

## ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.831

### О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ЭВОЛЮЦИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД СО СТРУКТУРОЙ ПРИ ОДНООСНОМ НАГРУЖЕНИИ

**В. Н. Опарин, О. М. Усольцева, В. Н. Семенов, П. А. Цой**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Экспериментально, на примере детального изучения изменения напряженно-деформированного состояния образцов горных пород в процессе их одноосного нагружения до разрушения с помощью автоматизированной системы анализа цифровых спекл-фотографий, установлено, что при достижении 50%-го уровня напряжений по отношению к пределу прочности испытуемых пород внутри образцов возникают низкочастотные процессы микродеформирования между структурными отдельностями. Последние генерируются медленными (квазистатическими) силовыми воздействиями от пресса в режиме жесткого нагружения. Амплитуда таких деформационно-волновых процессов существенно зависит от уровня задаваемого макронагружения. Построены волновые пакеты для осредненных компонент микродеформации на образцах из песчаника и мрамора при одноосном сжатии. С помощью преобразования Фурье определены соответствующие им амплитудно-частотные характеристики для выделяемых 4 стадий процесса макродеформирования: упругого, нелинейно упругого, постпикового участка и участка остаточной прочности. На стадии предразрушения возникают, а на стадии постпиковой нагрузки сохраняются упругие колебания с частотой 0.5–4 Гц.

*Массив горных пород, блочно-иерархическое строение, лабораторный эксперимент, метод спекл-фотографии, микродеформации, деформационно-волновые процессы*

#### ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития нелинейной геомеханики характеризуется особым вниманием исследователей к количественному описанию блочно-иерархического строения горных пород и геоматериалов [1]. Это весьма важно для выделения размеров структурных отдельностей, кластеризующихся в очаговые зоны катастрофических событий, и определения их динамико-кинематических характеристик в процессах накопления и релаксации упругой энергии в этих зонах породных массивов [2, 3].

---

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта ОНЗ-РАН 3.1, партнерского интеграционно-го проекта СО РАН № 100 и гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 12-05-01057 (на оборудовании ЦКП ГГИ СО РАН).

С открытием волн маятникового типа [4–6], вещественными носителями которых являются геоблоки различного иерархического уровня в напряженных геосредах, в последние годы сложились необходимые предпосылки для развития нового направления теоретических исследований — “геомеханической термодинамики” [7]. Оно непосредственно связано с расшифровкой механизма трансформации потенциальной (упругой) энергии формирующихся очагов катастрофических событий (землетрясений, горных ударов, выбросов угля, породы и газа) в кинетическую энергию движения составляющих их фракталей в кластерном представлении [1].

Это дает принципиально новые возможности — энергетическую оценку “пороговых значений” деформирования контролируемых участков массивов горных пород или инженерных сооружений, после чего можно ожидать проявления динамических событий, связанных с разрушением пород или геоматериалов в сформировавшихся очаговых зонах повышения концентраций напряжений.

Цель настоящей работы — детальное исследование особенностей распределения и эволюции напряженно-деформированного состояния некоторых образцов горных пород со структурой (в виде естественных неоднородностей) в процессе одноосного нагружения до разрушения. При этом особое внимание уделено проверке возможности возникновения осциллирующих движений структурных элементов геоматериалов в стесненных условиях (искусственно задаваемых напряжений на границах образцов горных пород) и, следовательно, обладания составными фракталами кинетической энергии [8].

#### **МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС**

Испытания образцов горных пород проводились на сервогидравлическом прессе Instron-8802, позволяющем реализовывать программы нагружения с заданной скоростью по усилиям и перемещениям, вести непрерывную запись нагрузки и перемещения подвижного захвата. Для регистрации микродеформаций использовалась автоматизированная система анализа цифровых спекл-фотографий ALMEC-tv. Принцип работы комплекса основан на интерпретации оптических изображений микрорельефа поверхности нагружаемого объекта. Поверхность последнего освещается разведенным пучком когерентного излучения для получения спекл-картины. Спеклы “привязаны” к соответствующим точкам поверхности и при деформации меняют положение вместе с ними. Видеокамера фиксирует эти смещения в режиме покадровой съемки. Комплекс регистрирует параметры процесса в реальном времени с частотой до 27 кадров в секунду при пространственном разрешении не хуже 1 мкм. После программной обработки на выходе получают координаты и величину смещений точек поверхности образца с временной привязкой, что позволяет вычислять компоненты тензора деформаций [3].

Проведена серия экспериментов при одноосном жестком сжатии (вплоть до разрушения) призматических образцов из горных пород (песчаник, мрамор, сильвинит) со скоростями перемещения подвижного захвата 0.02–0.2 мм/мин на прессовой установке Instron-8802 (рис. 1). Синхронизированная с экспериментами съемка смещений точек поверхности образца во время экспериментов выполнена с помощью лазерного измерительного оптико-телевизионного комплекса ALMEC-tv.

Рассмотрим основные результаты на примере одного из характерных экспериментов с образцом мрамора размером 47×11×10 мм, который сжимали вдоль длинной оси  $x$  со скоростью движения захвата 0.2 мм/мин. На рис. 2а показано фото образца мрамора, на рис. 2б — фрагмент его спекл-фотографии.

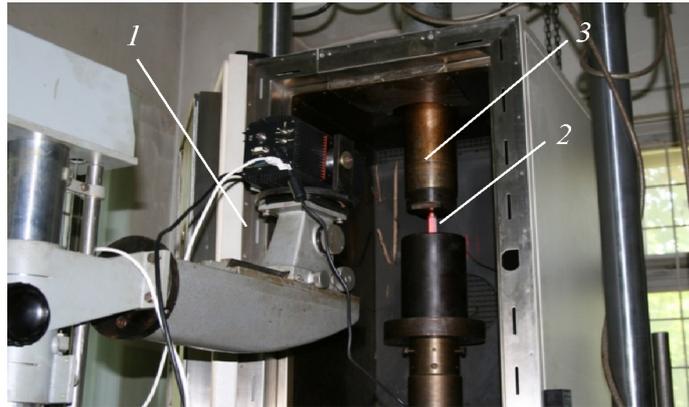


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда для проведения испытаний: автоматизированный измерительный оптико-телевизионный комплекс ALMEC-tv (1), образец горной породы (2), установленный в нагружающих захватах пресса Instron-8802 (3)

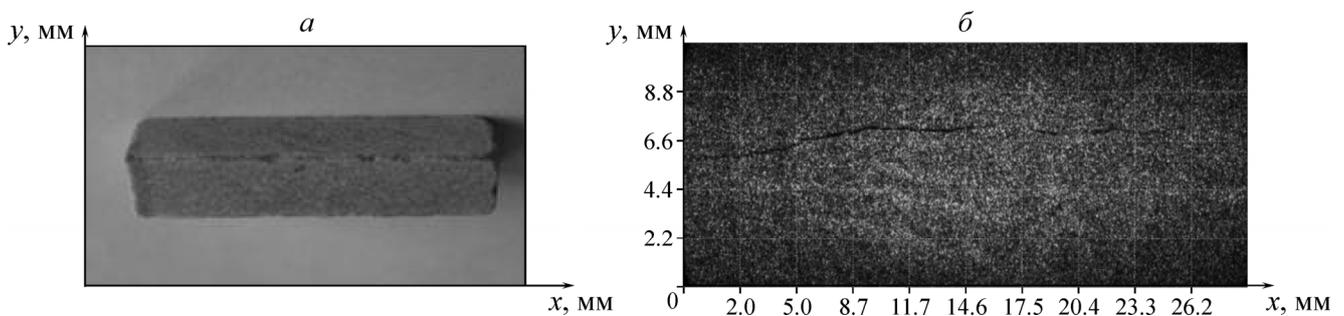


Рис. 2. Образец из мрамора размером 47×11×10 мм (а) и фрагмент его спекл-фотографии после разрушения (б)

Эксперимент продолжался около 70 с. Предел прочности составил 50.1 МПа, предельная деформация вдоль длинной оси  $x$  образца, измеренная по перемещению траверсы пресса, составила 0.059. На рис. 3а приведена макрозависимость задаваемого на образец напряжения от макродеформации в осевом ( $x$ ) направлении, на рис. 3б — соответственно зависимость напряжения от времени.

