

05

Механизм и динамика разрушения поверхности напряженных гранитов под влиянием ударной волны

© И.П. Щербаков, В.И. Веттегрень,[†] Р.И. Мамалимов, Х.Ф. Махмудов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[†] e-mail: Victor.Vettegren@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 30 октября 2017 г.)

С временным разрешением 2 ns исследована динамика вылета положительно заряженных ионов под влиянием ударной волны с поверхностей гранитов, содержащих различную концентрацию кварца и полевого шпата. Предполагается, что ионы вылетают в моменты выхода на поверхность образца дислокаций,двигающихся в пересекающихся плоскостях скольжения. На месте выхода дислокаций образуются дефекты, которые имеют вид протяженных „канавок“. Сжимающая нагрузка подавляет процесс образования дефектов.

DOI: 10.21883/JTF.2018.07.46168.2537

Введение

В последние годы нами были начаты экспериментальные исследования механизма и динамики разрушения с наносекундным разрешением ненагруженных и одноосно сжатых горных пород под воздействием ударных волн [1–7]. Интерес к этой проблеме вызван тем, что скорость ударной волны в несколько раз больше скорости поперечной звуковой волны S_t , а разрушение путем образования и накопления трещин может происходить только со скоростью, не больше чем $\sim 1/3S_t$ [8]. В наших исследованиях было установлено [1–7], что кристаллические решетки кварца и полевых шпатов, входящих в состав гранитов, под воздействием ударных волн разрушаются не путем образования и накопления микротрещин, а испарением с вылетом положительно заряженных ионов и электронов.

В настоящей работе исследована динамика разрушения одноосно сжатых гранитов, концентрация кварца в которых изменялась от нуля до 35–40%. Предполагалось, что изменение концентрации кварца может повлиять на динамику разрушения гранитов.

Объект и метод исследования

Для исследований были использованы граниты трех видов: аляскит, плагиогранит и габбро-диабаз. Аляскит и плагиогранит содержали зерна кварца (~ 35 – 40%) и полевого шпата — плагиоклаза (~ 50 – 60%). Средний размер зерен этих минералов в аляските составлял ~ 7 мм, а в плагиограните — ~ 4 мм. Габбро-диабаз состоял из плагиоклаза ($\sim 60\%$) и пироксена ($\sim 30\%$) с размерами зерен ~ 2 мм.

Из гранитов были выпилены образцы в виде параллелепипедов с размерами ребер $4 \times 4 \times 6$ см. Внутри них был вырезан паз, в который были вставлены медные

электроды, присоединенные к конденсатору. При разряде конденсатора между электродами возникала дуга. Она вызывала появление ударной волны в воздухе и вслед за ней — в образце [9]. Энергия разряда составляла ~ 0.2 J, а мощность — $2 \cdot 10^5$ W.

Вылетающие из гранитов ионы находятся в электронно-возбужденном состоянии. При переходе из возбужденного в основное состояние они излучают свет в видимой области спектра, т.е. возникает люминесценция. Для ее регистрации перед поверхностью образцов устанавливали один из концов кварцевого световода, а его второй конец располагали перед поверхностью фотокатода фотоэлектронного умножителя PMT-136 (рис. 1). Напряжение на выходе PMT подавали на вход аналого-цифрового преобразователя ADS-3112 и через каждые 2 ns записывали в память компьютера для дальнейшего анализа и обработки.

Для сжатия образцов использовали пресс PGDR. Величину сжимающего напряжения изменяли ступенчато — через 10–20 МПа. После приложения заданного напряжения через образец пропускали ударную волну и записывали временную зависимость интенсивности люминесценции.

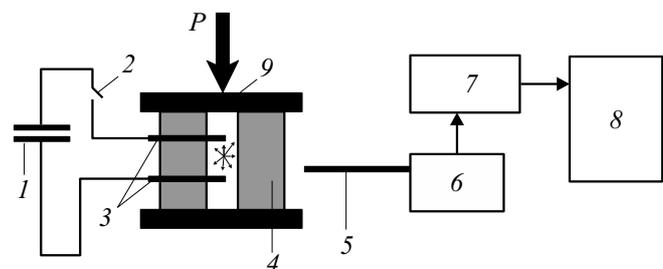


Рис. 1. Блок-схема установки: 1 — конденсатор, 2 — электронный ключ, 3 — электроды (между которыми происходит электрический пробой), 4 — образец, 5 — кварцевый световод, 6 — фотоумножитель РЕМ-136, 7 — аналого-цифровой преобразователь ADS-3112, 8 — компьютер, 9 — пресс.

