

УДК 622:223; 530:3

## НАБЛЮДЕНИЕ “МЕДЛЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ” В ГОРНЫХ ПОРОДАХ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Л. Б. Зуев, С. А. Баранникова, В. М. Жигалкин\*, М. В. Надежкин

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021 Томск

\* Институт горного дела СО РАН, 630091 Новосибирск

E-mails: lbz@ispms.tsc.ru, bsa@ispms.tsc.ru, Zhigal@misd.nsc.ru, Nadjzhkin@ispms.tsc.ru

Установлено, что развитие локализованной пластической деформации при сжатии образцов из горных пород (сильвинита, мрамора и песчаника), деформирующихся за счет различных микромеханизмов, имеет автоволновой характер. Показано, что скорость распространения автоволн, возникающих в образцах при сжатии, составляет  $10^{-5} \div 10^{-4}$  м/с ( $0,3 \div 3,0$  км/г.) и близка к скорости медленных волн, наблюдавшихся в земной коре после землетрясений или горных ударов.

Ключевые слова: горные породы, локализованное пластическое течение, автоволны.

Исследования пластического течения в металлах и сплавах, результаты которых представлены в работе [1], показали, что на всех этапах развития оно локализовано и реализуется в виде автоволн. Эти исследования были продолжены с образцами из щелочно-галогенидных кристаллов (NaCl, KCl, LiF) [2, 3] и горных пород [4]. В [2–4] показано, что представления о деформации как об автоволновом процессе справедливы и для этих материалов.

В настоящей работе рассмотрена геофизическая проблема так называемых медленных движений [5–7] — волн, возникающих и распространяющихся в горных породах после землетрясений и при горных ударах. Эти движения характеризуются малой скоростью распространения, обычно измеряющейся несколькими десятками километров в год. В настоящее время природа такого рода волн не вполне ясна.

В данной работе предпринята попытка проверить возможность возникновения указанных явлений в горных породах при их деформации и найти их количественные характеристики. Имеются основания полагать, что такие движения соответствуют автоволнам локализованного пластического течения различного типа [5], наблюдавшимся в металлах и сплавах [1]. В экспериментах исследовались образцы из сильвинита (NaCl–KCl) и мрамора (CaCO<sub>3</sub>), деформирующихся дислокационным скольжением и двойникованием соответственно, а также образцы из песчаника (SiO<sub>2</sub>), деформация которого обусловлена процессами на границах зерен [8]. Таким образом, механизмы деформации исследованных материалов принципиально различаются.

Экспериментальные измерения проведены при сжатии образцов размером  $25 \times 12 \times 10$  мм вдоль оси  $x$  на испытательной машине Instron-1185 со скоростями движения захвата  $V_m = 0,1 \div 10,0$  мм/мин. Полученные в этих условиях диаграммы пластического течения

---

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 11 “Фундаментальные проблемы механики взаимодействий в технических и природных системах”.

