном отколе, или по изменению скоростной зависимости профиля поверхности при образовании трещин.

В настоящей работе для исследования динамики разрушения хрупкого гетерогенного тела — гранита под влиянием электрического разряда в воздухе около его поверхности был применен метод регистрации флуоресценции (FL) с временным разрешением 10 ns. Ранее этим методом были обнаружены два различных явления.

В [11,12] установлено, что при ударе бойком по поверхности гранита и кварца в них создаются микротрещины. На их берегах располагаются возбужденные ионрадикалы  $\text{SiO}^*$ , образовавшиеся при разрыве SiOSi-связей. Энергия их возбуждения выделяется в виде излучения в видимой области спектра и может быть зарегистрирована методом FL.

В работе [13] было обнаружено, что при разрушении монокристалла кварца под действием ударной волны

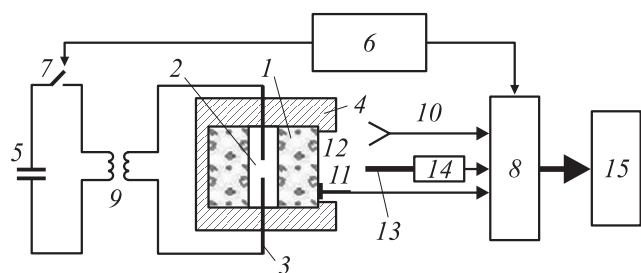
выделяется струя плазмы, состоящая из ионов и атомов кремния и кислорода. Несмотря на то, что кристалл кварца распался на фрагменты с линейными размерами от  $\sim 1 \mu\text{m}$  до  $\sim 20 \text{mm}$ , в спектре люминесценции полоса, соответствующая ион-радикалам  $\text{SiO}^*$  отсутствовала. Стало неясным, каков же механизм распада на фрагменты? Эти результаты стимулировали постановку настоящего исследования.

Предполагалось решить три задачи:

- выяснить образуется ли при разрушении гранита под действием ударной волны плазма?
- исследовать динамику развития разрушения в поле ударной волны;
- изучить динамику распространения ударной волны в образце гранита и определить ее скорость.

### 2. Объект и метод исследования

На рис. 1 представлена блок-схема установки. Образец гранита (1) представляет собой параллелепипед с размерами ребер  $10 \times 10 \times 5 \text{mm}$ . Он прижимался к другому параллелепипеду из гранита с размерами ребер  $10 \times 10 \times 6 \text{mm}$ , в котором прорезан паз глубиной и шириной  $\sim 1 \text{mm}$  (2). В нем располагались медные электроды (3), расстояние между которыми — 3 mm. Оба параллелепипеда помещали внутри медной камеры (4). Конденсатор (5) заряжался до 300 V, затем с помощью синхронизирующего генератора (6) запускался электронный ключ (7) и аналогоцифровой преобразователь регистрируемых сигналов АСК-3106 (8). После замыкания электронного ключа конденсатор разряжался через первичную обмотку высоковольтного трансформатора (9). Во вторичной обмотке трансформатора возник



**Рис. 1.** Блок-схема установки для исследования временных зависимостей деформации и люминесценции гранита: 1 — исследуемый образец; 2 — паз; 3 — электроды; 4 — камера; 5 — конденсатор; 6 — синхронизирующий генератор; 7 — электронный ключ; 8 — аналоговоцифровой преобразователь; 9 — высоковольтный трансформатор; 10 — диполь Герца; 11 — датчик из пьезокерамики; 12 — окно; 13 — кварцевый световод; 14 — фотоэлектронный умножитель; 15 — компьютер.

кало высокое напряжение, которое приводило к разряду между электродами.

Чтобы проследить за развитием разрушения, 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, — 0.2 J.

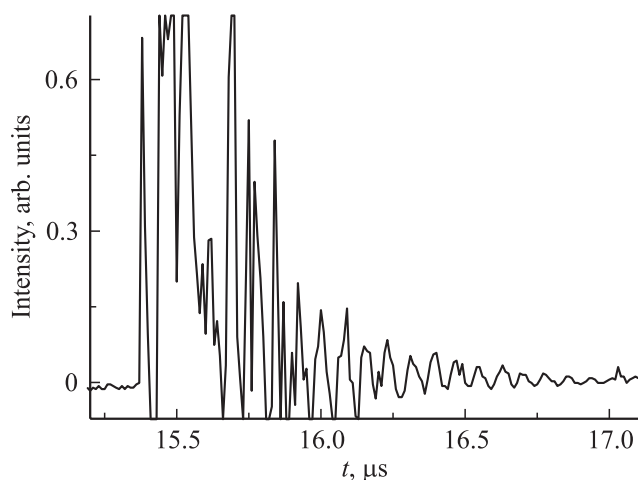
Разряд приводил к колебаниям пластинки гранита, которые, вследствие пьезоэффекта, вызвали появление электромагнитной эмиссии (ЕЕ). Ее регистрировали диполем Герца с длиной плеча  $\approx 50$  см (10). Для измерения деформации поверхности образца на ней располагали датчик из пьезокерамики CTS-19 (11) (размеры датчика —  $4 \times 4 \times 1$  мм).

