

**Опарин Виктор Николаевич**  
член-корреспондент РАН,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий отделом  
экспериментальной геомеханики,  
Институт горного дела СО РАН,  
630091, Новосибирск, Красный проспект, д. 54,  
e-mail: [oparin@misd.nsc.ru](mailto:oparin@misd.nsc.ru)

**Усольцева Ольга Михайловна**  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт горного дела СО РАН,  
e-mail: [usoltseva57@mail.ru](mailto:usoltseva57@mail.ru)

**Цой Павел Александрович**  
кандидат физико-математических наук,  
научный сотрудник,  
Институт горного дела СО РАН,  
e-mail: [paveltsoy@mail.ru](mailto:paveltsoy@mail.ru)

**Семенов Владимир Николаевич**  
главный специалист,  
Институт горного дела СО РАН,  
e-mail: [centre@misd.nsc.ru](mailto:centre@misd.nsc.ru)

**ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ  
К АНАЛИЗУ СЛОЖНЫХ  
ДЕФОРМАЦИОННО-ВОЛНОВЫХ  
ПРОЦЕССОВ В ГЕОМАТЕРИАЛАХ СО  
СТРУКТУРОЙ ПОД НАГРУЖЕНИЕМ  
ДО РАЗРУШЕНИЯ\***

*Аннотация:*

*Экспериментально на образцах из 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 низкочастотных процессов микро-деформирования при определенном уровне напряжений. Для оценки деформационно-волнового поведения геоматериалов применен энергетический подход, в основе которого лежит сканирующая функция, являющаяся аналогом понятию «центра масс» в классической механике. Развиваемое направление экспериментальных исследований относится к физико-механическим основам формирования очаговых зон катастрофических событий.*

*Ключевые слова:* массив горных пород, блочно-иерархическое строение, лабораторный эксперимент, спекл-метод, микродеформации, деформационно-волновые процессы

**Oparin Victor N.**  
corresponding member of RAS,  
doctor of Physical-Mathematical Sciences,  
head of Division, Institute of Mining SB RAS,  
Novosibirsk, 630091, Krasniy prospect, 54  
e-mail: [oparin@misd.nsc.ru](mailto:oparin@misd.nsc.ru)

**Usoltseva Olga M.**  
candidate of Physical-Mathematical Sciences,  
senior Researcher, Institute of Mining SB RAS  
e-mail: [usoltseva57@mail.ru](mailto:usoltseva57@mail.ru)

**Tsoi Pavel A.**  
candidate of Physical-Mathematical Sciences,  
scientific Associate, Institute of Mining SB RAS  
e-mail: [paveltsoy@mail.ru](mailto:paveltsoy@mail.ru)

**Semenov Vladimir N.**  
Main Specialist, Institute of Mining SB RAS  
e-mail: [centre@misd.nsc.ru](mailto:centre@misd.nsc.ru)

**ENERGY APPROACH TO THE ANALYSIS  
OF COMPLEX DEFORMATION-WAVE  
PROCESSES IN STRUCTURED  
GEOMATERIAL UNDER LOADING  
BEFORE DESTRUCTION**

*Abstract:*

*The aim of this study was to analyze distribution and development of stress–stress state in structured rock specimens subject to uniaxial and biaxial loading to failure using digital speckle correlation method. Within the experimental analysis of wave processes in the block-hierarchy structure of geomedia (uniaxial and biaxial compression and shearing of prismatic geomaterial specimens), the authors revealed the fact of initiation of low-frequency micro-deformation processes under slow (quasi-static) disturbances. The estimation of the deformation-wave behavior of geomaterials as the “summed” contributions made by elements of the scanned surfaces with different-oriented (in-phase and anti-phase) oscillations has been performed using the energy approach that is based on the scanning function R, analogous to the “center of mass” in the classical mechanics.*

*Keywords:* rock mass, hierarchical block structure, laboratory experiment, speckle-method, microstrains, deformation-wave processes

\* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке партнерского интеграционного проекта № 100 СО РАН, проекта ОНЗ РАН №3.1 и гранта РФФИ № 12-05-01057а с использованием оборудования ЦКП ГГИ СО РАН.