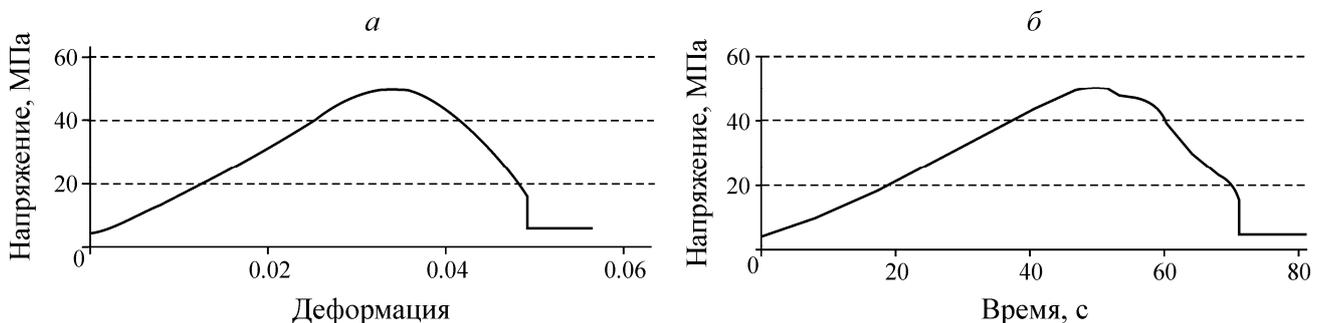


Рис. 3. Зависимость напряжения от деформации породного образца в осевом ( $x$ ) направлении (а) и режим нагружения образца мрамора во времени (б)

На рис. 4 показаны зависимости суммарных микродеформаций в продольном ( $x$ ) направлении (1) и “деформация – время”, снятая с траверсы пресса (2).

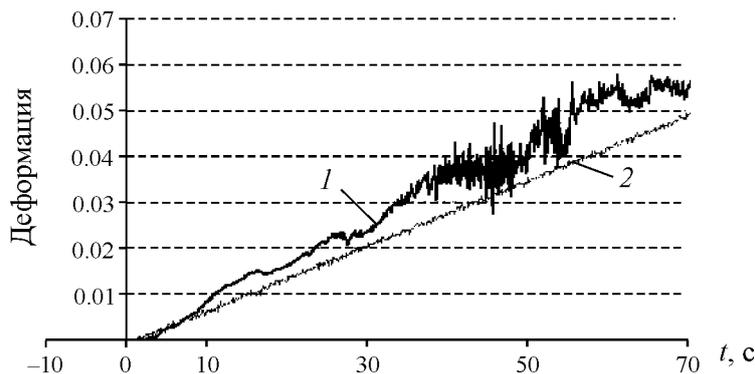


Рис. 4. Зависимости суммарных микродеформаций в продольном ( $x$ ) направлении (1) и “деформация – время”, снятая с траверсы прессы (2)

Одновременно с записью макродеформации на рабочей поверхности образца проводилось измерение векторов микроперемещений в локальных точках с помощью автоматизированного лазерного измерительного оптико-телевизионного комплекса анализа цифровых спекл-фотографий ALMEC-tv. После программной обработки получены координаты и величина смещений точек поверхности исследуемого объекта (координаты сетки) с временной привязкой для дальнейшего построения и анализа компонент тензора деформаций.

#### АНАЛИЗ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Анализ данных проведенных экспериментов показал, что пластическая деформация неоднородна с самого начала нагружения образца геоматериала. Несмотря на то что заданным видом нагружения породного образца является одноосное сжатие с постоянной скоростью перемещения траверсы прессы, тем не менее в пространственно-временном поле микродеформаций по сканируемым поверхностям присутствуют как области укорочения, так и удлинения.

На рис. 5 показан снимок деформационного картирования отсканированной поверхности образца мрамора по компоненте деформации в продольном ( $x$ ) направлении образца. Отрицательному значению компоненты деформации (уменьшению размера) соответствует цвет, близкий к оттенкам синего. Цвет, близкий к оттенкам черного, соответствует нулевым деформациям. Положительным значениям (увеличению размера) соответствует цвет, близкий к оттенкам красного. Белый цвет — деформация, превышающая значение 0.02.

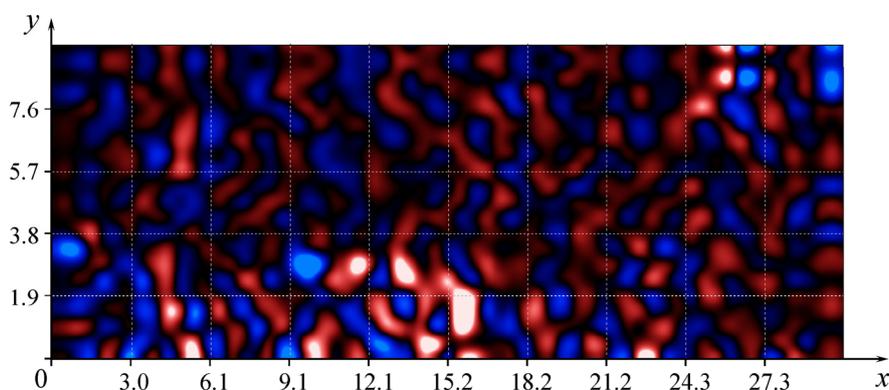


Рис. 5. Картирование сканируемой поверхности по компоненте микродеформации  $\varepsilon_x$  в продольном ( $x$ ) направлении образца в момент нагружения, соответствующий на диаграмме “напряжение – время” 30 с (см. рис. 4)

На рис. 6 приведен снимок деформационного картирования отсканированной поверхности образца мрамора по компоненте деформации в поперечном ( $y$ ) направлении образца. Белый цвет — деформация, превышающая значение 0.02.

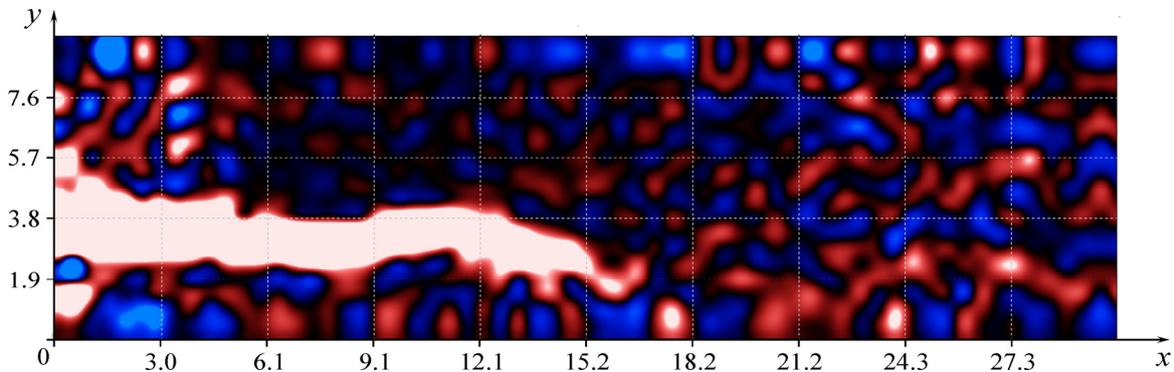


Рис. 6. Картирование сканируемой поверхности по компоненте микродеформации  $\varepsilon_y$  в поперечном ( $y$ ) направлении образца в момент нагружения, соответствующий на диаграмме “напряжение–время” 30 с (см. рис. 4)

Из сравнения рис. 5 и рис. 6 следует, что компоненты микродеформаций  $\varepsilon_y$  более “чутко” отслеживают область и направление будущих магистральных трещин (вытянутая белая область на рис. 6), формирующихся окончательно при достижении уровня нагружения на образец, равного пределу его прочности. Эта область становится уже заметной по уровню  $\varepsilon_y$  деформации для напряжений, принимающих значения менее половины предела прочности породных образцов.

На рис. 7, 8 приведены трехмерные графики, соответствующие снимкам рис. 5, 6, где по осям  $x$  и  $y$  отложены координаты поверхности образца в продольном и поперечном направлении соответственно, по оси  $z$  — величина микродеформации в соответствующей точке измерения сканируемой поверхности.

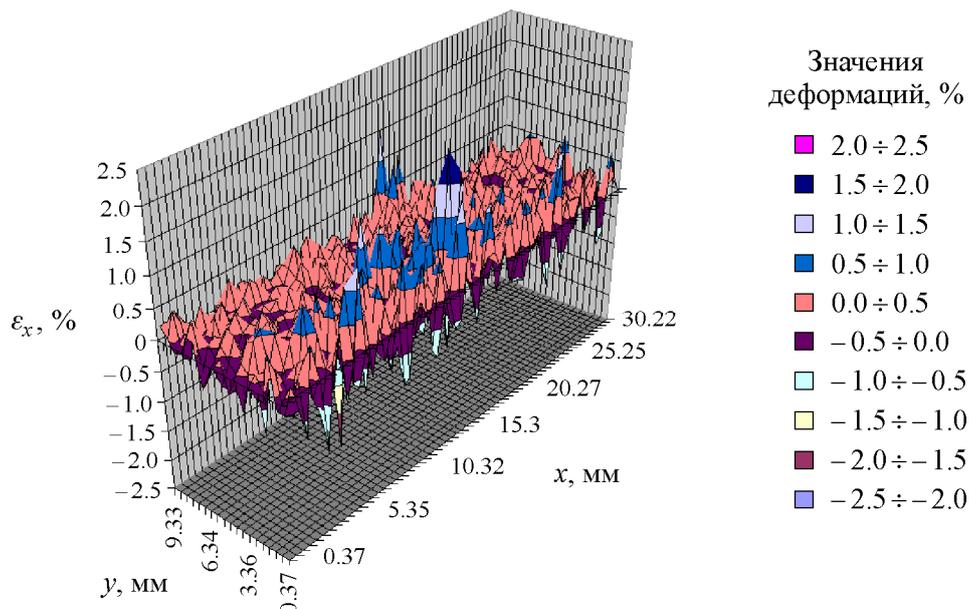


Рис. 7. Распределение микродеформации  $\varepsilon_x$  по сканируемой поверхности образца в момент нагружения, соответствующий на диаграмме “напряжение–время” 30 с (рис. 5)

