

Деформирование напряженных массивов горных пород под действием землетрясений, горных ударов и взрывов

УДК 550.3+622

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

ОПАРИН ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом экспериментальной геомеханики (Институт горного дела им. Чинакала СО РАН, Новосибирск).

E-mail: oparin@misd.nsc.ru, 630091, Новосибирск, Красный проспект, 54.

УСОЛЬЦЕВА ОЛЬГА МИХАЙЛОВНА – кандидат физико-математических наук, исполнительный директор ЦКП ГГИ СО РАН (Институт горного дела СО РАН, Новосибирск).

E-mail: usoltseva57@mail.ru, 630091, Новосибирск, Красный проспект, 54.

СЕМЕНОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ – главный специалист ЦКП ГГИ СО РАН (Институт горного дела СО РАН, Новосибирск).

E-mail: paveltsoy@mail.ru, Новосибирск, Красный проспект, 54.

ЦОЙ ПАВЕЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ЦКП ГГИ СО РАН (Институт горного дела СО РАН, Новосибирск). E-mail: paveltsoy@mail.ru 630091, Новосибирск, Красный проспект, 54.

Эволюция напряженно-деформированного состояния образцов из искусственных геоматериалов при их одно- и двухосном нагружении

Экспериментально на образцах горных пород и искусственных геоматериалов, обладающих структурой, с помощью метода спекл-фотографий детально исследованы особенности эволюции напряженно-деформированного состояния на микроуровне: установлен эффект возникновения внутри образцов искусственных геоматериалов низкочастотных процессов микродеформирования при определенном уровне напряжений. Развиваемое направление экспериментальных исследований относится к физико-механическим основам формирования очаговых зон катастрофических событий.

Ключевые слова: массив горных пород, лабораторный эксперимент, деформационно-волновые процессы.

Введение

В последние годы в связи с активным развитием теории волн маятникового типа в напряженных геосредах блочно-иерархического строения [1, 2 10, 13] стало формироваться новое направление исследований, относящееся к очаговым зонам катастрофических событий (землетрясений, горных ударов и др.) – «*геомеханическая термодинамика*» [9]. В известном смысле это аналог классической термодинамики, если вместо отдельных молекул вещества геоматериалов будем

рассматривать их большие кластеры (от субмолекулярных до макроблоков), учитывая возможность колебательных (поступательных и вращательных) движений последних в приближении абсолютно твердых тел. Этот «постулат» лежит в феноменологических основах теории волн маятникового типа, вещественными носителями которых являются структурные элементы горных пород и их массивов разного иерархического уровня [5].

В работах [4, 7] впервые предложена механическая модель «самонапряженных» массивов горных пород, где механические условия взаимодействия между структурными элементами горных пород в стесненных условиях заменены нелинейными «пружинками» разного иерархического уровня по типу вложения одного в другой (согласно концепции М.А. Садовского) [14]. Эта механическая модель позволила объяснить наблюдаемые в эксперименте [8] очень важные особенности эволюции гармонических акустических сигналов при нагружении блочных сред с цилиндрической полостью (моделирующей «концентратор» напряжений или будущую «очаговую» зону), такие как:

(1) существование устойчивой корреляционной связи между стадиями нагружения среды со структурой и амплитудно-частотными характеристиками гармонических сигналов, регистрируемых в составных блоках модели геосреды;

(2) частоты резонансных акустических колебаний в блоках модели, существенно различающиеся между собой на начальных этапах ее нагружения (проявляют конвергенцию друг к другу на стадии предразрушения);

(3) на стадии предразрушения блочной модели геосреды имеет место не только схождение резонансных частот по системе составляющих ее геоблоков, но и усиление амплитуды гармонических сигналов за счет перехода накопленной упругой потенциальной энергии структурными элементами в колебательную (кинетическую) энергию излучения акустических волн, с нарушением классического закона затухания гармонических сигналов от источников их излучения.

По существу, впервые экспериментально установлено, что моделируемая «очаговая зона» будущего разрушения способна эволюционировать в акустически активную геосреду, работающую на критических уровнях нагружения как автоколебательная или своеобразная «геомеханическая лазерная система». В отличие от классических оптических лазерных систем, однако, она не является монохроматической (!), акустический спектр излучения приобретает дискретно-каноническую форму $f_i = f_0(\sqrt{2})^i$, $i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$; $f_0 = V_p / (2\Delta)$, V_p – скорость продольной волны в геоматериалах структурных блоках диаметра Δ .

Важно отметить и то, что в [11] представлена первая простейшая модель для описания условий возникновения канонического спектра акустических волн в предположении о том, что жесткость взаимодействия между структурными блоками («пружинок») является нелинейной функцией их относительных смещений.

Макро- и микродеформационные процессы в образцах искусственных геоматериалов при двухосном нагружении до разрушения

Ранее, в работе [12] авторами выполнены эксперименты на образцах горных пород, обладающих структурной неоднородностью по изучению особенностей распределения и эволюции напряженно-деформированного состояния на микроуровне по рабочим поверхностям породных образцов с помощью метода спекл-фотографий в процессе одноосного нагружения до разрушения.

При этом было установлено, что:

(1) 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;

(2) амплитуда таких деформационно-волновых процессов существенно зависит от уровня 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, при напряжениях в диапазоне от 0,5 до 1 от предела прочности, амплитуды колебаний микродеформаций существенно возрастают, включая ниспадающую стадию; 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 предыдущих стадиях;

(3) в элементах сканируемой поверхности породного образца, покрывающих область с будущей трещиной, амплитуды скоростей микродеформации $\dot{\epsilon}_y$ превышают аналогичные для областей поверхности неразрушаемого геоматериала в несколько раз. В ряде случаев имеет место тенденция значительного роста скорости деформирования с увеличением нагрузки.

Цель данной работы – определить влияние вида нагружения на особенности развития деформационных процессов в искусственных геоматериалах вплоть до пиковой нагрузки.

Материал искусственных образцов представлял собой алебастр с водой состава: 60% алебастра, 35% воды, с добавлением 5% клея “Neolit” по весу; включения представляли собой сферы диаметра 3–4 мм из отожженного в несколько этапов диоксида кремния (силикагеля) с добавками. Для включений предел прочности при сжатии составляет 10,6 МПа; предел прочности связующего материала при осевом сжатии составляет 5,4 МПа; при двухосном сжатии – 10,5 МПа (в экспериментах на двухосное сжатие $\sigma_2 = \text{const} = \sigma_{\text{пр}}$, где $\sigma_{\text{пр}}$ – предел прочности материала). Призматические образцы имели размеры 60x60x11 мм.