Характеристики распределения числа струй ионов, вылетающих из ненапряженных и сжатых образцов гранитов, от их интенсивности I_m

Гранит	Прочность, МПа	Размер зерен плагиоклаза, мм	Сжимающее напряжение, МПа	$\ln N_0$	$b \cdot 10^3$
Аляскит	160	6.5	0	3.2	3
			144	2.8	5
Габбро-диабаз	320	2	0	3	2.9
			210	2.7	10

Механизм образования люминесценции

Через $\sim 23 \mu\text{s}$ после замыкания пластин конденсатора происходила ионизация молекул воздуха, и затем возникла пробой промежутка между электродами. Еще через $\sim 0.3 \mu\text{s}$ загоралась дуга (рис. 2). Интенсивность ее излучения достигала максимального значения через $\sim 0.6 \mu\text{s}$, а затем уменьшалась приблизительно экспоненциально от времени. Через $\sim 2.6 \mu\text{s}$ после возникновения пробоя интенсивность дуги уменьшалась на порядок.

На рис. 3 показаны спектры люминесценции аляскита и плагиогранита, полученные при энергии разряда 80 J. Они состоят из нескольких десятков узких (шириной $\sim 0.5\text{--}1 \text{ nm}$) линий, наложенных друг на друга. Воспользовавшись таблицами спектральных линий [10], установлено, что они соответствуют излучению положительно заряженных ионов. В соответствии с составом аляскита в спектре его люминесценции наблюдали излучение одно, двух и трех положительно заряженных ионов Na, Fe, Si, Al и O, а в спектре плагиогранита — Al, Ca, K, Li, Na, Fe, O и Mn. Кроме того, в спектрах содержались линии, соответствующие ионам азота и меди. Ионы азота образовались при ударе ионов плазмы о молекулы азота воздуха, а ионы меди вылетели из медных электродов.

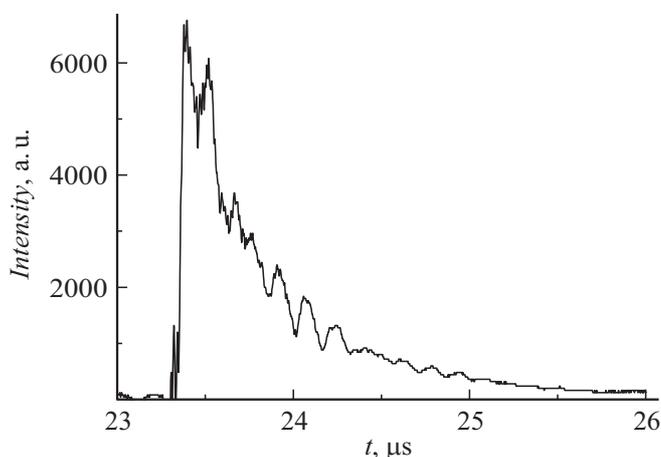


Рис. 2. Временная зависимость интенсивности дуги.