Анализ представленных графиков (рис. 7, 8) позволяет заключить не только о знакопеременном характере микродеформирования внутренних частей испытуемых образцов горных пород, но и о возможных причинах такого деформирования, существенно отличающегося от ожидаемого в рамках механики сплошных сред. Нетрудно видеть, что кажущиеся периоды осциллирующих деформаций отвечают минералогическим и структурным неоднородностям испытуемых образцов (от долей до нескольких миллиметров). В свою очередь уровень регистрируемых деформаций (абсолютные значения) соизмерим с геомеханическим инвариантом  $\mu_{\Delta}(\delta)$  [9]:

$$\mu_{\Delta}(\delta) = \frac{\delta_i}{\Delta_i} = \Theta \cdot 10^{-2}, \quad \Theta \in \frac{1}{2} \div 2, \quad \forall i, \quad (1)$$

где  $\delta_i$  — среднее расстояние между берегами дефектов (трещин), отделяющих структурные неоднородности породы диаметрами  $\Delta_i$  ( $i$  — уровень иерархии).

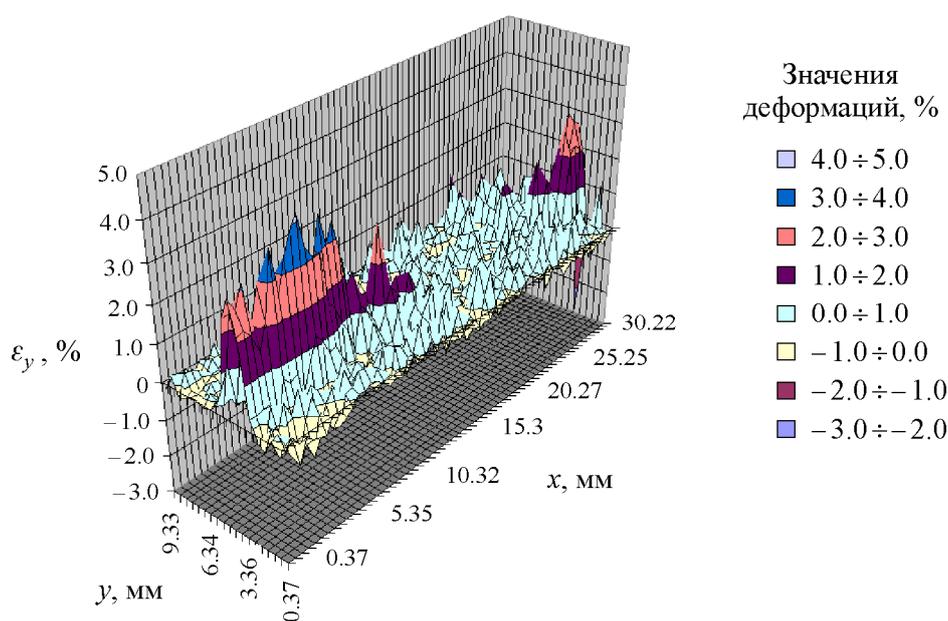


Рис. 8. Распределение микродеформации  $\varepsilon_y$  по сканируемой поверхности образца в момент нагружения, соответствующий на диаграмме “напряжение – время” 30 с (рис. 6)

#### О СТАДИЙНОСТИ МИКРО- И МАКРОДЕФОРМИРОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОДНООСНОМ НАГРУЖЕНИИ ДО РАЗРУШЕНИЯ И ВОЗНИКНОВЕНИИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ДЕФОРМАЦИОННО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Следует отметить, что понятие “стадийности” процессов деформирования горных пород и их массивов нередко условное, учитывая структуру зависимостей напряжений от деформаций (см., например, рис. 3). Обычно при этом во внимание принимаются точки “излома” или достаточного резкого изменения тангенса угла наклона отдельных участков экспериментальных зависимостей “ $\sigma - \varepsilon$ ”. Существенный интерес представляет вопрос: возможна ли спецификация выделяемых таким образом “стадий деформирования” более объективными методами, например по динамико-кинетическим характеристикам, отвечающим локальным деформационно-волновым процессам?

С этой целью на рабочей поверхности породного образца выделялись одинаковые по размерам прямоугольные участки (рис. 9), для которых рассчитывались средние значения компо-

нент микродеформаций в продольном ( $x$ ) и поперечном ( $y$ ) направлениях испытуемого образца. Размеры этих участков выбирались таким образом, чтобы перемещения в каждой точке и их средние значения различались не более чем на 20–25 %.

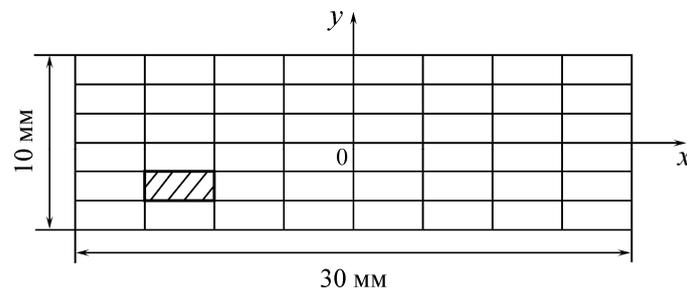


Рис. 9. Разбиение рабочей поверхности образца на прямоугольные участки: штриховкой выделен элементарный участок (фрагмент) области размером  $3.5 \times 1$  мм

На рис. 10 приведена характерная диаграмма изменения значений средней микродеформации одного из фрагментов сканируемой поверхности. Зависимости продольной микродеформации от времени имели различный характер: было и чистое сжатие, и растяжение – сжатие. На рис. 10 показан такой фрагмент, где колебания происходят вокруг нуля. Это не принципиально, так как рассматривался момент возникновения более высокочастотных колебаний. Как видно, уже при достижении уровня макронагружения образца породы порядка 25–30 % от предела прочности на одноосное сжатие внутри него начинает развиваться довольно сложный деформационно-волновой процесс на микроуровне.

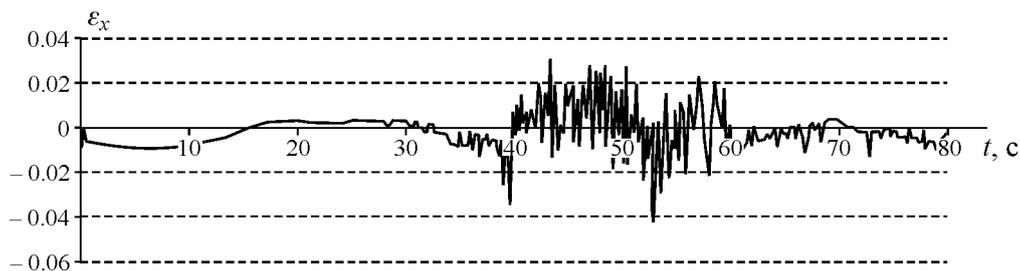


Рис. 10. Диаграмма средней микродеформации  $\varepsilon_x$  элементарного участка (фрагмента) поверхности образца в продольном ( $x$ ) направлении

Процесс нагружения условно разделен на 4 стадии (рис. 11): 1, 2 — возрастающая нагрузка (1 — до 0.5 пиковой нагрузки; 2 — до пиковой нагрузки); 3 — постпиковый участок; 4 — участок остаточной прочности. Для каждого участка — стадии нагружения — и для отдельных фрагментов рабочей поверхности образца построены деформационно-волновые пакеты по осредненным компонентам микродеформаций  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$ . С помощью преобразования Фурье определены соответствующие им амплитудно-частотные характеристики.