Испытания образцов геоматериалов проводились на сервогидравлическом прессе Instron-8802, позволяющем задавать программы нагружения с заданной скоростью по усилиям и по перемещениям. Для реализации двухосного нагружения использовалось специальное устройство, позволяющее создавать дополнительно, независимо от пресса, боковую нагрузку на призматический образец. В эксперименте непрерывно регистрировались и записывались в компьютерный файл усилия бокового поджатия образца, перемещение траверсы пресса и усилие, создаваемое прессом. Максимальное усилие задавалось прессом с фиксированной скоростью перемещения траверсы пресса 1 мм/мин. Для регистрации микродеформаций на рабочей поверхности призматического образцов использовалась автоматизированная система анализа цифровых спекл-фотографий ALMEC-tv [6].

Проведена серия экспериментов при одноосном и двухосном жестком сжатии (до разрушения) призматических образцов из искусственных геоматериалов. Соответствующие результаты «макродеформирования» приведены на рис. 2.

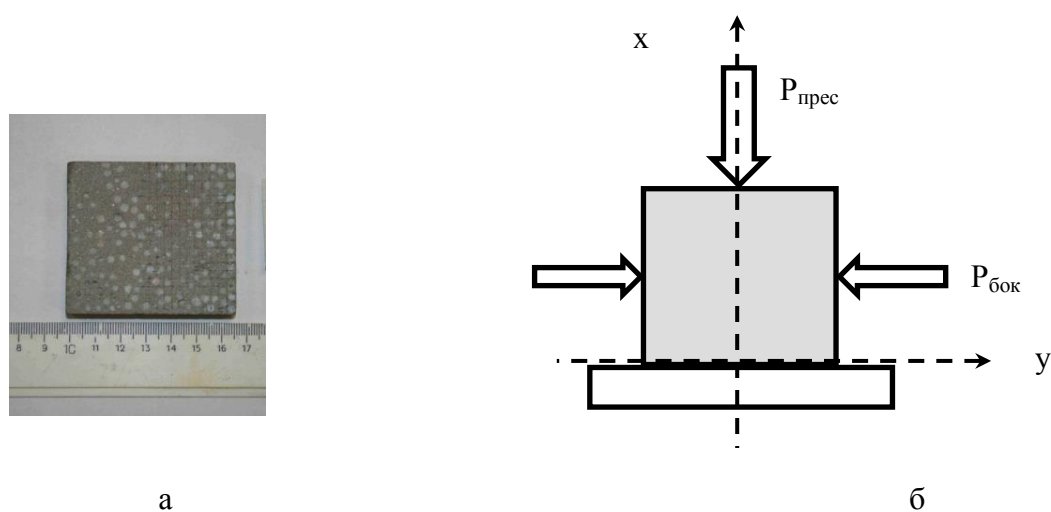


Рис. 1. Образец искусственного материала для испытаний (а), схема нагружения (б)

Сравнительный анализ процессов микродеформирования в образце был выполнен для сканируемых областей различных размеров: 1 – области с возникшими впоследствии разрушениями, 2 – области неразрушенного материала. Размеры исследуемых областей варьировались в пределах от 0,1 до 0,5 размера сканируемой поверхности (рис. 3). Ниже анализируются характерные результаты обработки экспериментальных данных при двухосном сжатии.

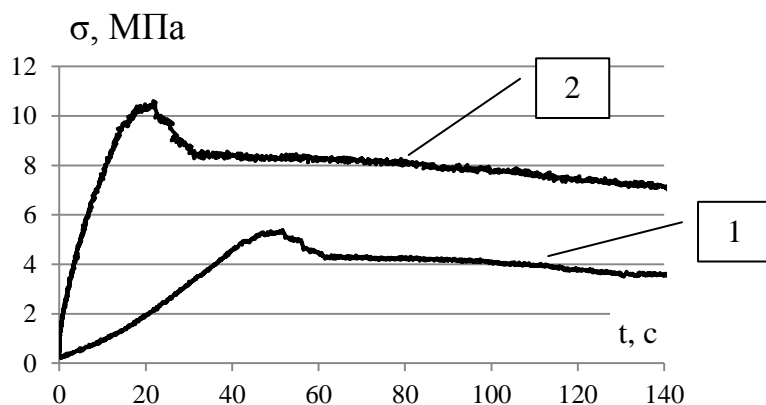


Рис. 2. Диаграммы «напряжение–деформация» при одноосном (1) и двухосном сжатии (2); время возникновения трещины $t = 130$ с при одноосном нагружении, $t = 140$ с при двухосном нагружении

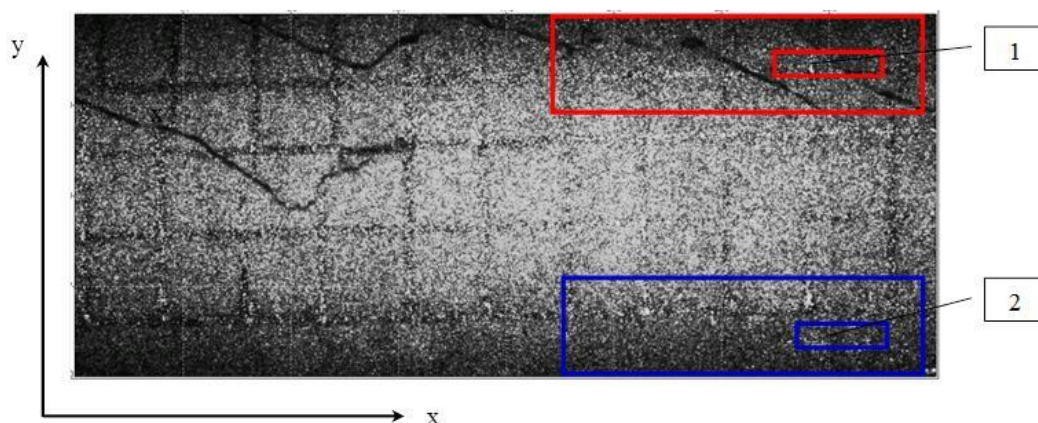


Рис. 3. Сканируемая поверхность образца в эксперименте на двухосное сжатие после разрушения (момент времени $t = 140$ с); 1 – области поверхности с возникшими впоследствии разрушениями, 2 – области неразрушенного материала

На рабочей поверхности породного образца выделялись одинаковые по размерам прямоугольные участки (рис. 3), для которых рассчитывались суммарные значения компонент микродеформаций в продольном (x), поперечном (y) и сдвиговом (xy) направлениях – ε_x , ε_y и ε_{xy} соответственно. На рис. 4, а–в приведены графики суммарных микродеформаций (красным цветом – для области с разрушением (1), синим – неразрушенной области (2) поверхности образца, черным цветом показана зависимость напряжения от времени в процессе нагружения образца до предела прочности включительно в безразмерных координатах P/P_{np} и t/t_{np} , где $t/t_{np}=1$ отвечает пиковой нагрузке ($P/P_{np} = 1$).