В последние годы в связи с активным развитием теории волн маятникового типа в напряженных геосредах блочно-иерархического строения [1 – 4] стало формироваться новое направление исследований, относящееся к очаговым зонам катастрофических событий (землетрясений, горных ударов и др.) – «геомеханическая термодинамика» [5]. В известном смысле это аналог классической термодинамике, 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 [6].

В работах [7, 8] 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) [9]. Эта механическая модель позволила объяснить наблюдаемые в эксперименте [10] 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:*

$$f_i = f_0 (\sqrt{2})^i, \quad i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; \quad f_0 = V_p / (2\Delta), \quad V_p - \text{скорость продольной волны в геоматериалах структурных блоков диаметра } \Delta.$$

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.

1. *Макро- и микродеформационные процессы в образцах искусственных геоматериалов при двухосном нагружении до разрушения.* Ранее в работе [12] 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  $f=0,5\div 4$  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 и 5 % клея “Neolit” по весу; включения представляли собой шарики диаметра 3 – 4 мм из отожженного в несколько этапов диоксида кремния (силикогеля) 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 60×60×11 мм (рис. 1).

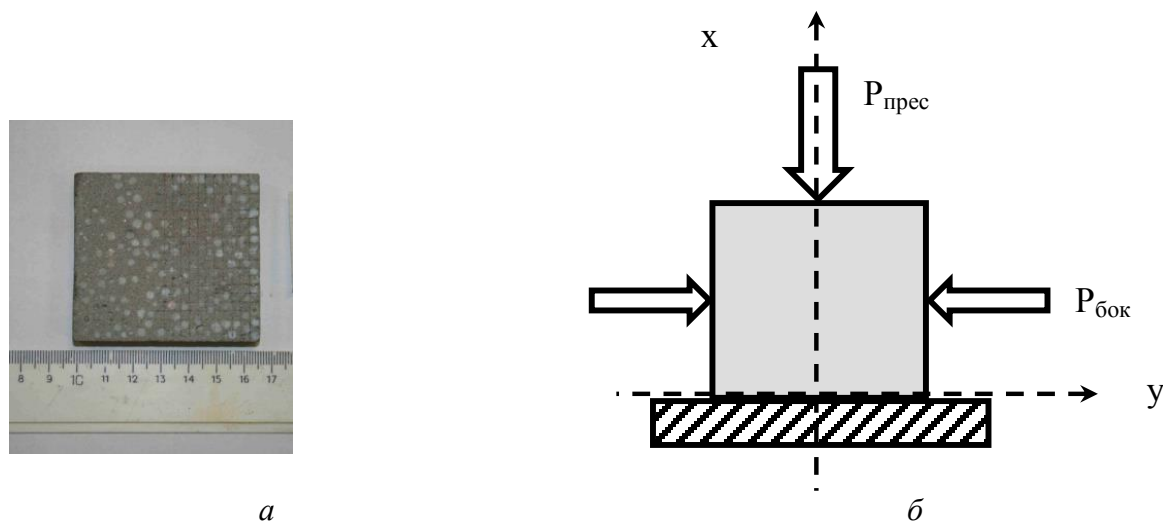


Рис. 1 – Образец искусственного материала для испытаний – а, схема нагружения – б

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 прессы, боковую нагрузку на призматический образец. В эксперименте непрерывно регистрировались и записывались в компьютерный файл усилия бокового поджатия образца, перемещение траверсы прессы и усилие, создаваемое прессом. Максимальное усилие задавалось прессом с фиксированной скоростью перемещения траверсы прессы 1 мм/мин. Для регистрации микродеформаций на рабочей поверхности призматического образца использовалась автоматизированная система анализа цифровых спекл-фотографий AL-MEC-tv [13].

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

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.