© Зуев Л. Б., Баранникова С. А., Жигалкин В. М., Надежкин М. В., 2012

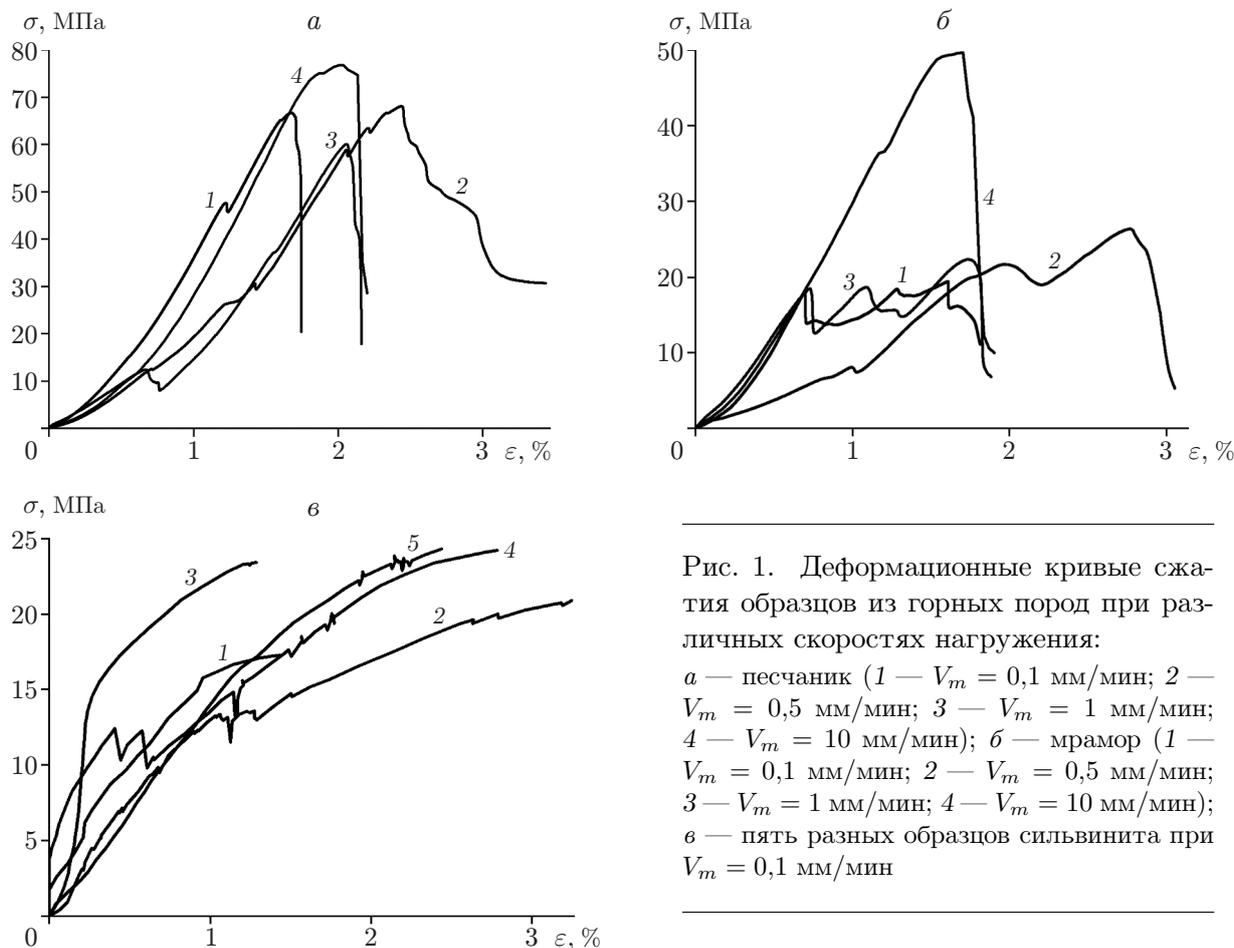


Рис. 1. Деформационные кривые сжатия образцов из горных пород при различных скоростях нагружения:

*a* — песчаник (1 —  $V_m = 0,1$  мм/мин; 2 —  $V_m = 0,5$  мм/мин; 3 —  $V_m = 1$  мм/мин; 4 —  $V_m = 10$  мм/мин); *б* — мрамор (1 —  $V_m = 0,1$  мм/мин; 2 —  $V_m = 0,5$  мм/мин; 3 —  $V_m = 1$  мм/мин; 4 —  $V_m = 10$  мм/мин); *в* — пять разных образцов сильвинита при  $V_m = 0,1$  мм/мин

исследованных горных пород показаны на рис. 1. На кривых  $\sigma(\epsilon)$  имеются участки, на которых напряжения резко уменьшаются, что соответствует растрескиванию образцов. Деформирование завершается хрупким разрушением при общей деформации  $\epsilon_{tot} = 1,5 \div 3,0$  %.