Для исследования временной зависимости FL перед окном (12) устанавливали один из концов кварцевого световода (13). Второй конец световода располагали перед поверхностью катода фотоэлектронного умножителя РЕМ-136 (14). Напряжения на выходе диполя Герца, пьезокерамики и фотоэлектронного умножителя подавали на аналоговоцифровой преобразователь (ADC) АСК-3106 (8) и через каждые 10 ns записывали в память компьютера (15) для дальнейшего анализа и обработки.

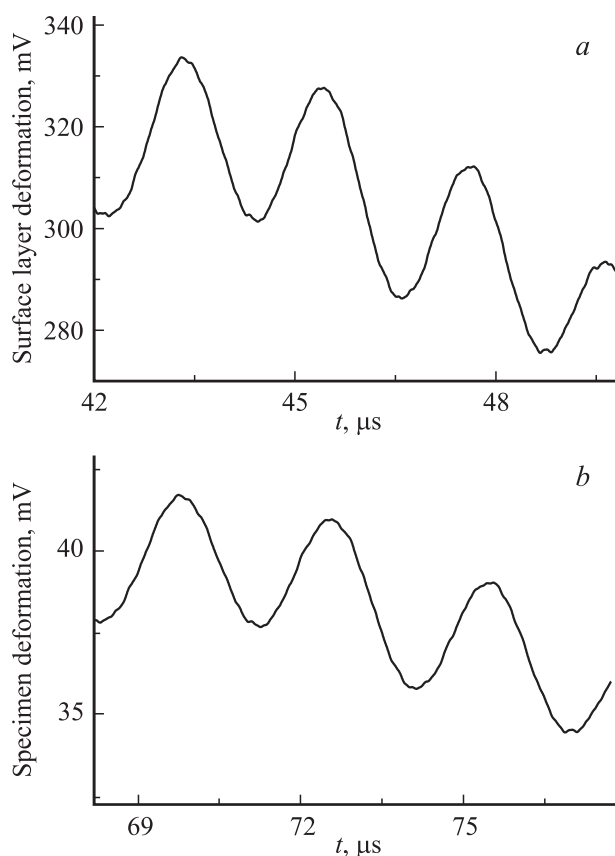
### 3. Деформация гранита под действием ударной волны

При разряде между медными проводниками возникали скачки электромагнитного поля, которые вызвали скачки напряжения на линии между РЕМ и ADC. Исследование этих скачков позволяет проследить за развитием разряда во времени. Так на рис. 2 показан фрагмент временной зависимости напряжения, зарегистрированной на входе ADC. Видно, что разряд между концами медных проводников загорается через  $15.4 \mu\text{s}$  после замыкания

электромагнитного ключа. Временные изменения амплитуды и знака напряжения в процессе разряда вызваны перезарядкой конденсаторов, входящих в электрическую цепь. Амплитуда скачков достигает максимального значения через  $0.1\text{--}0.2 \mu\text{s}$ , затем уменьшается и стремится к нулю через  $1.6 \mu\text{s}$  после возникновения разряда. Среднее время существования разряда составляет  $0.4 \mu\text{s}$ .



**Рис. 2.** Временная зависимость напряжения на входе ADC при разряде.



**Рис. 3.** Фрагменты временных зависимостей деформации пластинки гранита в единицах напряжения на пьезодатчике — (a) и диполе Герца — (b).

Скорость ударной волны  $v_i$  оценили по времени пробега от конца образца, около которого был произведен разряд, до другого, на котором был установлен датчик из пьезокерамики CTS-19. Оказалось, что она равна  $\sim 5$  km/s. Более точное значение скорости было получено из анализа временных зависимостей напряжения на пьезокерамике и диполе Герца. Оказалось, что после разряда в образце гранита появляются колебания с периодом  $\tau \sim 2.1\text{--}2.2 \mu\text{s}$  (рис. 3). По-видимому, они вызваны интерференцией ударной волны на противоположных гранях исследуемого образца. Тогда можно определить скорость ударной волны:  $v_i = 2L/\tau = 10 \cdot 10^{-3}/2.1 \cdot 10^{-6} = 4.8$  km/s.