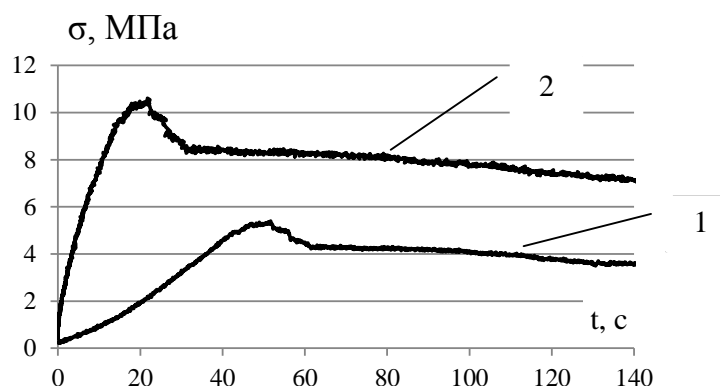


Рис. 2 – Диаграммы напряжение – деформация при одноосном (1) и двухосном сжатии (2); время возникновения трещины  $t = 130$  с при одноосном нагружении,  $t = 140$  с при двухосном нагружении

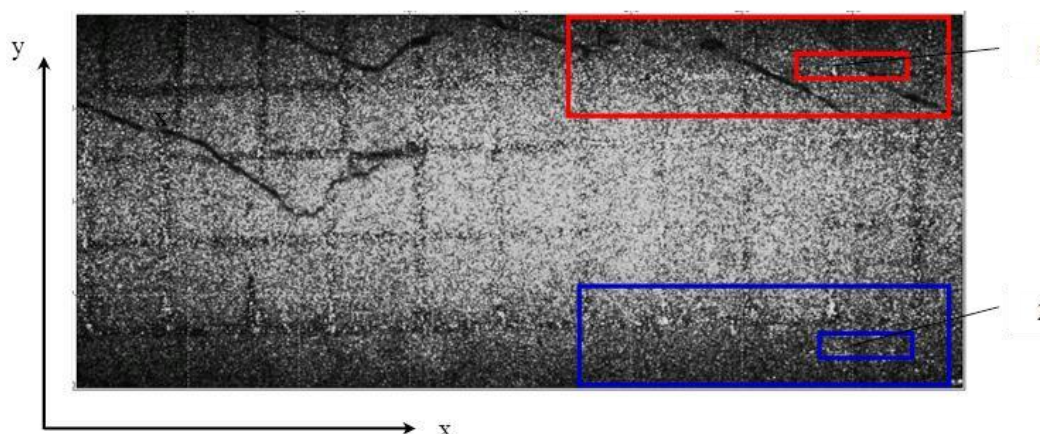


Рис. 3 – Сканируемая поверхность образца в эксперименте на двухосное сжатие после разрушения (момент времени  $t = 140$  с):  
1 – области поверхности с возникшими впоследствии разрушениями,  
2 – области неразрушенного материала

Размер области наблюдения спекл-методом составлял  $35 \times 15$  мм. На рабочей поверхности породного образца выделялись прямоугольные участки (см. рис. 3), составляющие от  $1/4$  до  $1/8$  площади области сканирования, для которых рассчитывались суммарные значения компонент микродеформаций в продольном ( $x$ ), поперечном ( $y$ ) и сдвиговом ( $xy$ ) направлениях –  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  и  $\varepsilon_{xy}$ , соответственно. На рис. 4 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  $P/P_{пр}$  и  $t/t_{пр}$ , где  $t/t_{пр}=1$  отвечает пиковой нагрузке ( $P/P_{пр} = 1$ ).