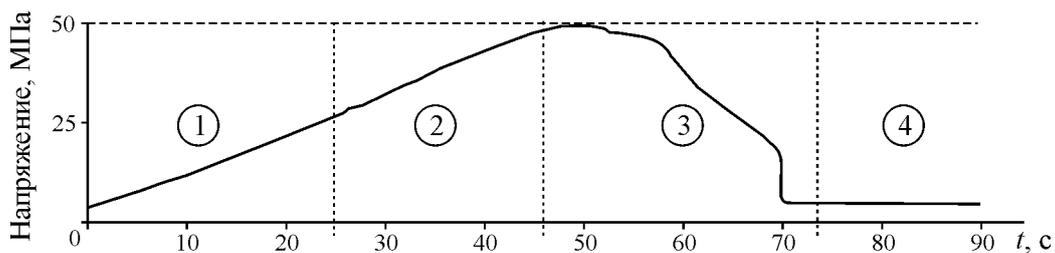


Рис. 11. Постадийная (1–4) диаграмма зависимости напряжения от времени нагружения образца

На рис. 12 приведены характерные графики изменения во времени амплитудно-частотных характеристик для компоненты деформации  $\varepsilon_x$ , откуда видно, что:

- на стадии упругого деформирования (1) при значениях нагрузки, не превышающих  $0.5\sigma^v$  ( $\sigma^v$  — пиковая нагрузка), колебания компонент микродеформаций практически отсутствуют;
- на стадии деформирования (2) при значениях напряжений от  $0.5\sigma^v$  до предела прочности образца на одноосное сжатие возникает процесс колебаний микродеформаций; далее амплитуды колебаний существенно возрастают, приобретая максимальные значения на стадии (3) — постпиковой нагрузки;
- на стадии остаточной прочности (4) амплитуды колебаний компонент микродеформаций довольно резко уменьшаются (в 3–5 раз) относительно амплитуд на предыдущих двух стадиях деформирования.

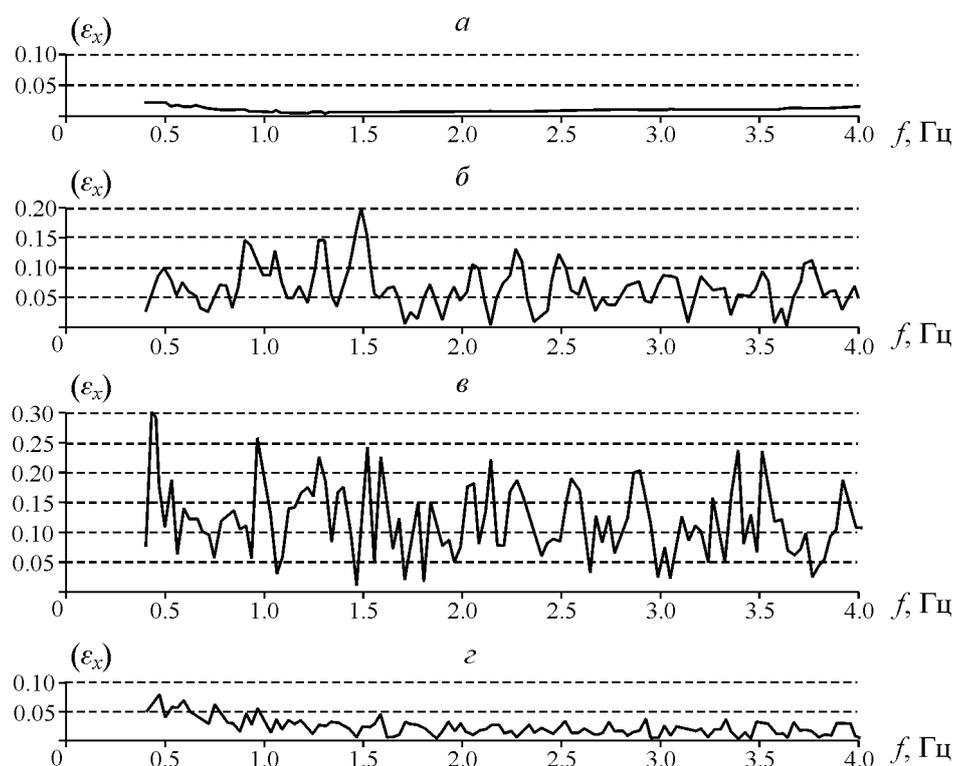


Рис. 12. Амплитудно-частотная характеристика для продольной компоненты микродеформации  $\varepsilon_x$  по стадиям деформирования: 1 — (а); 2 — (б); 3 — (в); 4 — (г)

В качестве контрольных для различных элементов сканируемой поверхности породного образца были проведены расчеты частот, соответствующих максимальным значениям амплитуд деформационно-волновых пакетов на стадиях предразрушения и постпикового нагружения. На рис. 13 приведены типичные амплитудно-частотные характеристики для компоненты микродеформации  $\varepsilon_x$  на стадии деформирования 2 для двух различных элементов поверхности образца мрамора. На стадии предразрушения такие частоты оцениваются значениями: 0.9–1.1, 1.5, 2.3, 2.85, 3.75 Гц. Аналогичные характеристики приведены на рис. 14 для ниспадающего участка диаграммы деформирования. На стадии 3 частоты, соответствующие максимальным значениям амплитуд деформирования, принимают значения: 0.45; 1; 1.6–1.7; 2.5–2.6; 2.9; 3.2; 3.5 Гц. Сравнивая выделяемые диапазоны частот деформаций для стадий 2 (0.9–3.75 Гц) и 3 (0.48–3.5 Гц), можно отметить некоторое смещение амплитудно-частотного спектра дефор-

мационно-волновых пакетов в более низкочастотную область для стадии разрушения породного образца 3. В известной мере это соответствует и структуре волновых пакетов сопутствующего ЭМИ-излучения, наблюдаемого на стадии разрушения образцов горных пород [8].

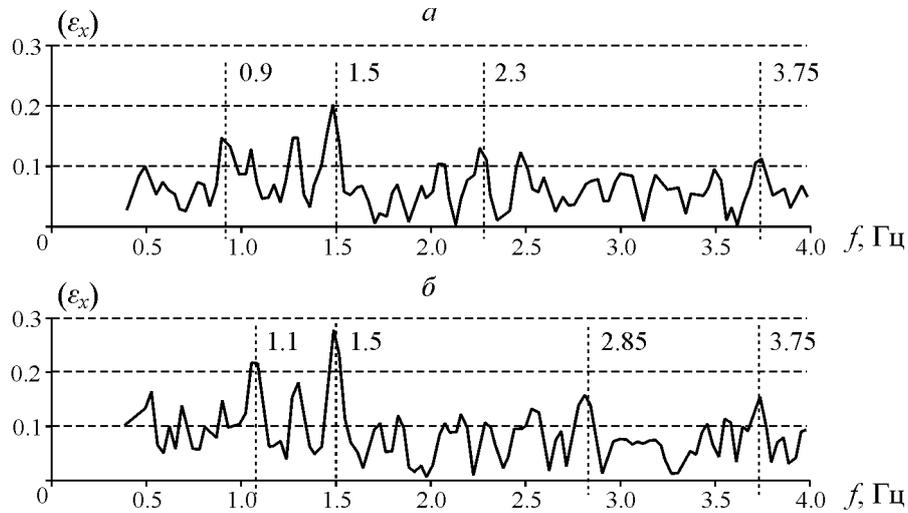


Рис. 13. Амплитудно-частотная характеристика для компоненты микродеформации  $\varepsilon_x$  на стадии деформирования 2 для двух различных элементов поверхности образца мрамора (а, б)

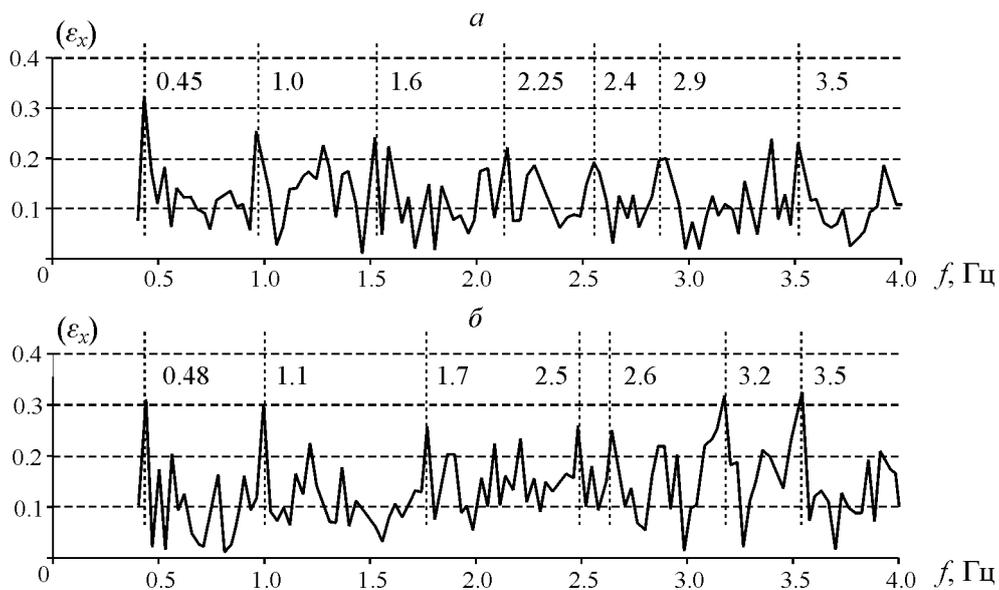


Рис. 14. Амплитудно-частотная характеристика для компоненты микродеформации  $\varepsilon_x$  на стадии деформирования 3 для двух различных элементов поверхности образца мрамора (а, б)

**Оценка скоростей микродеформации на стадии до пиковой нагрузки.** Для сравнения последующие расчеты выполнены для разных областей сканируемой поверхности образца: 1 — область с возникшей впоследствии трещиной, 2 — область неразрушенного материала (см. рис. 15).