#### 4. Фрактोलюминесценция гранита в ударной волне

Оказалось, что после выхода ударной волны на поверхность гранита, она начинает люминесцировать. Временная зависимость интенсивности FL имеет вид одиночных вспышек (рис. 4), интервал между ними составлял несколько десятков ns. Анализ формы вспышек показал, что она одинакова: за 10 ns интенсивность достигает максимального значения, а затем уменьшается экспоненциально от времени со средним временем затухания — 30 ns. Постоянство этих значений обусловлено особенностями конструкции прибора, т.к. интервал между двумя записями интенсивности сигнала ADC составляет 10 ns, а среднее время уменьшения интенсивности сигнала от него после прекращения свечения (определяемое величиной паразитной емкости и сопротивлением нагрузки) — 30 ns. Таким образом, наша установка позволяет только зарегистрировать появление вспышек, но не обладает достаточным временным разрешением, чтобы определить действительную временную зависимость их интенсивности. Тем не менее постоянство формы вспышек показывает, что время их существования не превышает 10 ns.

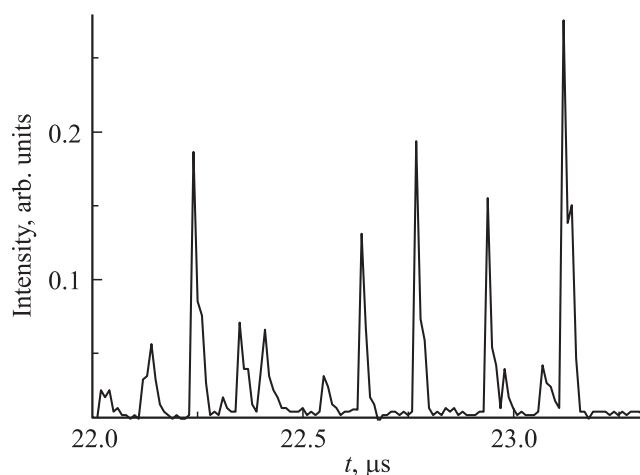


Рис. 4. Фрагмент временной зависимости интенсивности люминесценции гранита.

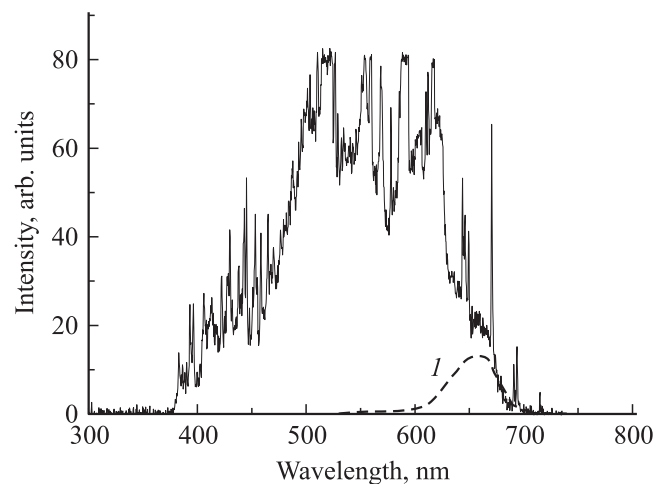


Рис. 5. Спектр люминесценции гранита в поле ударной волны. 1 — полоса 650 nm, соответствующая ионам  $\text{SiO}^*$  и наблюдаемая в спектрах фрактोलюминесценции гранита при механическом ударе по его поверхности.

Чтобы выяснить причину появления вспышек люминесценции, рассматривали поверхность гранита в оптический микроскоп. Оказалось, использованная нами энергия разряда — 0.2 J недостаточна для появления на ней заметного количества трещин с линейными размерами в несколько десятков  $\mu\text{m}$ . (Отметим, что такие трещины легко обнаруживаются при помощи оптического микроскопа после удара бойком по поверхности гранита [12]).

Тем не менее, гранит люминесцирует. Интенсивность люминесценции слишком мала, чтобы получить спектр и выяснить ее природу. Чтобы решить эту задачу, конденсатор (4) в установке, схема которой изображена на рис. 1, был заменен на другой, емкость которого составляет — 40  $\mu\text{F}$ . Он был заряжен до 2 kV, что соответствует запасенной энергии 80 J. Это привело к увеличению интенсивности FL на три порядка. Оказалось, что в этом случае под действием ударной волны из гранита вылетает струя плазмы длиной в несколько десятков см. (Внешне она выглядит точно также как, и струя, вылетающая из кварца при его разрушении ударной волной [13]). Чтобы частицы гранита, вылетевшие из поверхности гранита при его разрушении, не попадали на вход световода, его конец отодвинули на расстояние  $\sim 1$  m от поверхности образца. Второй конец световода располагали перед входным окном высоко-разрешающего (разрешение — 0.25 nm) спектрометра AvaSpec-ULS3648.