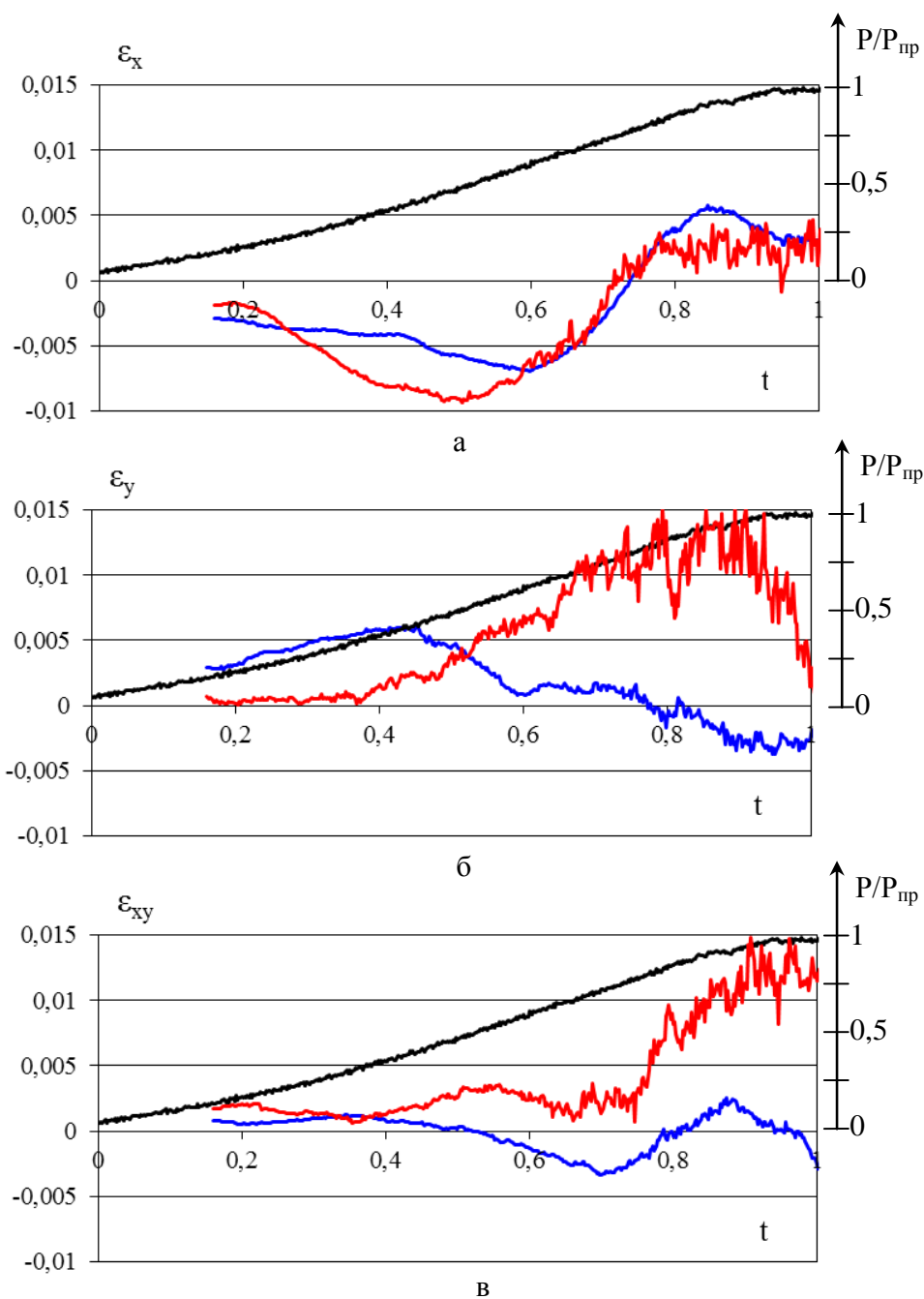


Рис. 4 – Зависимости микродеформаций  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  и  $\varepsilon_{xy}$  во времени в безразмерных координатах  $t/t_{пр}$ ,  $P/P_{пр}$  для эксперимента на двухосное нагружение образца из искусственного геоматериала: красная линия – область 1 (будущего разрушения); синяя линия – область 2 (неразрушенного материала)

На приведенных графиках можно отметить следующие особенности в поведении компонент микродеформаций:

- микродеформации  $\varepsilon_x$  в областях 1 и 2 имеют практически одинаковые значения вплоть до достижения предела прочности;
- микродеформации  $\varepsilon_y$  в областях 1 и 2 изменяются практически в противофазе, особенно от значений  $t/t_{пр} = 0,5$ , и имеют значительные различия по величине;
- зависимости микродеформаций  $\varepsilon_{xy}$  в областях 1 и 2, начиная от  $t/t_{пр} = 0,4$ , ведут себя существенно синфазно. Однако различие в их абсолютных значениях увеличивается до предела прочности: при  $P/P_{пр} = 1$  в области 2  $\varepsilon_{xy} = -0,1$ , а в области 1  $\varepsilon_{xy} = 0,5$ ;
- при значениях  $t/t_{пр} \in 0,5 \div 0,6$  по всем компонентам деформаций возникают высокочастотные колебания, которые в области разрушения 2 имеют значительно более высокую амплитуду, чем в области 1.

Для оценки деформационно-волнового поведения геоматериалов внутри искусственных образцов в виде «суммы» вклада элементов сканируемых поверхностей с разнонаправленными (синфазными и антифазными) колебаниями, как и в работе [12], нами применен энергетический подход. В основе такого подхода для общей оценки деформационно-волновых процессов лежит сканирующая функция  $R$ , которая, являясь аналогом понятию «центра масс» в классической механике, 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:

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

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

где  $\varepsilon_i$  – деформация в точке  $r_i$ ;

$x_0, y_0$  – 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 приведены полученные в результате графики сканирующих функций  $R_x(t)$ ,  $R_y(t)$  и  $R_{xy}(t)$  по (1) отдельно по каждой из компонент деформаций ( $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_{xy}$ ), соответственно, в процессе нагружения породного образца до предела прочности включительно в безразмерных координатах  $P/P_{пр}$  и  $t/t_{пр}$ , где  $t_{пр}$  отвечает пиковой нагрузке ( $P/P_{пр} = 1$ ). В расчетах использовались безразмерные координаты  $[r_i / r_{max} \in (-0,5 \div 0,5)]$ , где  $r_{max}$  – максимальный размер  $r_i$  в продольном направлении образца. Из приведенных графиков можно 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  $t/t_{пр} = 0,65$  практически не изменяет свое начальное значение. Однако при  $t/t_{пр} = 0,65 \div 0,70$  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  $t/t_{пр} = 0,19 \div 0,4$ , после чего принимает постоянное значение; а для области 2 колебательные изменения  $R_y(t)$  возникают при  $t/t_{пр} = 0,60 \div 0,87$ , с последующим убыванием;
- функция  $R_{xy}(t)$  в области 1 сохраняет практически постоянные значения, за исключением интервала  $t/t_{пр} = 0,60 \div 0,73$ ; в области 2 она имеет колебательный характер с возрастающей амплитудой до предела прочности.