Каждая из анализируемых областей 1 и 2 разбивалась на 120 элементов размером  $0.5 \times 0.5$  мм. Для этих элементов построены зависимости компоненты поперечной микродеформации  $\varepsilon_y$  во времени. Для оценки скоростей микродеформаций проведена аппроксимация и сглаживание экспериментальных данных — кривых микродеформации  $\varepsilon_y(t)$  для элементов размером  $0.5 \times 0.5$  мм на интервале времени от 0 до 40 с. Линии тренда кривых  $\varepsilon_y(t)$  вычислялись в виде полиномов

6-й степени, достоверность аппроксимации составляла 0.86–0.97. Функции зависимостей скоростей микродеформации от времени  $\varepsilon'_y(t)$  вычислялись как производные от линий тренда зависимости деформации от времени  $\varepsilon_y(t)$ .

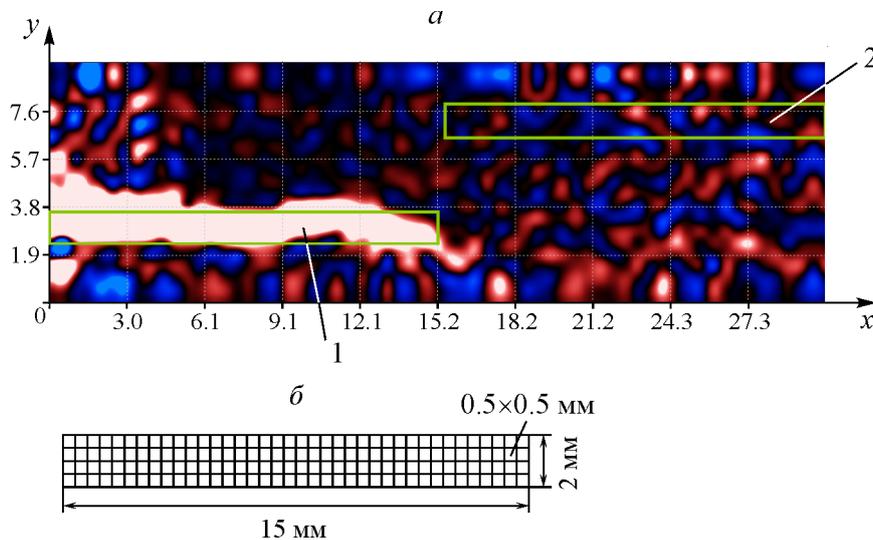


Рис. 15. Сканируемая поверхность образца (а) с расчетными областями 1 и 2 и параметры расчетной области (б)

На рис. 16 и 17 показан характерный вид зависимостей компоненты поперечной микродеформации  $\varepsilon_y$  во времени (для 4 произвольно выбранных элементов размером  $0.5 \times 0.5$  мм) для областей 1 и 2 соответственно. Из рис. 16 видно, что на участке нагружения от 0 до 40 с (что соответствует нагрузке  $\sim 42$  МПа или 0.83 от пиковой нагрузки) практически не наблюдается относительно высокочастотных колебаний компонент микродеформаций.

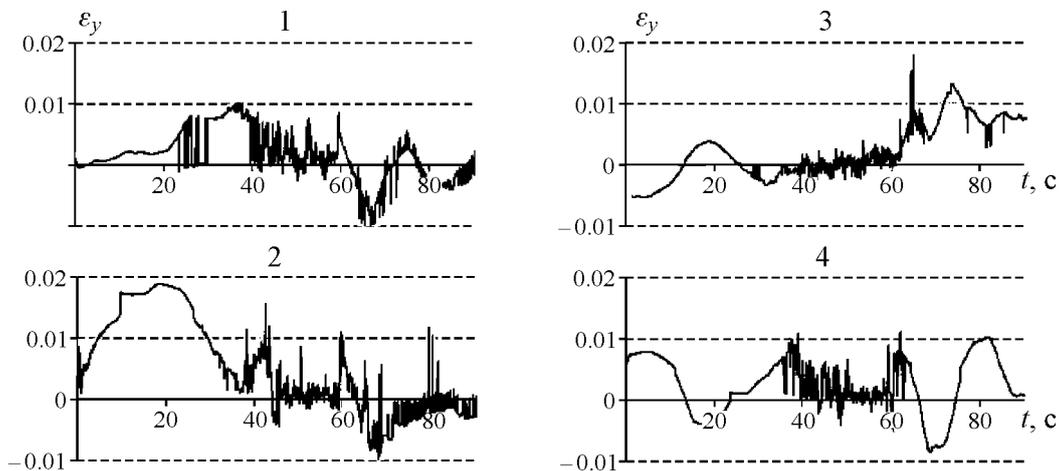


Рис. 16. Зависимости поперечной микродеформации  $\varepsilon_y$  для элементов размером  $0.5 \times 0.5$  мм от времени в области 1 (с будущей трещиной): 1, 2, 3, 4 — номера элементов области

На рис. 18 приведены зависимости поперечной микродеформации  $\varepsilon_y(t)$  для элементов размером  $0.5 \times 0.5$  мм на интервале времени от 0 до 40 с, а также линии их тренда: а — для области 1 с трещиной (4 элемента), б — для неразрушенной области 2 (4 элемента). На рис. 19 даны скоростные оценки  $\varepsilon'_y(t)$  согласно графикам, представленным на рис. 18.

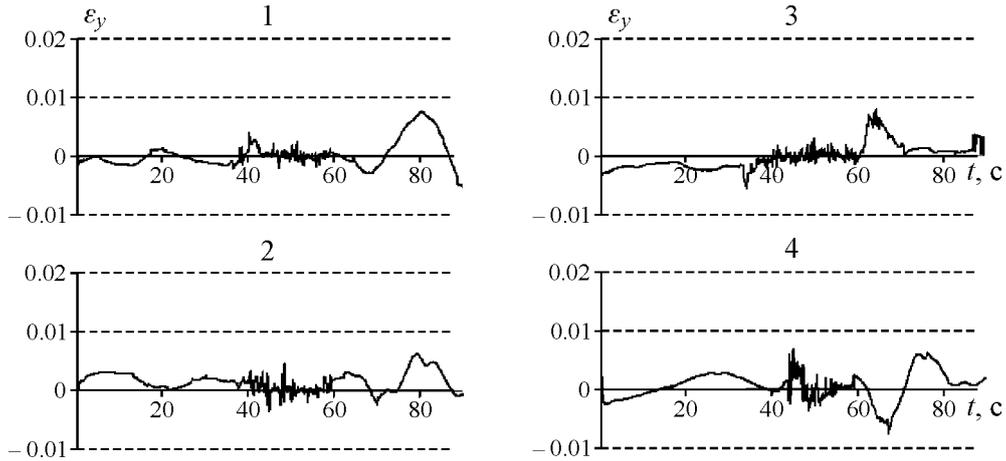


Рис. 17. Зависимости поперечной микродеформации  $\varepsilon_y$  для элементов размером  $0.5 \times 0.5$  мм от времени в области 2 (без нарушений): 1, 2, 3, 4 — номера элементов области