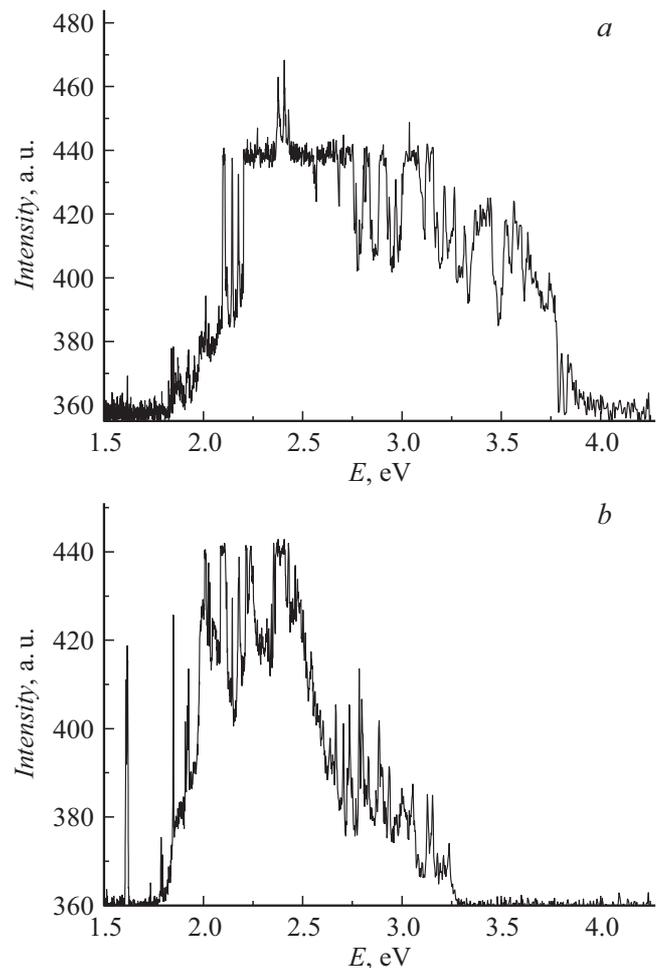


Рис. 3. Спектры люминесценции плагиоклаза (а) и аляскита (b).

Эти результаты показывают, что ударная волна вызывает разложение гранитов, при котором с их поверхности вылетают положительно заряженные ионы. При энергии разряда 80 J около 80% объема образца распадается на ионы.

Уменьшим теперь энергию разряда в 400 раз — до 0.2 J. Оказалось, что при такой энергии из гранита тоже вылетают ионы (рис. 4). В этом случае они пред-

ставляют собой струи, интенсивность которых варьирует на ~ 2 порядка, а интервал между ними изменяется от нескольких десятков ns до нескольких μ s.

Каков же механизм образования ионов? Известно [11], что при взаимодействии дислокаций, движущихся в пересекающихся плоскостях скольжения, возникают сильные искажения кристаллической решетки. Они могут вызывать переходы между уровнями основного и возбужденного электронных состояний и распад межатомных связей. Ударная волна „выносит“ искаженные участки кристаллических решеток на поверхность, что и приводит к вылету возбужденных положительно заряженных ионов.

Известно, что искажения кристаллической решетки в местах пересечения плоскостей скольжения препятствуют движению дислокаций. Поэтому около таких пересечений скапливаются цуги из нескольких десятков-сотен дислокаций [12]. При их прорыве на поверхности должны появляться дефекты в виде канавок, глубина которых может достигать $\sim 1 \mu$ m и более. Такие дефекты должны наблюдаться в оптический микроскоп.

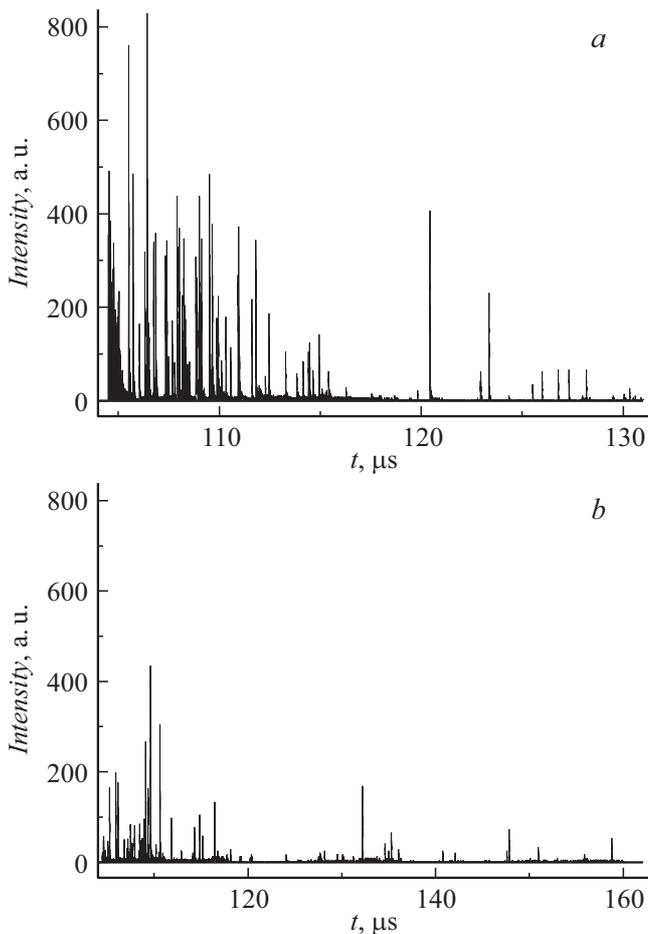


Рис. 4. Временные зависимости интенсивности струй ионов, вылетающих из габбро-диабаз. Сжимающее напряжение, МПа: *a* — 0; *b* — 208.