Приведенные графики позволяют отметить следующие особенности в поведении компонент микродеформаций:

- микродеформации ε_x в областях 1 и 2 имеют практически одинаковые значения вплоть до достижения предела прочности;
- микродеформации ε_y в областях 1 и 2 изменяются практически в противофазе, особенно от значений $t/t_{np} = 0,5$, и имеют значительные различия по величине;

• зависимости микродеформаций ε_{xy} в областях 1 и 2, начиная от $t/t_{np} = 0,4$, ведут себя существенно синфазно, однако различие в их абсолютных значениях увеличивается до предела прочности: при $P/P_{np} = 1$ в области 2 $\varepsilon_{xy} = -0,1$, а в области 1 $\varepsilon_{xy} = 0,5$;

• при значениях $t/t_{np} \in 0,5 \div 0,6$ по всем компонентам деформаций возникают высокочастотные колебания, которые в области разрушения 2 имеют значительно более высокую амплитуду, чем в области 1.

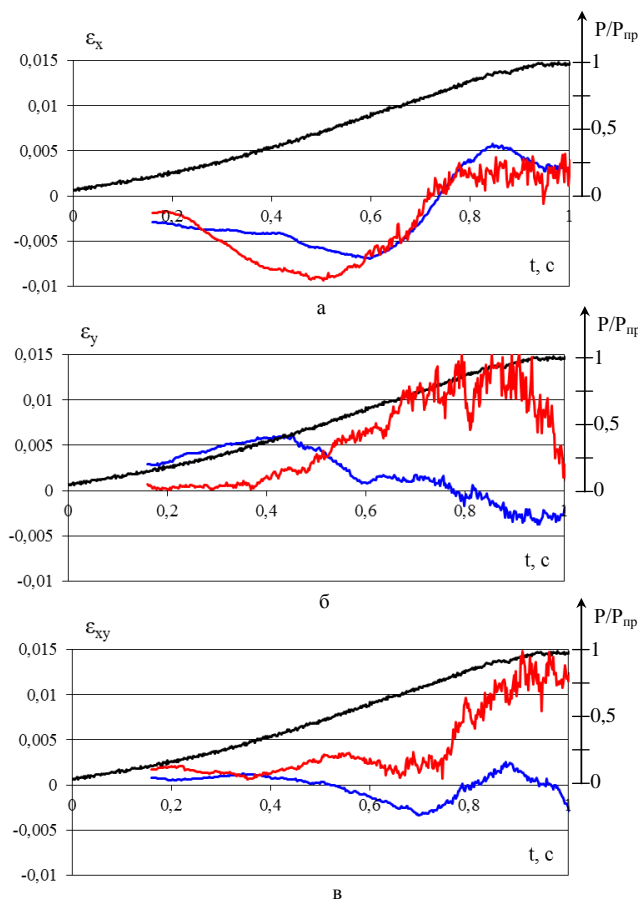


Рис. 4. Зависимости микродеформаций ε_x , ε_y и ε_{xy} во времени в безразмерных координатах t/t_{np} , P/P_{np} для эксперимента на двухосное нагружение образца из искусственного геоматериала

Для оценки деформационно-волнового поведения геоматериалов внутри искусственных образцов в виде «суммы» вклада элементов сканируемых поверхностей с разнонаправленными (синфазными и антифазными) колебаниями, так же как в работе [12], нами применен энергетический подход. В основе такого подхода для общей оценки деформационно-волновых процессов лежит сканирующая функция R , которая является аналогом понятию «центра масс» в классической механике и описывает способ определения приведенного центра сейсмоэнерговыведения за заданный период времени в пределах определенного объема массива горных пород.

Для данных экспериментов координаты R и, соответственно, траектория движения приведенного центра деформационного энерговыведения вычисляется по формулам:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N r_i \varepsilon_i}{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i}, \quad (1)$$

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

где ε_i – деформация в точке r_i (x_i, y_i), x_0, y_0 – начало системы координат (принят 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. 5, а–в приведены полученные в результате графики сканирующих функций $R_x(t)$ и $R_y(t)$, $R_{xy}(t)$ по (1) отдельно по каждой из компонент деформаций (ε_x , ε_y , ε_{xy}) соответственно в процессе нагружения породного образца до предела прочности включительно в безразмерных координатах P/P_{np} и t/t_{np} , где t_{np} отвечает пиковой нагрузке ($P/P_{np} = 1$). В расчетах использовались безразмерные координаты r_i/r_{max} , где r_{max} – максимальный размер r_i в продольном направлении образца.

Приведенные графики позволяют отметить следующие особенности поведения $R_x(t)$, $R_y(t)$ и $R_{xy}(t)$:

- функция $R_x(t)$ в областях поверхности 1 и 2 до значений $t/t_{np} = 0,65$ практически не изменяет свое начальное значение. Однако при $t/t_{np} = 0,65–0,7$ наблюдаются довольно резкие ее знакопеременные изменения. Колебательный процесс для $R_x(t)$ сохраняется до предела прочности, причем амплитуда колебаний $R_x(t)$ в области 1 существенно превышает аналогичную в области 2;
- функция $R_y(t)$ для области 1 резко изменяет свое начальное значение при $t/t_{np}=0,19–0,4$, после чего принимает постоянное значение; а для области 2 колебательные изменения $R_y(t)$ возникают при $t/t_{np} = 0,6–0,87$, с последующим убыванием;
- функция $R_{xy}(t)$ в области 1 сохраняет практически постоянные значения, за исключением интервала $t/t_{np} = 0,6–0,73$; в области 2 она имеет колебательный характер с возрастающей амплитудой до предела прочности.