Более подробно распределения пластической деформации по объему образцов исследовались с помощью разработанного в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН метода спекл-фотографии и цифровой спекл-фотографии [9]. С использованием этого метода установлено, что пластическая деформация образцов всех трех исследованных горных пород происходит макроскопически локализованно, т. е. в любой момент времени сосредоточена в нескольких зонах макроскопического масштаба, в то время как другие зоны при той же общей деформации практически не деформируются. Движение в объеме образца фронтов локализации, возникающих при деформации, имеет сложный характер.

На рис. 2 показана локализация деформации в образцах песчаника и мрамора. Результаты анализа представленных картин свидетельствуют о фрагментации деформируемого объема, причем границы фрагментов оказываются подвижными.

Главной особенностью поведения зон локализованной деформации является их перемещение по образцу на линейных участках зависимости  $\sigma(\epsilon)$  с увеличением общей деформации. Пример такого перемещения показан на рис. 3, *a, б* для деформаций  $\epsilon_{tot} = 0,5$ ;  $0,7$  % соответственно. Так как при сжатии с постоянной скоростью  $\epsilon_{tot} \sim t$ , то, определив координату  $x$  очага локализации по длине образца при деформации, по углу наклона гра-

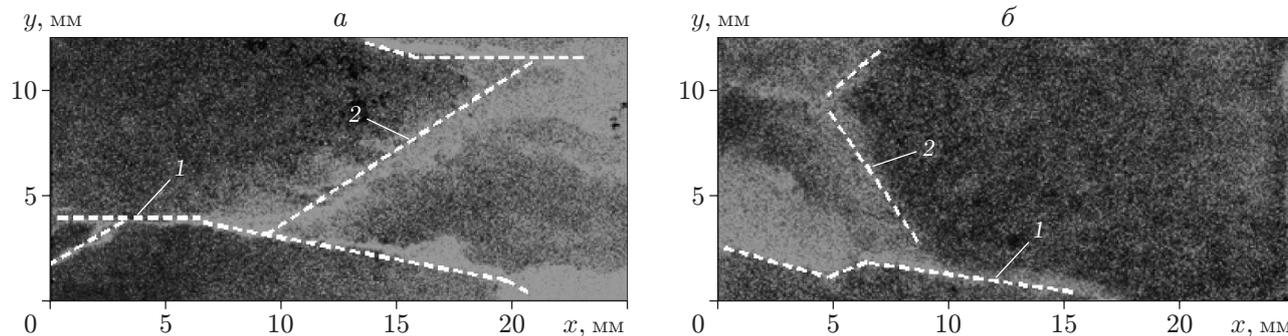


Рис. 2. Движение зон локализации деформации:

*a* — мрамор ( $\varepsilon_{tot} = 1,7\%$ ,  $V_m = 0,5$  мм/мин), *б* — песчаник ( $\varepsilon_{tot} = 1,7\%$ ,  $V_m = 0,1$  мм/мин); 1, 2 — положения фронтов деформации в порядке их появления при сжатии