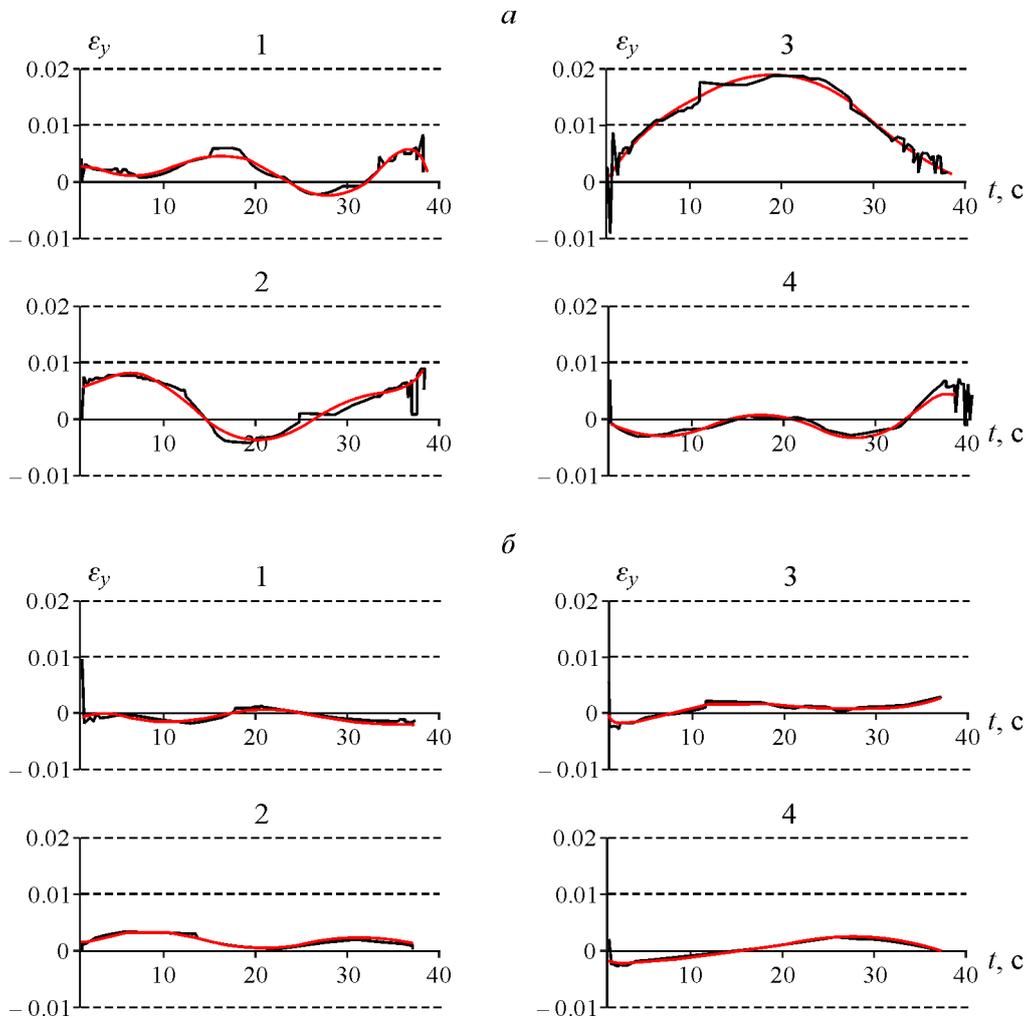


Рис. 18. Зависимости поперечной микродеформации  $\varepsilon_y$  для элементов размером  $0.5 \times 0.5$  мм от времени (черный цвет) и линии их тренда (красный цвет): а — область 1 (с будущей трещиной); б — область 2 (без трещины); 1, 2, 3, 4 — номера элементов сканируемой области

Как следует из рис. 19, в элементах поверхности образца, покрывающих область с будущей трещиной, амплитуды скоростей микродеформации  $\varepsilon'_y(t)$  превышают аналогичные в области 2 в несколько раз. В ряде случаев имеется тенденция значительного роста скорости  $\varepsilon'_y(t)$  с увеличением нагрузки.

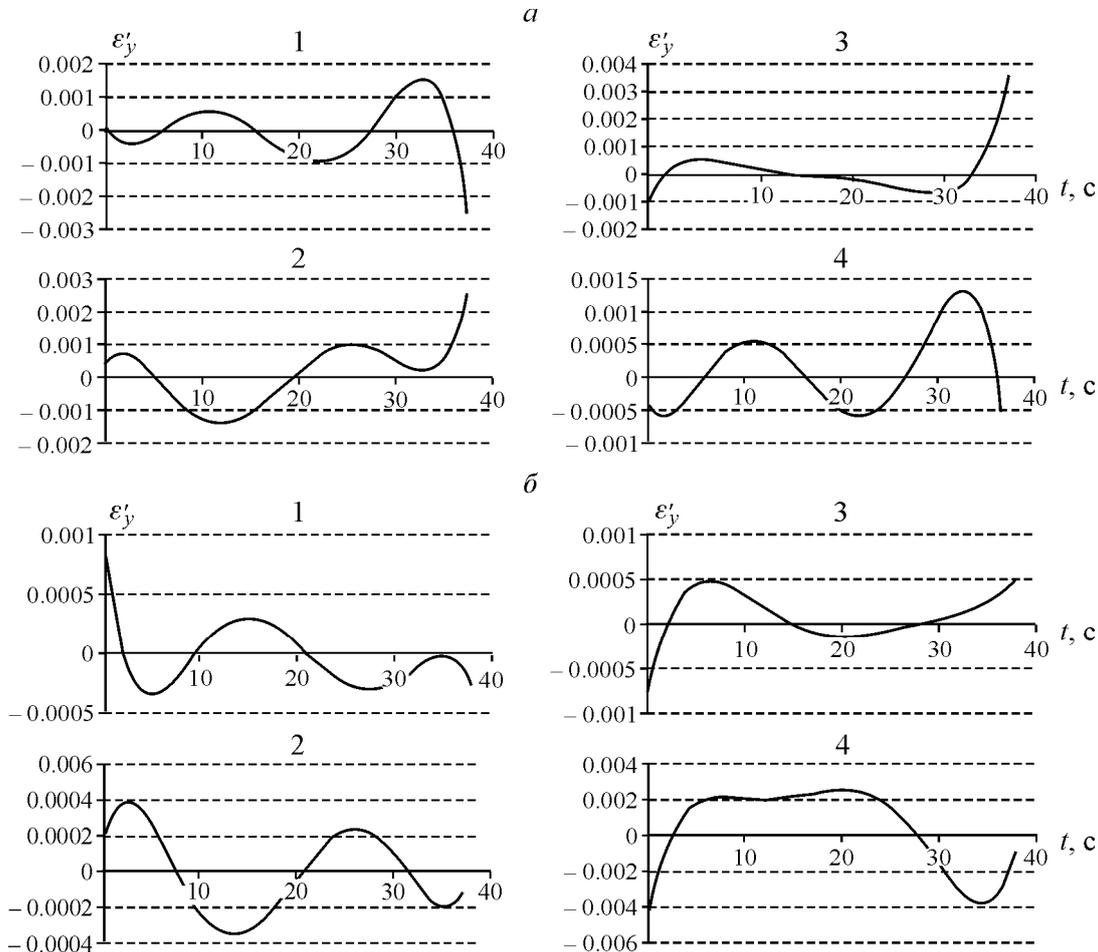


Рис. 19. Зависимости скоростей поперечной микродеформации  $\varepsilon'_y$  для элементов размером  $0.5 \times 0.5$  мм от времени  $t$ , с: а — область 1 (с будущей трещиной); б — область 2 (без трещины); 1, 2, 3, 4 — номера элементов сканируемой области

**Исследование суммарных деформаций в отдельных фрагментах области 1 (возникновение будущей трещины).** Область сканируемой поверхности образца 1 (с будущей трещиной) разбита на 4 фрагмента размером  $15 \times 0.5$  мм (рис. 20), в состав каждого из которых входит 30 элементов размером  $0.5 \times 0.5$  мм.

Для каждого из 4 фрагментов построены зависимости суммарных микродеформаций во времени (рис. 21).

Для фрагмента поверхности 4, имеющего наибольшую амплитуду колебаний деформаций, более подробно рассмотрены зависимости суммарных микродеформаций  $\varepsilon_y$  в элементах размером  $0.5 \times 0.5$  мм (рис. 22).

Согласно данным всех экспериментов, выделенные элементы покрытия сканируемых поверхностей породных образцов в процессе их нагружения до разрушения совершают как синфазные, так и антифазные колебания.

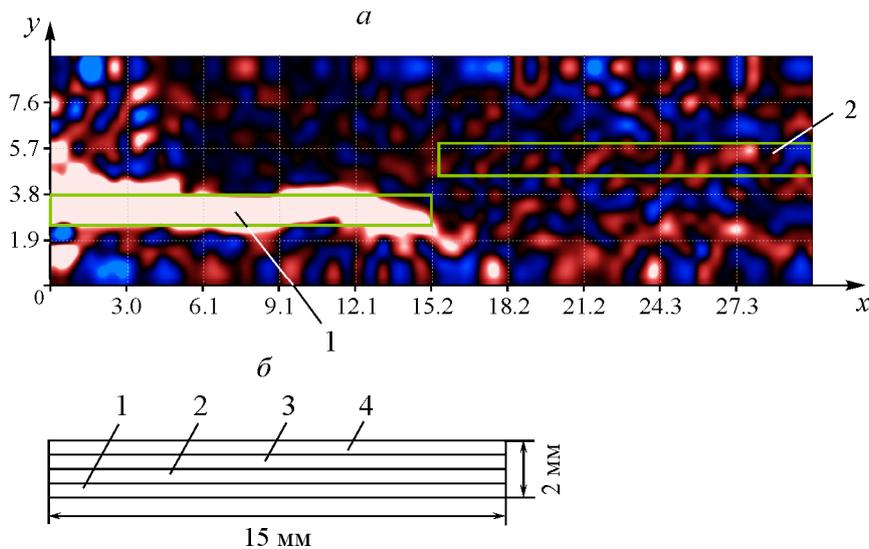


Рис. 20. Разбиение области 1 сканируемой поверхности (а) породного образца на отдельные фрагменты (1–4) размером 15×0.5 мм (б)