На основании анализа поведения функций ε_x , ε_y , ε_{xy} , $R_x(t)$, $R_y(t)$ и $R_{xy}(t)$ можно определить следующие признаки, предшествующие разрушению образца геоматериала:

(1) компоненты одноименной деформации в области с разрушением и без него существенно отличаются по своим значениям (для данного эксперимента – это микродеформации ε_y , ε_{xy});

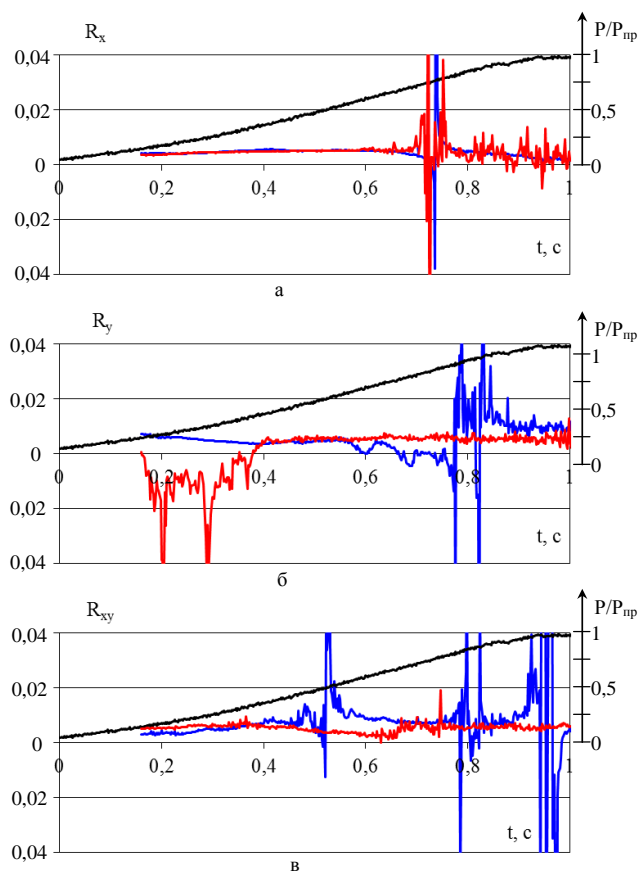


Рис. 5. Поведение сканирующих функций $R_x(t)$, $R_y(t)$ и $R_{xy}(t)$ для микродеформаций ε_x , ε_y и ε_{xy} во времени в безразмерных координатах t/t_{np} , P/P_{np} для эксперимента на двухосное нагружение образца из искусственного геоматериала

(2) амплитуда колебаний компоненты деформации в области разрушения значительно превышает аналогичную в неразрушенной области, что свидетельствует о более высокой скорости деформации и изменения вида деформированного состояния (это наблюдается также для микродеформаций ε_y , ε_{xy});

(3) сканирующие функции имеют колебательный характер, что свидетельствует о неоднородности внутреннего деформированного состояния геоматериала, однако по мере приближения к пиковой нагрузке ($t/t_{np}=1$) и далее перед началом образования трещины ($t/t_{np}=1,5$) они принимают постоянное значение (это функции $R_y(t)$, $R_{xy}(t)$). Такой характер поведения сканирующих функций $R_y(t)$, $R_{xy}(t)$ в сочетании с возрастающими значениями соответствующих компонент микродеформаций ε_y , ε_{xy} и амплитуды их колебаний свидетельствует о процессе локализации максимальных значений деформаций и сужении размера области, в которой они сосредоточены.

На основании вышеизложенного можно сделать заключение о том, что за разрушение отвечают деформации ε_y , ε_{xy} . Причем видна вполне определенная область образования макроразрушения. На рис. 6 приведена фотография поверхности образца геоматериала, который был разрушен на запредельном участке нагружения при $t/t_{np} = 1,3$. Трещина скола имеет сложную ступенчатую поверхность и образует углы 20–40° с направлением действия осевой силы, т.е. составляет комбинацию микротрещин в направлениях деформаций ε_y и ε_{xy} .

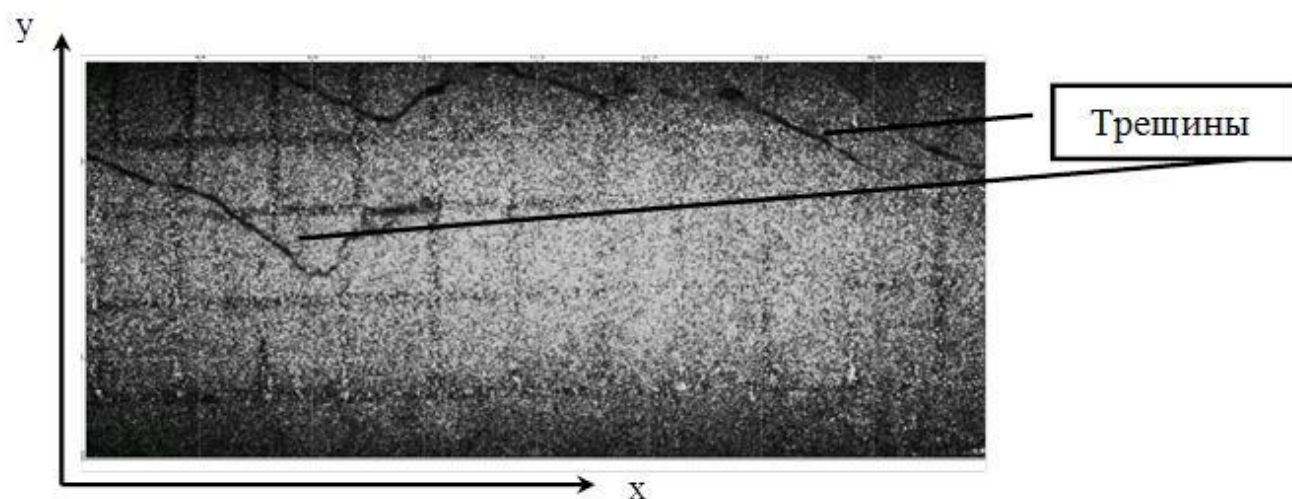


Рис. 6. Фотография поверхности образца после разрушения при двухосном сжатии, время эксперимента $t/t_{np} = 1,3$

Испытание образца из искусственного геоматериала при одноосном нагружении до разрушения

Для сравнения с рассмотренным выше случаем проведен эксперимент на одноосное сжатие образца из искусственного геоматериала. На основании приведенных критериев попытаемся по характеру изменения во времени компонент микродеформации ε_x , ε_y и ε_{xy} , а также характера поведения сканирующих функций $R_x(t)$, $R_y(t)$ и $R_{xy}(t)$ оценить вид будущего разрушения.