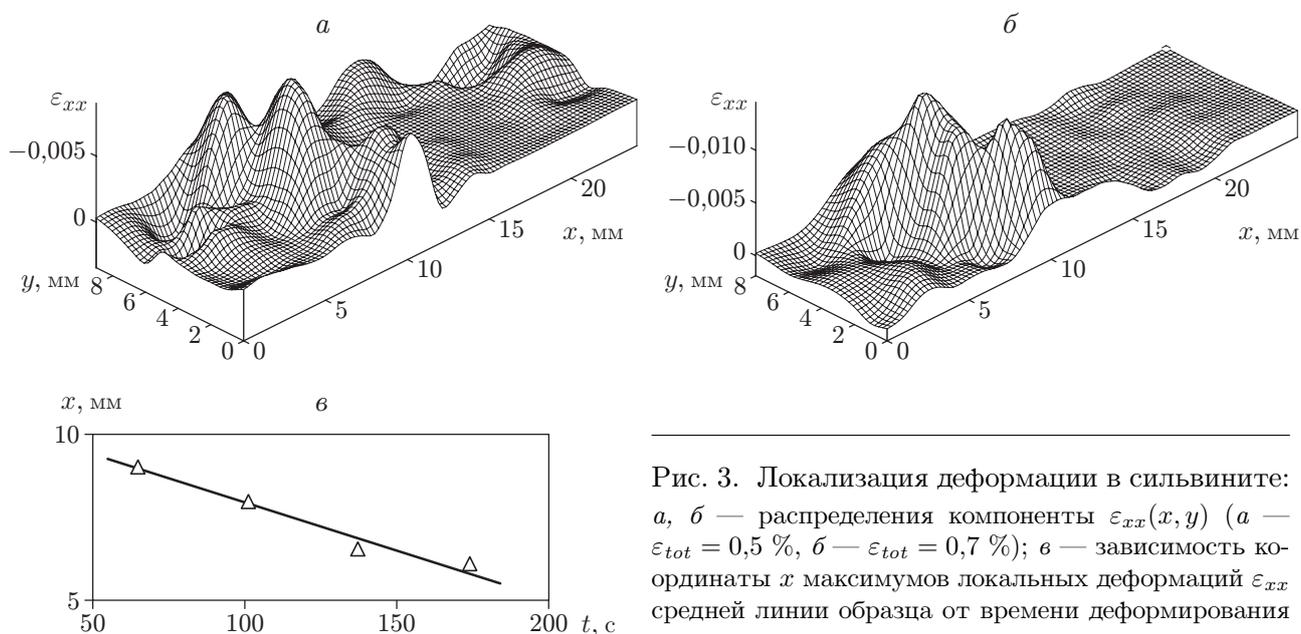


Рис. 3. Локализация деформации в сильвините: *a*, *б* — распределения компоненты  $\varepsilon_{xx}(x, y)$  (*a* —  $\varepsilon_{tot} = 0,5\%$ , *б* —  $\varepsilon_{tot} = 0,7\%$ ); *в* — зависимость координаты  $x$  максимумов локальных деформаций  $\varepsilon_{xx}$  средней линии образца от времени деформирования сильвинита

фика  $x(t)$  можно оценить скорость перемещения зон локализации деформации (рис. 3, *в*). Значения скорости движения очагов локализованного течения  $V_{aw}$  для всех трех исследованных горных пород приведены в таблице.

Для того чтобы оценить возможное влияние скорости нагружения на скорость движения фронтов локализованной деформации  $V_{aw}$  в экспериментах с образцами из мрамора и песчаника, скорости нагружения  $V_m$ , реализуемые испытательной машиной, были изменены на порядок. Установленное соотношение между этими величинами  $V_{aw} \approx 20V_m$  соответствует найденному в [1] выражению для металлических материалов.

Таким образом, скорости движения фронтов локализованной деформации в образцах горных пород, определенные с использованием автоматизированного комплекса ALMEC-tv, находятся в интервале  $0,9 \div 1,3$  км/г. и по порядку величины совпадают со скоростями “медленных движений” при  $V_m = 0,1 \div 10,0$  мм/мин. Это позволяет сделать вывод, что последние представляют собой автоволны локализованной пластичности, возникающие в горных породах при механическом воздействии, обусловленном землетрясением или горным ударом.

Характеристики горных пород при  $V_m = 0,1$  мм/мин

Горная порода	$\lambda$ , мм	$V_{aw} \cdot 10^5$ , м/с	$d$ , нм	$V_t$ , м/с	$\lambda V_{aw}/(dV_t)$
Сильвинит	$\approx 10$	$\approx 2,8$	0,300	—	—
Мрамор	$4 \pm 1$	$\approx 4,2$	0,386	1905	$0,22 \div 0,28$
Песчаник	$4 \pm 1$	$\approx 3,0$	0,410	1860	$0,15 \div 0,19$

Данный вывод подтверждают эксперименты по исследованию развития локализованной пластической деформации в металлах [1], в которых установлено существование инварианта упругой и пластической деформации в форме

$$\lambda V_{aw} = dV_t/2, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — расстояние между подвижными очагами локализованной пластической деформации (длина автоволны);  $V_{aw}$  — скорость движения таких очагов;  $d$  — расстояние между плоскостями, соответствующее максимальной интенсивности рентгеновского рефлекса [10];  $V_t$  — скорость распространения упругих поперечных волн в веществе [11].