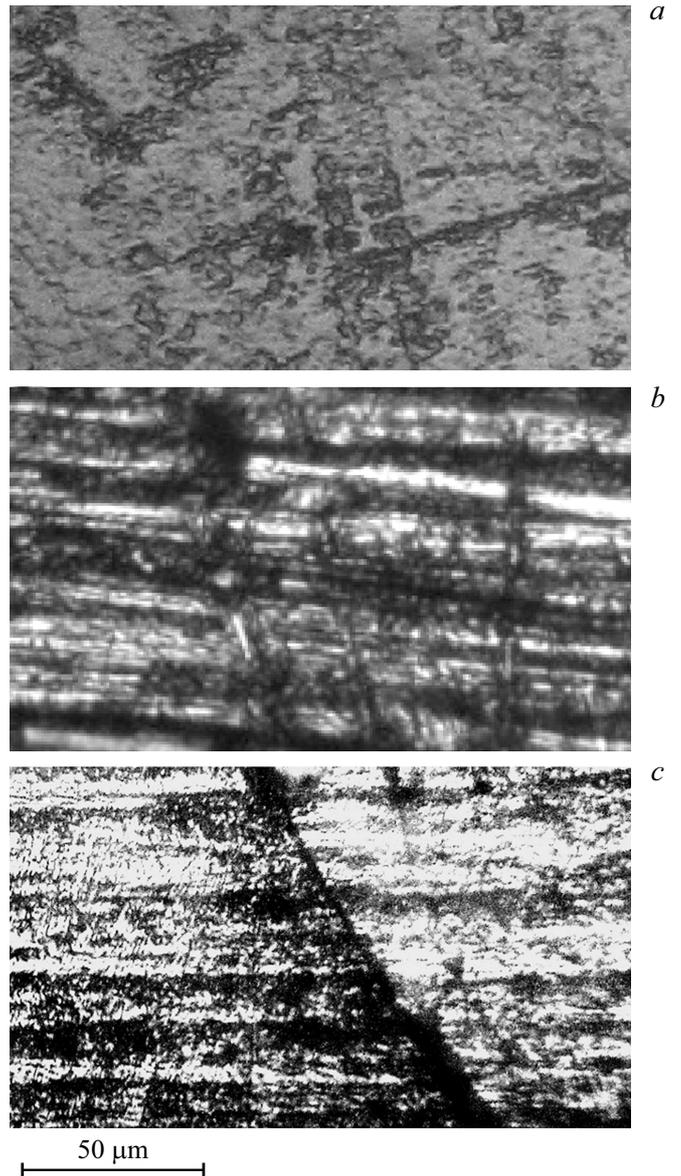


Рис. 5. Фотографии поверхности аляскита (*a*) до воздействия ударной волны, аляскита (*b*) и габбро-диабазы (*c*) после ее воздействия. Темная наклонная полоса на рисунке (*c*) — граница между зернами габбро-диабазы.

Оказалось, что, действительно, после воздействия ударной волны на поверхностях гранитов наблюдаются дефекты, имеющие вид протяженных „канавок“ (рис. 5).

Динамика разложения гранитов

Вернемся вновь к рассмотрению рис. 4, на котором показаны временные зависимости интенсивности струй ионов, вылетающих из габбро-диабазы и аляскита под действием ударной волны. Такие же временные зависимости интенсивности струй ионов наблюдались ранее для плагиогранита [6]. Во всех случаях увеличение