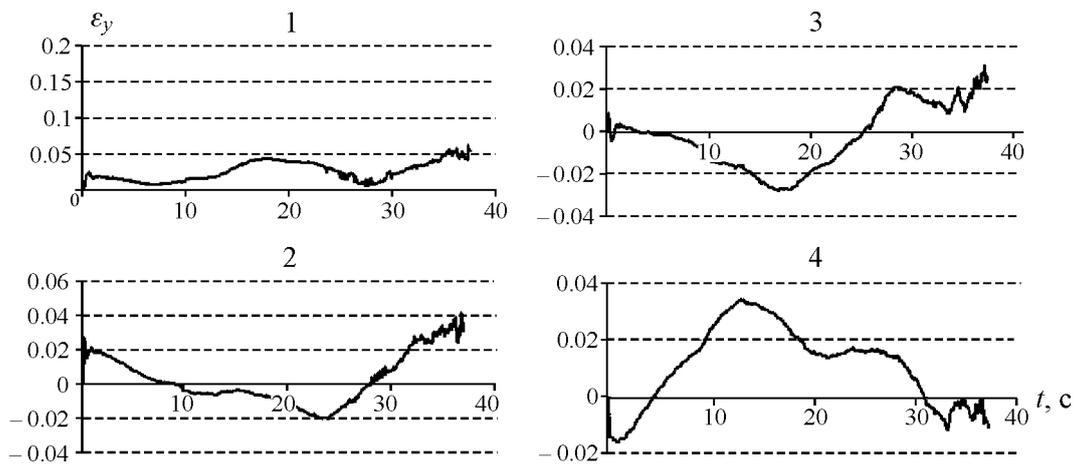


Рис. 21. Зависимости суммарных микродеформаций  $\varepsilon_y$  в фрагментах (1–4) размером 15×0.5 мм в поперечном направлении от времени в области 1 (с будущей трещиной)

**Энергетическая функция сканирования деформационно-волновых процессов и ее использование в обработке экспериментальных данных спекл-фотографий поверхности породных образцов.** Для общей оценки деформационно-волнового поведения геоматериалов внутри образцов горных пород как “суммы” вклада выделенных “элементов покрытия” сканируемых поверхностей с разнонаправленными (синфазными и антифазными) колебаниями наиболее удобным, по нашему мнению, является энергетический подход. Такой подход успешно использован при изучении возможных причин увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников “Октябрьский” и “Таймырский” Норильского месторождения полиметаллов [10], а также угольных шахт Кузбасса [11].

В основе энергетического подхода общей оценки деформационно-волновых процессов в столь сложных по строению напряженных массивах горных пород лежит, в частности, сканирующая функция шахтной сейсмологической информации, введенная в [12]. По существу, она описывает способ определения приведенного центра сейсмоэнерговыведения за заданный период времени в пределах определенного объема массива горных пород.

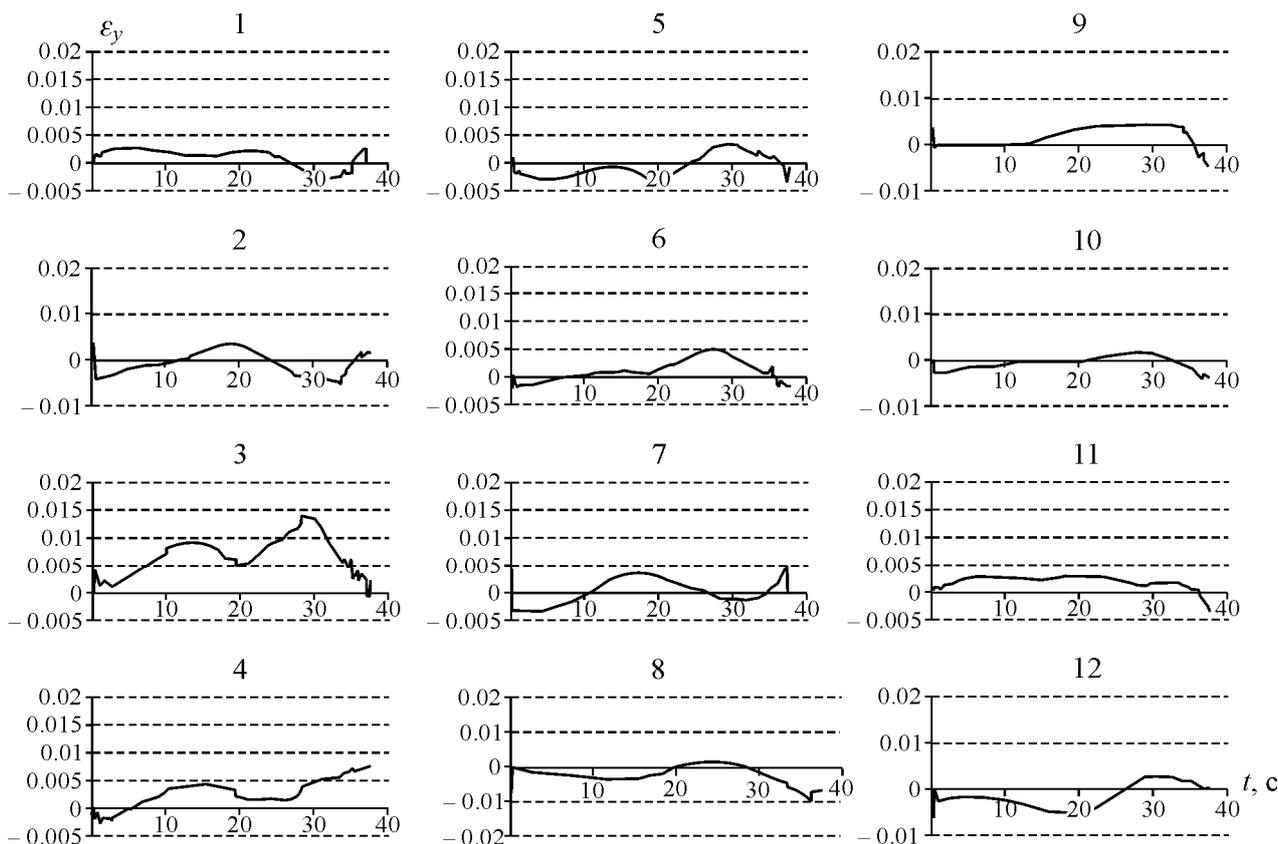


Рис. 22. Зависимости суммарных микродеформаций  $\varepsilon_y$  в элементах (1 – 12) размером  $0.5 \times 0.5$  мм в поперечном направлении от времени в фрагменте 4 области 1 (с будущей трещиной)

В простейшем случае это аналог понятия “центра масс” в классической механике, но применительно к сейсмособытиям разной энергии в пределах выделенного объема (или участка) породного массива. Его координаты  $R_E$  и соответственно траекторию движения можно вычислить, используя простую формулу:

$$R_E = \sum_i r_i E_i / \sum_i E_i, \tag{2}$$

где  $r_i = (x_i, y_i, z_i)$  — координаты;  $E_i$  — энергия  $i$ -го динамического события из определенного множества таких событий, произошедших в контролируемом объеме за определенный период времени.

Применительно к полному объему информации, полученной в экспериментах, в используемых обозначениях формулу (2) можно записать в следующем виде:

$$R = \sum_{i=1}^N r_i \varepsilon_i / \sum_{i=1}^N \varepsilon_i. \tag{3}$$

Для “плоского” случая имеем

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}, \tag{4}$$

где  $\varepsilon_i$  — деформация в точке  $r_i(x_i, y_i)$ ;  $x_0, y_0$  — начало системы координат (геометрический центр рабочей поверхности образца);  $N$  — количество измерительных точек на рабочей поверхности образца, суммирование ведется на фиксированный момент времени  $t_i$  (кадр  $i$ ) с известным значением нагрузки  $P$ .

На рис. 23, 24 приведены графики сканирующих функций (3) отдельно для компонент деформаций  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  ( $R_x(t)$  и  $R_y(t)$  соответственно) в процессе нагружения породного образца до разрушения включительно в безразмерных координатах  $P/P_{пр}$  и  $t/t_{пр}$ , где  $t_{пр}$  отвечает пиковой нагрузке ( $P/P_{пр} = 1$ ).