Оказалось, что спектр струи плазмы состоит из нескольких десятков узких (шириной  $\sim 0.5\text{--}1$  nm) линий (рис. 5). Воспользовавшись таблицами спектральных линий [14] установили, что они соответствуют излучению возбужденных четырех, двух, однозарядных ионов и атомов Si, O, K, Ca, Al, Na, Fe, Mn, N и Cu. Таким образом, под влиянием ударной волны часть

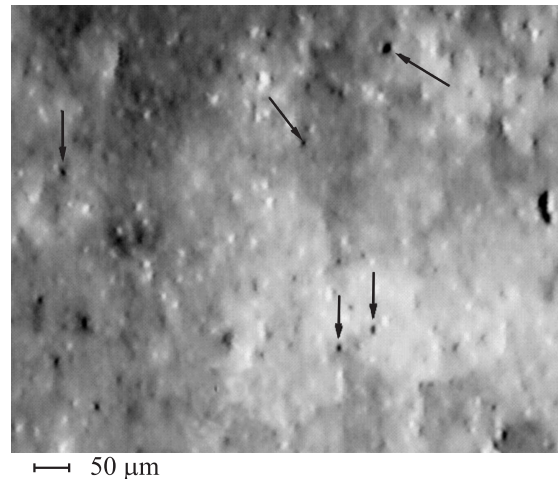
гранита распыляется до отдельных заряженных ионов и нейтральных атомов.

Известно [15], что граниты содержат  $\approx 30\text{--}40\%$  (vol.) зерен кварца и  $60\text{--}70\%$  (vol.) полевых шпатов. Атомы Si и O входят в состав структурной формулы кварца. В состав полевого шпата, кроме них, входят атомы K, Na, Al и Ca. Поэтому ионы Si, O, K, Na, Al и Ca образовались при распылении кристаллов кварца и полевого шпата. Ионы Cu, вероятно, вылетели из медных электродов, а азота — появились при бомбардировке молекул азота воздуха потоками ионов и электронов плазмы. Чтобы объяснить появление атомов и ионов Fe и Mn, мы обратились к описанным в литературе результатам измерений примесей, существующих в гранитах [16]. В этих исследованиях было найдено, что граниты содержат примесные ионы Fe и Mn, концентрация которых достигает  $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Вероятно, под действием ударной волны примесные ионы тоже вылетают из образца и входят в состав плазмы. За время существования плазмы ионы сталкиваются с электронами [17]. В результате их заряд уменьшается. Поэтому в плазме, помимо ионов, наблюдаются и нейтральные атомы.

Одновременно с вылетом струи, образцы гранита разрушались на фрагменты с линейными размерами от  $\sim 1 \mu\text{m}$  до  $2\text{--}3 \text{ mm}$ . Принято считать, что фрагменты могут образоваться только при растрескивании. Ранее проведенные исследования [12], показали, что при разрыве межатомных связей в граните на берегах растущих микротрещин образуются возбужденные ионы  $\text{SiO}^*$ . В спектре FL им соответствует широкая (ширина на половине интенсивности  $\sim 80 \text{ nm}$ ) полоса с максимумом  $\sim 600 \text{ nm}$ . Рассмотрение рис. 5 показывает, что на фоне сильных линий излучения плазмы эта полоса практически не проявляется.

Это ставит вопрос о механизме разрушения гранита под действием ударной волны. Действительно, при механических ударах по поверхности гранита люминесцировали только ионы-радикалы  $\text{SiO}^*$  на берегах растущих микротрещин [12], а люминесценция плазмы не наблюдалась. В тоже время при разрушении под действием ударной волны люминесценция таких радикалов не наблюдалась. Либо они не образуются, либо их концентрация слишком мала, чтобы быть зафиксированной методом FL.

Вернемся вновь к рассмотрению временных зависимостей люминесценции пластинки гранита (рис. 4). Как уже отмечалось, они представляют собой ряд отдельных всплесков различной интенсивности. Чтобы выяснить причину появления такого вида временной зависимости, рассматривали поверхность гранита в оптический микроскоп. Оказалось, использованная нами энергия разряда —  $0.2 \text{ J}$  не достаточна для появления на ней трещин с линейными размерами в несколько десятков  $\mu\text{m}$ . (Отметим, что такие трещины легко обнаруживаются при помощи оптического микроскопа после удара бойком по поверхности гранита [12]).