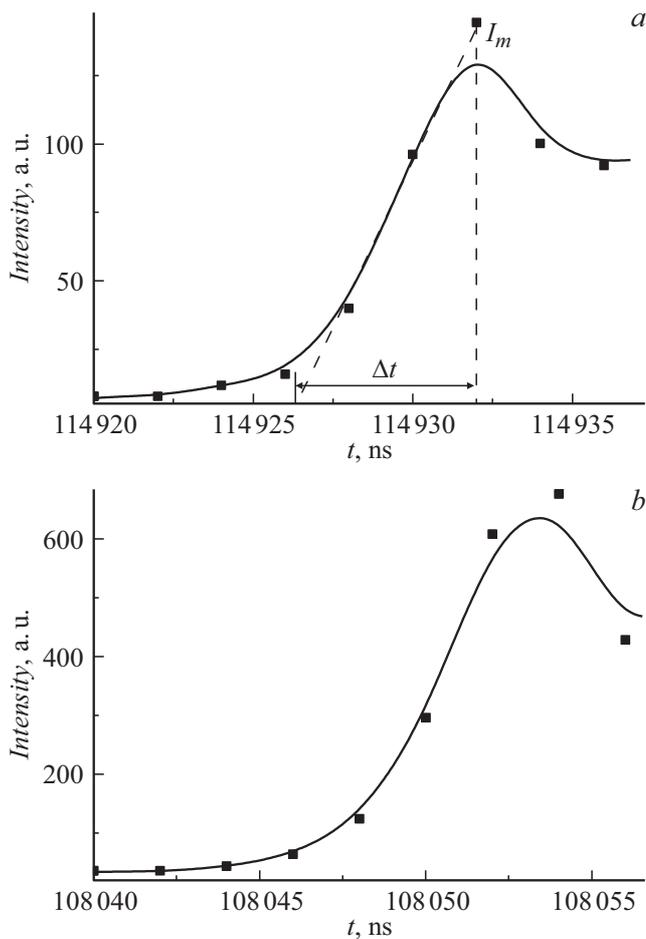


Рис. 6. „Одиночные“ струи ионов из аляскита. Давление, МПа: *a* — 0; *b* — 144.

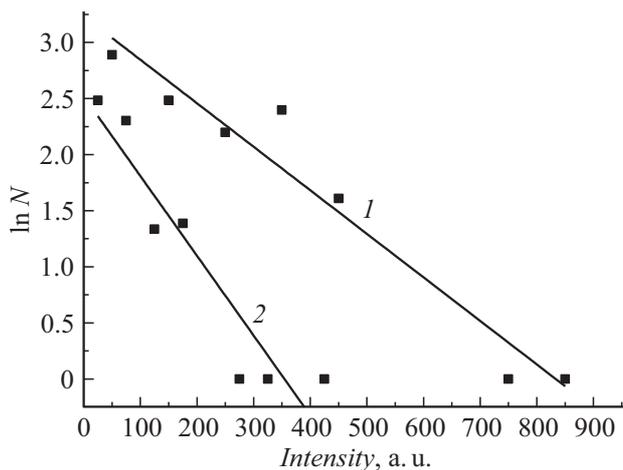


Рис. 7. Зависимости числа струй ионов от их интенсивности для габбро-диабазы. Давление, МПа: 1 — 0; 2 — 210.

сжимающего напряжения приводило к уменьшению числа струй. Это показывает, что сжимающее напряжение препятствует выходу цугов дислокаций на поверхность.

На рис. 6 показаны фрагменты временных зависимостей сигнала от РЕМ при образовании одной из канавок. Видно, что интенсивность сигнала сначала растет, достигает максимального значения и затем уменьшается. Величина интенсивности определяется скоростью двух процессов. Первый — рост интенсивности при образовании „канавки“. Второй — уменьшение сигнала от РЕМ после ее образования. Скорость такого уменьшения определяется величинами паразитной емкости и сопротивления нагрузки.

Будем полагать, что максимальная скорость роста интенсивности струй ионов задана скоростью ударной волны. В гранитах она составляет ~ 5 km/s [2]. Тогда по времени Δt достижения максимального значения интенсивности I_m струй (рис. 6, *a*) можно оценить длину дефектов. Оказалось, что для всех исследованных гранитов она варьирует от ~ 5 до $30 \mu\text{m}$.

Распределения длин дефектов на поверхности гранитов

На рис. 7 показаны распределения числа N струй ионов из ненапряженных и одноосносжатых образцов габбро-диабазы от их интенсивности — I_m , которая пропорциональна длине „канавок“. Видно, что распределения имеют вид $N = N_0 \exp(-bI_m)$, где N_0 — предельное значение N при $I_m \rightarrow 0$, а $b = \ln(N_0/N)/I_m$. Такой же вид имели распределения для аляскита и плагиогранита. Это означает, что число „канавок“ экспоненциально уменьшается при увеличении их длины.