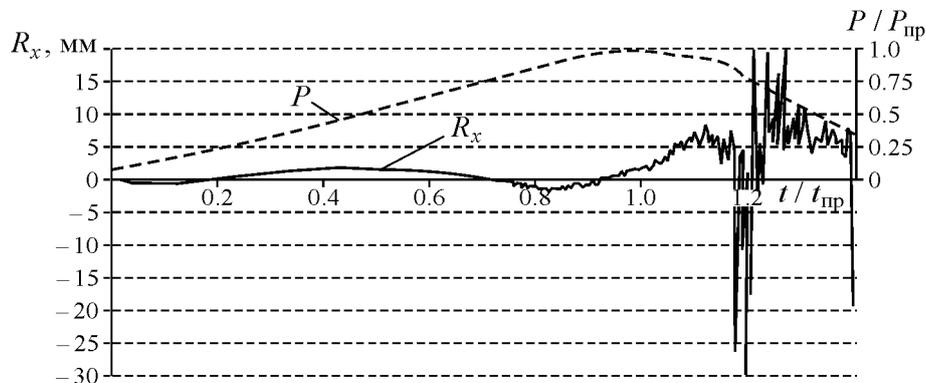


Рис. 23. Вид сканирующей функции  $R_x(t)$  для компоненты продольной деформации  $\varepsilon_x$  в процессе нагружения  $P$  образца мрамора до разрушения (в безразмерных координатах для  $P$  и  $t$ )

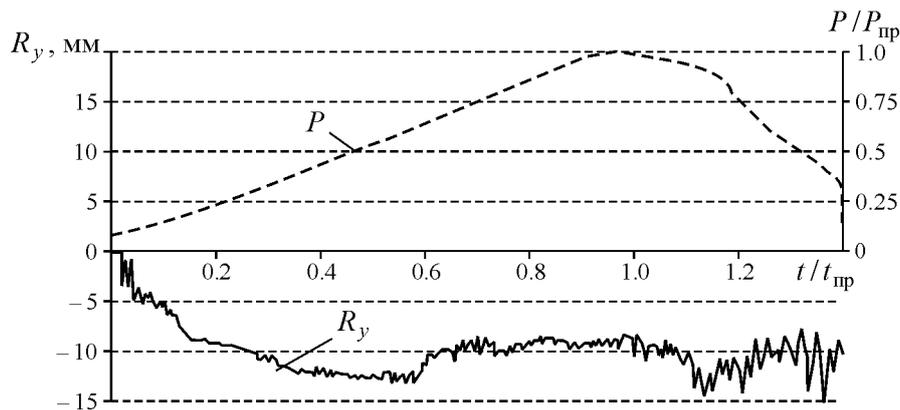


Рис. 24. Вид сканирующей функции  $R_y(t)$  для компоненты поперечной деформации  $\varepsilon_y$  в процессе нагружения  $P$  образца мрамора до разрушения (в безразмерных координатах для  $P$  и  $t$ )

Из приведенных графиков можно отметить следующие особенности в структуре  $R_x(t)$  и  $R_y(t)$ :

- противофазно-немонотонное (“буктообразное”) поведение в процессе нагружения образца вплоть до предельного уровня;
- знаки этих функций в процессе нагружения образца вплоть до начала разрушения противоположные, за исключением этапа нагружения  $P/P_{пр} \in 0.7 - 0.9$ . Примечательно, что в этом диапазоне нагружений функция  $R_y$  практически не меняет своих абсолютных значений (“плато”), в то время как по  $R_x$  наблюдается переход в отрицательную область значений;
- резкое изменение амплитудно-периодных спектров  $R_x(t)$  и  $R_y(t)$ , наблюдаемое на “запредельном” (постпиковом) этапе нагружения образцов;
- почти порядковое отличие абсолютных значений и отличие знаков  $R_x$  и  $R_y$  ( $|R_x| \ll |R_y|$ ) в процессе нагружения образцов до разрушения, позволяющее указать место расположения участка формирующейся основной трещины макроразрушения;

— специфическое поведение  $R_x$  и  $R_y$  на участке нагружения  $P/P_{пр} \in 0.7-0.9$ , которое можно использовать как диагностический параметр в натурных измерениях не только по достигнутому на данный момент времени уровню напряжений в породных массивах, но и по направлению трендов их эволюции (в сторону роста или уменьшения).

Отмеченные особенности представляют непосредственный практический интерес для использования в мониторинговых системах геомеханико-геодинамической безопасности горных предприятий на основе комплексной сейсмодеформационной информации [5, 6].

### ВЫВОДЫ

На образцах песчаника и мрамора, обладающих структурной неоднородностью в виде соответствующих минералогических включений, в процессе одноосного нагружения до разрушения детально исследованы особенности распределения и эволюции их напряженно-деформированного состояния на микроуровне по рабочим поверхностям породных образцов с помощью лазерного измерительного оптико-телевизионного комплекса ALMEC-tv.

**Экспериментально установлено, что:**

- при одноосном нагружении призматических образцов песчаника, мрамора и сильвинита (на прессовой установке Instron-8802 в режиме жесткого нагружения со скоростями перемещения подвижного захвата 0.02–0.2 мм/мин) при определенном уровне напряжений возникают низкочастотные процессы внутреннего микродеформирования, генерируемые медленными (квазистатическими) силовыми воздействиями;

- амплитуда таких деформационно-волновых процессов существенно зависит от стадии макронагружения:

- на стадии упругого деформирования, когда напряжение в образце геоматериала не превышает 0.5 предела прочности, колебания компонент микродеформаций практически отсутствуют;

- на стадии нелинейно-упругого деформирования, когда задаваемое напряжение принимает значения от 0.5 до 1 предела прочности, амплитуды колебаний микродеформаций существенно возрастают, включая ниспадающую стадию 3; частота колебаний микродеформаций составляет  $f = 0.5 - 4$  Гц;

- на стадии остаточной прочности амплитуды колебаний компонент микродеформаций резко уменьшаются (в 3–5 раз) относительно таковых на стадиях 2 и 3;

- в элементах сканируемой поверхности породного образца, покрывающих область с будущей трещиной, амплитуды скоростей микродеформации  $\varepsilon'_t$  превышают аналогичные для областей поверхности неразрушаемого геоматериала в несколько раз. В ряде случаев отмечается тенденция значительного роста скорости деформирования с увеличением нагрузки.

**Введена и использована энергетическая функция сканирования деформационно-волновых процессов** для обработки экспериментальных данных спекл-фотографий поверхностей породных образцов при их нагружении до разрушения.

**Таким образом, экспериментально доказано, что при определенном уровне нагружения образцов горных пород осциллирующие движения фракталей или структурных неоднородностей возникают значительно раньше, чем достигается предел прочности геоматериалов на одноосное сжатие.** Полагаем, что именно с деформационно-волновыми процессами внутри массивов горных пород и геоматериалов связаны сейсмо- и электромагнитно-эмиссионные процессы, являющиеся взаимосвязанными. В этом отношении как массивы горных пород, так и геоматериалы представляют собой, по сути, своеобразные “конденсаторные системы” сложного иерархического строения, движение берегов трещин для которых делает породный массив “электромагнитно связанным” с деформационно-волновыми процессами в маятниковом приближении [1, 8, 13].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Опарин В. Н., Танайно А. С.** Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск: Наука, 2011.
2. **Опарин В. Н., Сашурин А. Д., Леонтьев А. В. и др.** Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
3. **Усольцева О. М., Назарова Л. А., Цой П. А., Назаров Л. А., Семенов В. Н.** Исследование генезиса и эволюции нарушений сплошности в геоматериалах: Теория и лабораторный эксперимент // ФТПРПИ. — 2013. — № 1.
4. **Опарин В. Н.** Научные открытия межтысячелетия в геомеханике и перспективы их применения / Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. науч. конф. с участием иностр. ученых. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2008.
5. **Адушкин В. В., Опарин В. Н.** От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. I // ФТПРПИ. — 2012. — № 2.
6. **Адушкин В. В., Опарин В. Н.** От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. II // ФТПРПИ. — 2013. — № 2.
7. **Опарин В. Н.** Волны маятникового типа и “геомеханическая температура” / Тр. 2-й Рос.-Кит. конф. “Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах”. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.
8. **Опарин В. Н., Яковицкая Г. Е., Вострецов А. Г., Серяков В. М., Кривецкий А. В.** О коэффициенте механо-электромагнитных преобразований при разрушении образцов горных пород // ФТПРПИ. — 2013. — № 3.
9. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Еременко А. А.** Об отношении линейных размеров блоков горных пород к величинам раскрытия трещин в структурной иерархии массива // ФТПРПИ. — 1993. — № 3.
10. **Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Востриков В. И. и др.** О возможных причинах увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников “Октябрьский” и “Таймырский” Норильского месторождения в 2003 г. Ч. I: Сейсмический режим // ФТПРПИ. — 2004. — № 4.
11. **Опарин В. Н., Козырев А. А., Сашурин А. Д. и др.** Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012.
12. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Еременко А. А.** Об одном методе сканирования шахтной сейсмологической информации // ДАН. — 1993. — Т. 333. — № 6.
13. **Яковицкая Г. Е.** О некоторых особенностях структуры сигналов электромагнитного излучения при разрушении горных пород // ФТПРПИ. — 2004. — № 3.

*Поступила в редакцию 26/VIII 2013*