Проверим справедливость соотношения (1) для исследованных горных пород, записав его в виде

$$\frac{\lambda V_{aw}}{dV_t} \approx \frac{1}{2}. \quad (2)$$

Характеристики горных пород, приведенные в таблице, взяты из описанных выше экспериментов ( $\lambda$  и  $V_{aw}$ ), а также из работ [10, 11] ( $d$  и  $V_t$ ). Разумеется, численная оценка не может быть очень точной, поскольку для разных горных пород экспериментальные данные для  $V_t$  очень противоречивы, а экспериментальные данные для  $\lambda$  и  $V_{aw}$  менее точны, чем для металлов [1].

В [1, 12] предложена модель, объясняющая возникновение автоволн локализованной пластической деформации в твердых телах при нагружении. В основе модели лежит предположение о том, что подвергнутая деформации среда приобретает признаки активной среды, т. е. среды, в которой имеется запас энергии, локализованной вблизи концентраторов напряжений. По мнению авторов работы [5], это свойство среды характерно также для “медленных движений”, источником энергии для которых является очаг землетрясения. Таким образом, имеются основания полагать, что в описанных экспериментах наблюдался аналог “медленных движений” [5] в горных породах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зуев Л. Б. Физика макролокализации пластического течения / Л. Б. Зуев, В. И. Данилов, С. А. Баранникова. Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма, 2008.
2. Баранникова С. А., Надежкин М. В., Зуев Л. Б. О локализации пластического течения при сжатии кристаллов NaCl и KCl // Физика твердого тела. 2009. Т. 51, № 6. С. 1081–1086.
3. Баранникова С. А., Надежкин М. В., Зуев Л. Б. О локализации пластической деформации при сжатии кристаллов LiF // Физика твердого тела. 2010. Т. 52, № 7. С. 1291–1294.
4. Баранникова С. А., Надежкин М. В., Зуев Л. Б., Жигалкин В. М. О неоднородности деформации при сжатии сильвинита // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, № 11. С. 38–45.
5. Гольдин С. В., Юшин В. И., Ружич В. В., Смекалин В. П. Медленные движения — миф или реальность? // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: Материалы 9-й Междунар. шк.-семинара, Красноярск, 9–15 сент. 2001 г. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосм. ун-т, 2002. С. 213–220.

6. **Гамбурцев А. Г.** Современная геодинамика и катастрофы // Вестн. РАН. 1995. Т. 65, № 7. С. 646–652.
7. **Предельное** состояние деформированных тел и горных пород. М.: Физматлит, 2008.
8. **Земля.** Введение в общую геологию: В 2 т. М.: Мир, 1974.
9. **Zuev L. B., Gorbatenko V. V., Pavlichev K. V.** Elaboration of speckle photography techniques for plastic flow analyses // Measur. Sci. Technol. 2010. V. 21, N 5. P. 054014–054019.
10. **Миркин Л. И.** Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. М.: Физматгиз, 1961.
11. **Порцевский А. К.** Основы физики горных пород и управления состоянием массива / А. К. Порцевский, Г. А. Катков. М.: Моск. гос. открытый ун-т, 2004.
12. **Zuev L. B., Barannikova S. A.** Plastic flow localization viewed as auto-wave process generated in deforming metals // Solid State Phenomena. 2011. V. 172–174. P. 1279–1283.

*Поступила в редакцию 24/VIII 2011 г.*

---