В таблице приведены значения $\ln N_0$ и b для габбро-диабазы и аляскита. Видно, что величина $\ln N_0$ слабо зависит от напряжения, а b — растет при его увеличении. Это показывает, что сжимающее напряжение тем сильнее подавляет выход дефектов на поверхность, чем больше их длина.

Заключение

Под влиянием ударной волны на поверхность гранитов выходят дислокации,двигающиеся в пересекающихся плоскостях скольжения. Кристаллическая решетка в областях пересечения плоскостей сильно искажена, поэтому ударная волна вызывает испарение положительно заряженных ионов из таких областей [12]. После испарения на поверхностях гранитов образуются дефекты, которые имеют вид протяженных „канавок“. Сжимающая нагрузка подавляет процесс образования таких дефектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-05-00138).

Список литературы

- [1] Веттегрень В.И., Воронин А.В., Куksenко В.С., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П. // ФТТ. 2014. Т. 56. Вып. 2. С. 315–317. [Vettegren V.I., Voronin A.V., Kuksenko V.S., Mamalimov R.I., Shcherbakov I.P. // Phys. Solid State. 2014. Vol. 56. N 2. P. 317–320.] doi: 10.1134/S1063783414020322
- [2] Веттегрень В.И., Щербаков И.П., Воронин А.В., Куksenко В.С., Мамалимов Р.И. // ФТТ. 2014. Т. 56. Вып. 5. С. 981–985. [Vettegren V.I., Shcherbakov I.P., Voronin A.V., Kuksenko V.S., Mamalimov R.I. // Phys. Solid State. 2014. Vol. 56. N 5. P. 1018–1022.] doi: 10.1134/S1063783414050321
- [3] Веттегрень В.И., Щербаков И.П., Куksenко В.С., Мамалимов Р.И. // ФТТ. 2014. Т. 56. Вып. 9. С. 1767–1771. [Vettegren V.I., Shcherbakov I.P., Kuksenko V.S., Mamalimov R.I. // Phys. Solid State. 2014. Vol. 56. N 9. P. 1828–1832.] doi: 10.1134/S1063783414090303
- [4] Веттегрень В.И., Куksenко В.С., Щербаков И.П. // Физика Земли. 2016. № 5. С. 134–149. [Vettegren V.I., Kuksenko V.S., Shcherbakov I.P. // Izvestiya, Phys. Solid Earth. 2016. Vol. 52. N 5. P. 754–769.] doi: 10.1134/S106935131604011X
- [5] Щербаков И.П., Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И., Махмудов Х. // ФТТ. 2017. Т. 59. Вып. 3. С. 556–558. [Shcherbakov I.P., Vettegren V.I., Mamalimov R.I., Makhmudov Kh.F. // Phys. Solid State. 2017. Vol. 59. N 3. P. 575–577.] doi: 10.1134/S1063783417030295
- [6] Щербаков И.П., Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И., Махмудов Х. // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 8. С. 1182–1184. [Shcherbakov I.P., Vettegren V.I., Mamalimov R.I., Makhmudov Kh.F. // Techn. Phys. 2017. Vol. 62. N 8. P. 1194–1196.] doi: 10.1134/S1063784217080242
- [7] Щербаков И.П., Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И., Махмудов Х. // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 10. С. 1527–1531. [Shcherbakov I.P., Vettegren V.I., Mamalimov R.I., Makhmudov Kh.F. // Techn. Phys. 2017. Vol. 62. N 10. P. 1533–1537.] doi: 10.1134/S1063784217100218
- [8] Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
- [9] Абрамова К.Б., Щербаков И.П., Русаков А.И. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 2. С. 137–140. [Abramova K.B., Shcherbakov I.P., Rusakov A.I. // Techn. Phys. 1999. Vol. 44. N 2. P. 259–261.] doi: 10.1134/1.1259298
- [10] Зайдель А.Н., Прокофьев В.К., Райский С.М., Славный В.А., Шрейдер Е.Я. Таблицы спектральных линий. Изд. 4-е. М.: Наука, 1977. 800 с. [Zaidel' A.N., Prokof'ev V.K., Raiskii S.M., Slavnyi V.A., Shreider E.Ya. Tables of spectral lines. NY: Springer Science + Business Media, 1970. 782 p.]
- [11] Zakrevskii V.A., Shuldiner A.V. // Phil. Mag. B. 1995. Vol. 71. N 2. P. 127–138.
- [12] Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. М.: Металлургия, 1984. 280 с.