**Рис. 6.** Фрагмент поверхности гранита. Стрелками показаны выходы микропор на поверхность образца.

Тем не менее гранит люминесцирует. Оказалось, что на его поверхности наблюдаются выходы пор, диаметр которых лежит в пределах от  $\sim 2$  до  $\sim 30 \mu\text{m}$  (рис. 6). Концентрация таких пор в гранитах, как известно [15], составляет от 1 до 3% vol. По-видимому, наблюдаемая люминесценция соответствует излучению кумулятивных струй из этих пор. Действительно, ранее авторы работы [18] наблюдали выделение струй плазмы под действием ударной волны из искусственно созданных осесимметричных микрополостей диаметром десятки–сотни  $\mu\text{m}$  на поверхности пластин Al и Cu. Этот эффект был объяснен кумуляцией энергии ударной волны в этих полостях и ее выделением в виде кумулятивных струй.

В этом случае максимальная интенсивность всплески  $I$  должна быть приблизительно пропорциональна объему  $d^3$  вещества, вылетевшего из пор:  $I = qd^3$ , где  $q$  — коэффициент пропорциональности. Измерения показали, что в нашей установке средняя величина интенсивности —  $\langle I \rangle \approx 0.035 \langle V \rangle$ , где  $\langle V \rangle$  — среднее напряжение на выходе РЕМ. Средний размер микропор в исследованном образце гранита составлял  $\sim 10 \mu\text{m}$ , а объем области разрушения  $\sim 1 \cdot 10^3 \mu\text{m}^3$ . Отсюда  $q \approx 3.5 \cdot 10^{-5} \text{ V}/\mu\text{m}^3$  и линейный размер области разрушения, в которой происходит вылет ионов из гранита, можно оценить как  $d(\mu\text{m}) \approx 30(I)^{1/3}(\text{V})$ . Наибольшая величина амплитуды всплесков для образцов гранита —  $\approx 0.37 \text{ V}$ , а наименьшая —  $\approx 0.01 \text{ V}$ . Тогда, можно оценить размер самых крупных и самых мелких областей разрушения, наблюдаемых методом FL:  $\sim 20$  и  $\sim 6 \mu\text{m}$ .

Обсудим теперь природу струи, выделяющейся из гранита под влиянием мощного ( $80 \text{ J}$ ) разряда, приводящего к его распаду на фрагменты. Вероятно, она также вызвана кумуляцией энергии в микрополостях внутри гранита.

## 5. Заключение

1. Установлено, что скорость ударной волны в образце гранита при электрическом разряде с мощностью 0.2 J в воздухе около его поверхности составляет  $\sim 5$  km/s.

2. Анализ спектра FL показал, что под влиянием ударной волны с поверхности гранита выделяется плазма, состоящая из ионов и атомов кремния и кислорода.

## 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, И.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, N.Y. (2004) 322 p.
- [7] Г.И. Канель, В.Е. Фортов, С.В. Разоренов *УФН*. **177**, 809 (2007).
- [8] H.I.P. Galvez. *Minerals Eng.* **24**, 1638 (2011).
- [9] G.I. Kanel, S.V. Razorenov, V.E. Fortov. *Shock-Wave Phenomena and the Properties of Condensed Matter*. Springer, N.Y. (2004) 320 p.
- [10] Г.А. Малыгин, С.Л. Огарков, А.В. Андрияш. *ФТТ* **55**, 721 (2013).
- [11] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, И.П. Щербаков. *ЖТФ* **81**, 4, 148 (2011).
- [12] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, И.П. Щербаков. *ФТТ* **54**, 1342 (2012).
- [13] В.И. Веттегрень, А.В. Воронин, В.С. Куксенко, Р.И. Мамалимов, И.П. Щербаков. *ФТТ* **56**, 315 (2014).
- [14] [www.mining-enc.ru/g/granit/](http://www.mining-enc.ru/g/granit/)
- [15] А.Н. Зайдель, В.К. Прокофьев, С.М. Райский, Е.Я. Шрейдер. *Таблицы спектральных линий*. Физматгиз, М. (1952) 608 с.
- [16] J. Goetze, M. Ploetze, D. Habermann. *Mineralogy and Petrology*. **71**, 225 (2001).
- [17] И.А. Семиохин. *Элементарные процессы в низкотемпературной плазме*. Из-во МГУ, М. (1988) 142 с.
- [18] Е.Л. Зильбендбранд, Г.С. Пугачев, А.Б. Синани. *ЖТФ* **20**, 6, 45 (1994).