Для данного вида нагружения образца из искусственного геоматериала графики изменения компонент микродеформации ε_x в областях 1 и 2 сканируемой поверхности образца (рис. 7, а) практически совпадают между собой в пределах погрешности эксперимента. Соответствующие им сканирующие функции $R_x(t)$ для областей поверхности 1 и 2 (рис. 8, а) также изменяются подобным образом и совпадают между собой до значений $t/t_{np}=0,8$; далее появляются высокочастотные колебания деформаций вплоть до предела прочности $t/t_{np}=1$.

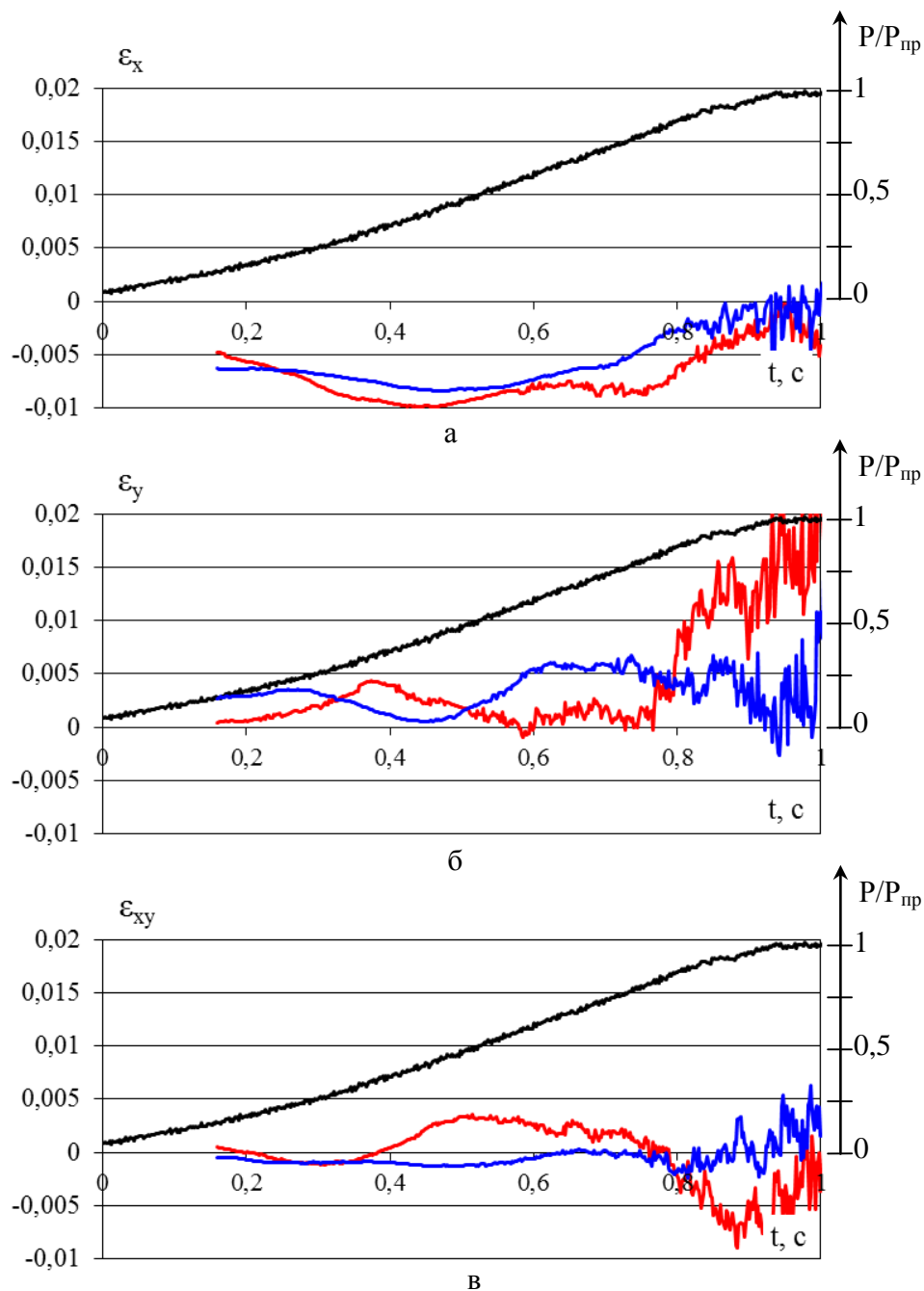


Рис. 7. Зависимости микродеформаций ε_x , ε_y и ε_{xy} во времени в безразмерных координатах $t/t_{пр}$, $P/P_{пр}$ для эксперимента на одноосное нагружение образца из искусственного геоматериала

Весьма контрастно для областей 1 и 2 отличается поведение компонент микродеформаций ε_y (рис. 7, б). Они изменяются практически в противофазе. При $t/t_{пр} \sim 1$ их значения отличаются более чем в 10 раз (от 0,002 до 0,02). Амплитуда более высокочастотных колебаний ε_y существенно выше, чем у компонент ε_x , ε_{xy} . По функции $R_y(t)$ в области 2 (рис. 8, б) наблюдаются высокочастотные колебания вплоть до предела прочности, в то время как функция $R_y(t)$ в области 1 при значениях $t/t_{пр} = 0,8-1$ принимает постоянное значение.

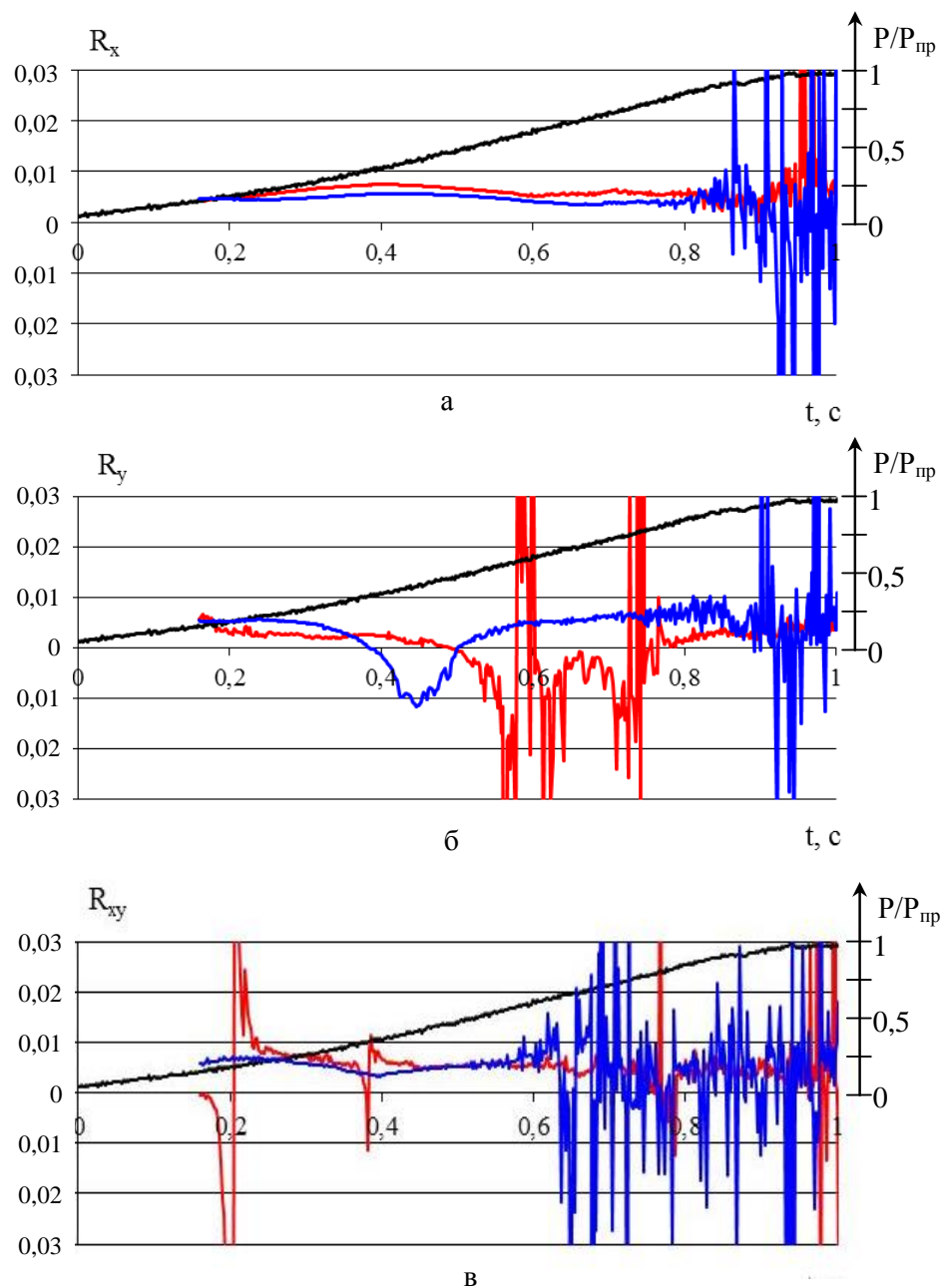


Рис. 8. Поведение сканирующих функций $R_x(t)$, $R_y(t)$ и $R_{xy}(t)$ для микродеформаций ϵ_x , ϵ_y и ϵ_{xy} во времени в безразмерных координатах $t/t_{пр}$, $P/P_{пр}$ для эксперимента на одноосное нагружение образца из искусственного геоматериала

Для компоненты микродеформаций ϵ_{xy} (рис. 7, в) имеются существенные различия по их поведению для областей 1 и 2 (противофазность). Однако по абсолютной величине они уменьшаются по мере нагружения до предела прочности. Сканирующие функции $R_{xy}(t)$ в областях 1 и 2 (рис. 8, в) также имеют колебательный характер, но резко отличаются по своей структуре (амплитудно-периодному спектру) при $t/t_{пр} > 0,4$.

Отмеченные особенности поведения деформационных микрохарактеристик свидетельствуют о том, что наиболее опасным для разрушения является направление «у», здесь наблюдаются более высокие значения микродеформаций ϵ_y и скоростей их изменения. Стабилизация $R_y(t)$ указывает на процесс сужения зоны их локализации. Поэтому можно ожидать, что макроразрушение произойдет по компоненте ϵ_y .

Действительно, на фотографии сканируемой поверхности образца геоматериала (рис. 9) видно, что трещина образовалась преимущественно в направлении «у» по компоненте деформации ε_y при $t/t_{np} = 1,4$.

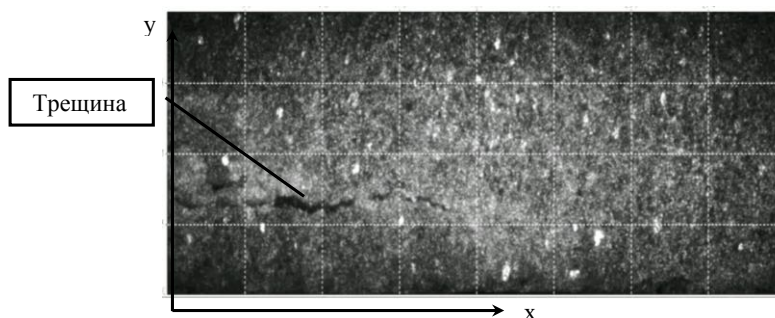


Рис. 9. Фотография поверхности образца из искусственного геоматериала после его разрушения при одноосном сжатии, время эксперимента $t/t_{np}=1,3$

Проведенное экспериментальное исследование на образцах из искусственных геоматериалов при их двухосном и одноосном нагружении позволило определить особенности поведения компонент микродеформаций ε_x , ε_y и ε_{xy} и соответствующих им сканирующих функций $R_x(t)$, $R_y(t)$ и $R_{xy}(t)$ (в продольном, поперечном и сдвиговом направлениях соответственно), что можно использовать как диагностический параметр для определения времени, места расположения и вида участка формирующейся основной трещины макроразрушения.

Отметим, что в работах [3, 15] представлены общие закономерности для процессов локализации деформаций на стадии предразрушения образцов горных пород типов сильвинита, мрамора и песчаника, где активно использовался метод спекл-фотографий. Здесь также особо отмечен автоволновой характер развития пластической деформации при сжатии горных пород. Скорость распространения автоволн оценивается величинами порядка $10^{-5} \div 10^{-4}$ м/с.

Выводы и заключение

Таким образом, выполненный комплекс экспериментальных исследований на образцах из искусственных неоднородных геоматериалов, обладающих структурной неоднородностью в виде включений, позволил детально исследовать особенности распределения и эволюцию их напряженно-деформированного состояния на микроуровне по рабочим поверхностям породных образцов с помощью спекл-метода в процессе одноосного и двухосного нагружения до разрушения.

В рамках экспериментального исследования волновых процессов в блочно-иерархических геосредах (при испытаниях на одноосное и двухосное сжатие призматических образцов геоматериалов) подтвержден ранее обнаруженный эффект возникновения низкочастотных процессов микродеформирования, генерируемых медленными (квазистатическими) силовыми воздействиями.

Для оценки деформационно-волнового поведения геоматериалов внутри образцов горных пород как «суммы» вклада элементов сканируемых поверхностей с разнонаправленными (синфазными и антифазными) колебаниями применен энергетический подход. В основе энергетического подхода общей оценки деформационно-волновых процессов лежит сканирующая функция R , которая является аналогом понятию «центра масс» в классической механике и описывает способ определения приведенного центра сейсмоэнерговыведения за заданный период времени в пределах заданного объема массива горных пород.

Для данных экспериментов координаты R и, соответственно, траектория движения вычисляются по формуле:

$$R = \sum_{i=1}^N r_i \varepsilon_i / \sum_{i=1}^N \varepsilon_i, \quad r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2},$$

где ε_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 .

Определены особенности поведения сканирующих функций для компонент деформаций $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ и ε_{xy} (в продольном, поперечном и сдвиговом направлениях образца геоматериала) соответственно в процессе нагружения до разрушения, что можно использовать как диагностический параметр для определения места расположения участка формирующейся основной трещины макроразрушения.

Данная информация представляет непосредственный практический интерес для их применения в мониторинговых системах геомеханико-геодинамической безопасности горных предприятий на основе комплексного использования сейсмо-деформационной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В.В., Опарин В.Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. 1 // ФТПРПИ. 2012. № 2. С. 3–27.
2. Адушкин В.В., Опарин В.Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. 2 // ФТПРПИ. 2013. № 2. С. 3–46.
3. Зуев Л.Б., Баранникова С.А., Надежкин М.В., Горбатенко В.В. Локализация деформаций и возможность прогнозирования разрушения горных пород // ФТПРПИ. 2014. № 1. С. 49–56.
4. Курленя М.В., Опарин В.Н. О явлении знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия // ФТПРПИ. 1990. № 4.
5. Курленя М.В., Опарин В.Н., Востриков В.И. О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа V_μ // ДАН СССР. 1993. Т. 333, № 4.
6. Курленя М.В., Опарин В.Н., Еременко А.А. Об одном методе сканирования шахтной сейсмологической информации // ДАН. 1993. Т. 333, № 6.
7. Курленя М.В., Опарин В.Н., Ревуженко А.Ф., Шемякин Е.И. О некоторых особенностях реакции горных пород на взрывные воздействия в ближней зоне // ДАН СССР. 1987. Т. 293, № 1.
8. Курленя М.В., Опарин В.Н., Юшкин В.Ф. и др. О некоторых особенностях эволюции гармонических акустических сигналов при нагружении блочных сред с цилиндрической полостью // ФТПРПИ. 1999. № 6.
9. Опарин В.Н. Волны маятникового типа и «геомеханическая температура» // Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах: вторая российско-китайская науч. конф. Новосибирск, ИГД СО РАН, 2012.
10. Опарин В.Н., Симонов Б.Ф. О нелинейных деформационно-волновых в виброволновых геотехнологиях освоения нефтегазовых месторождений // ФТПРПИ. 2010. № 2. С. 3–25.
11. Опарин В.Н., Симонов Б.Ф., Юшкин В.Ф. и др. Геомеханические и технические основы увеличения нефтедобычи пластов в виброволновых технологиях. Новосибирск: Наука, 2010. 404 с.
12. Опарин В.Н., Усольцева О.М., Семенов В.Н., Цой П.А. О некоторых особенностях эволюции напряженно-деформированного состояния образцов горных пород со структурой при одноосном нагружении // ФТПРПИ. 2013. № 5. С. 3–19.
13. Садовский В.М., Садовская О.В., Варыгина М.П. Математическое моделирование волн маятникового типа с применением высокопроизводительных вычислений // Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах: вторая российско-китайская науч. конф. Новосибирск, ИГД СО РАН, 2012.
14. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН СССР. 1979. Т. 247, № 4.
15. 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. С. 3–10.

THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE

Deformation of stressed rocks during earthquakes, rock bursts and explosions

Oparin V.N., Usol'tseva O.M., Semenov V.N., Tsoi P.A.

VICTOR N. OPARIN, Corresponding Member of RAS, Doctor of Physical-Mathematical Sciences, Head of Division (Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk), e-mail: oparin@misd.nsc.ru; OLGA M. USOLTSEVA, e-mail: usoltseva57@mail.ru; Candidate of Physical-Mathematical Sciences, Chief (Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk); VLADIMIR N. SEMENOV, Main Specialist (Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk), e-mail: paveltsoy@mail.ru; PAVEL A. TSOI, Candidate of Physical-Mathematical Sciences, Scientific Associate (Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk), e-mail: paveltsoy@mail.ru

Evolution of stress-strain state in the structural hierarchy of blocks in the geomedia under uniaxial and biaxial loading

Based on the experimental study of the rock samples and artificial geomaterials with the same structure and using the speckle correlation method the article presents a detailed investigation on the peculiarities of the evolution of the stress-strain state at a microlevel. An effect of low-frequency micro-deformation processes under slow (quasi-static) disturbances in the artificial geomaterials has been revealed. The experimental investigation presented in it falls in the physico-mechanical causes of the emergence of the focal areas of seismic catastrophes.

Key words: simulation, rock samples, wave-deformations, speckle-method, source zone, failure.

REFERENCES

1. Adushkin V.V., Oparin V.N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomedia. Part 1. Journal of Mining Sciences. 2012;2:3-27. (in Russ.). [Adushkin V.V., Oparin V.N. Ot javlenija znakoperemenoj reakcii gornyh porod na dinamicheskie vozdejstvija – k volnam majatnikovogo tipa v naprjazhennyh geosredah. Ch. 1 // FTPRPI. 2012. № 2. S. 3–27].
2. Adushkin V.V., Oparin V.N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomedia. Part 2. Journal of Mining Sciences. 2013;2:3-46. (in Russ.). [Adushkin V.V., Oparin V.N. Ot javlenija znakoperemenoj reakcii gornyh porod na dinamicheskie vozdejstvija – k volnam majatnikovogo tipa v naprjazhennyh geosredah. Ch. 2 // FTPRPI. 2013. № 2. S. 3-46].
3. Zuev L.B., Barannikova S.A., Nadezhkin M.V., Gorbatenko V.V. Localization of deformation and prognostibility of rock failure. Journal of Mining Sciences. 2014;1:49-56. (in Russ.). [Zuev L.B., Barannikova S.A., Nadezhkin M.V., Gorbatenko V.V. Lokalizacija deformacij i vozmozhnost' prognozirovaniya razrusheniya gornyh porod // FTPRPI. 2014. № 1. S. 49-56].
4. Kurlenya M.V., Oparin V.N. The phenomenon of alternating reactions of rocks on the dynamic effects. Journal of Mining Sciences. 1990;4. (in Russ.). [Kurlenya M.V., Oparin V.N. O javlenii znakoperemenoj reakcii gornyh porod na dinamicheskie vozdejstvija // FTPRPI. 1990. № 4].
5. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Vostrikov V.I. On the formation of elastic wave packets under pulsed excitation block media. Waves pendulum V_{μ} . Reports of Academy of Sciences. 1993;(333)4. (in Russ.). [Kurlenya M.V., Oparin V.N., Vostrikov V.I. O formirovanii uprugih volnovyh paketov pri impul'snom vozbužhdenii blochnyh sred. Volny majatnikovogo tipa V_{μ} // DAN. 1993. T. 333, № 4].
6. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Eremenko A.A. On a method of scanning mine seismological information // Reports of Academy of Sciences. 1993;(333)6. (in Russ.). [Kurlenya M.V., Oparin V.N., Eremenko A.A. Ob odnom metode skanirovaniya shahtnoj sejsmologicheskoy informacii // DAN. 1993. T. 333, № 6].
7. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Revuzhenko A.F., Shemyakin E.I. On some peculiarities of the reaction of rocks on the explosive impact in the near field. Reports of Academy of Sciences. 1987;(293)1. (in Russ.). [Kurlenya M.V., Oparin V.N., Revuzhenko A.F., Shemyakin E.I. O nekotoryh osobennostjakh reakcii gornyh porod na vzryvnye vozdejstvija v blizhnej zone // DAN SSSR. 1987. T. 293, № 1].

8. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Jushkin V.F. et al. About some of the features of the evolution of harmonic acoustic signals during loading block media with a cylindrical cavity. *Journal of Mining Sciences*. 1999;6. (in Russ.). [Kurlenja M.V., Oparin V.N., Jushkin V.F. i dr. O nekotoryh osobennostjakh jevoljucii garmonicheskikh akusticheskikh signalov pri nagruzhении blochnyh sred s cilindricheskoj polost'ju // FTPRPI. 1999. № 6].
9. Oparin V.N. Pendulum waves and "geomechanical temperature". The Second Russian-Chinese Conference "Nonlinear geomechanics geodynamic when developing mineral deposits at great depths." Collection of papers. Novosibirsk, Russian Academy of Sciences, Institute of Mining, 2012. (in Russ.). [Oparin V.N. Volny majatnikovogo tipa i «geomechanicheskaja temperatura» // 2-a Rossijsko-Kitajskaja nauchnaja konferencija «Nelinejnye geomechaniko-geodinamicheskie processy pri otrabotke mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh na bol'shih glubinah». Sbornik trudov. Novosibirsk, IGD SO RAN, 2012].
10. Oparin V.N., Simonov B.F. Nonlinear deformation-wave processes in the vibrational oil geotechnologies. *Journal of Mining Sciences*. 2010;2:3-25. (in Russ.). [Oparin V.N., Simonov B.F. O nelinejnyh deformacionno-volnovyh v vibrovolnovyh geotekhnologijah osvoenija neftegazovyh mestorozhdenij // FTPRPI. 2010. № 2. S. 3–25].
11. Oparin V.N., Simonov B.F., Jushkin V.F. et al. Geomechanical and technical bases of increasing oil recovery in vibrowave technologies. Novosibirsk, Science, 2010. 404 p. (in Russ.). [Oparin V.N., Simonov B.F., Jushkin V.F. i dr. Geomechanicheskie i tehničeskie osnovy uvelichenija neftedobychi plastov v vibrovolnovyh tehnologijah. Novosibirsk: Nauka, 2010. 404 s.].
12. Oparin V.N., Usol'tseva O.M., Semenov V.N., Tsoi P.A. Evolution of stress-strain state in structured rock specimens under uniaxial loading. *Journal of Mining Sciences*. 2013;5:3-19. (in Russ.). [Oparin V.N., Usol'ceva O.M., Semenov V.N., Coj P.A. O nekotoryh osobennostjakh jevoljucii naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija obrazcov gornyh porod so strukturoj pri odnoosnom nagruzhении // FTPRPI. 2013. № 5. S. 3–19].
13. Sadovski V.M., Sadovskaya O.V., Varygina M.P. Mathematical modeling of waves pendulum using high-performance computing. The Second Russian-Chinese scientific conference "Nonlinear geomechanics geodynamic when developing mineral deposits at great depths". Collection of papers. Novosibirsk, Russian Academy of Sciences, Institute of Mining, 2012. (in Russ.). [Sadovskij V.M., Sadovskaja O.V., Varygina M.P. Matematicheskoe modelirovanie voln majatnikovogo tipa s primeneniem vysokoproizvoditel'nyh vychislenij / 2-a Rossijsko-Kitajskaja nauchnaja konferencija «Nelinejnye geomechaniko-geodinamicheskie processy pri otrabotke mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh na bol'shih glubinah». Sbornik trudov. Novosibirsk, IGD SO RAN, 2012].
14. Sadovski M.A. Natural lumpiness of rocks. *Reports of Academy of Sciences*. 1979;(247)4. (in Russ.). [Sadovskij M.A. Estestvennaja kuskovatost' gornoj porody // DAN SSSR. 1979. T. 247, № 4].
15. Usol'tseva O.M., Nazarova L.A., Tsoi P.A., Nazarov L.A., Semenov V.N. Genesis and evolution of discontinuities in geomaterials. Part I: Theory and laboratory experiment. *Journal of Mining Sciences*. 2013; 1:3-10. (in Russ.). [Usol'ceva O.M., Nazarova L.A., Coj P.A., Nazarov L.A., Semenov V.N. Issledovanie genezisa i jevoljucii narushenij sploshnosti v geomaterialah: teorija i laboratornyj jeksperiment // FTPRPI. 2013. № 1. S. 3–10].