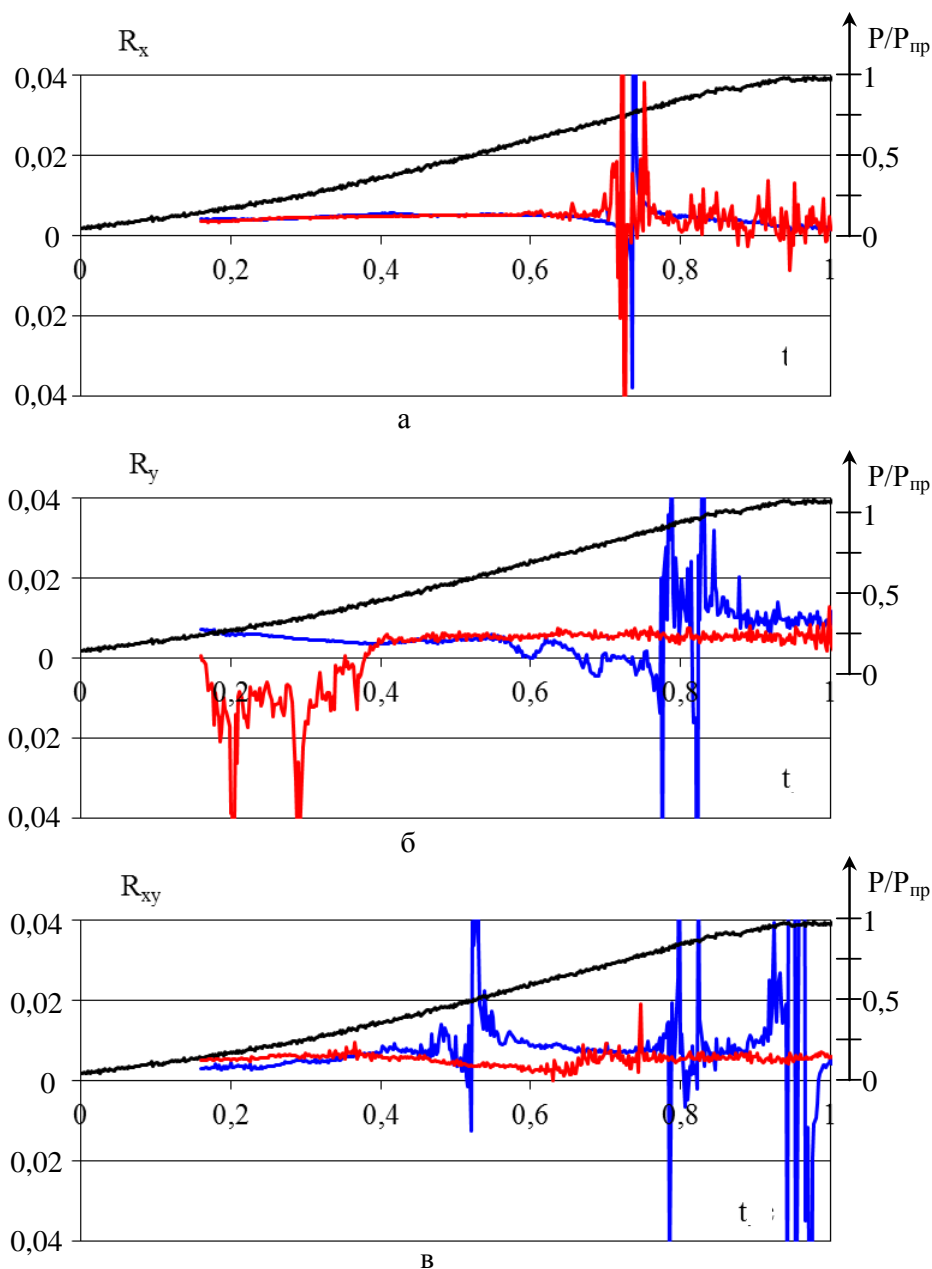


Рис. 5 – Поведение компонент сканирующей функции  $R_x(t)$ ,  $R_y(t)$  и  $R_{xy}(t)$  для микродеформаций  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  и  $\varepsilon_{xy}$  во времени в безразмерных координатах  $t/t_{пр}$ ,  $P/P_{пр}$  для эксперимента на двухосное нагружение образца из искусственного геоматериала:  
красная линия – область 1 (будущего разрушения);  
синяя линия – область 2 (неразрушенного материала)

На основании анализа поведения функций  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_{xy}$ ,  $R_x(t)$ ,  $R_y(t)$  и  $R_{xy}(t)$  можно отметить следующие признаки, предшествующие разрушению образца геоматериала:

- компоненты одноименной деформации в области с разрушением и без него существенно отличаются по своим значениям (для данного эксперимента – это микродеформации  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_{xy}$ );
- амплитуда колебаний компонент деформации в области разрушения значительно превышает аналогичную в неразрушенной области, что свидетельствует о более высокой скорости деформации и изменения вида деформированного состояния в будущей области разрушения (это наблюдается также для микродеформаций  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_{xy}$ );

– сканирующие функции  $R(1)$  имеют колебательный характер, что свидетельствует о неоднородности внутреннего деформированного состояния геоматериала, однако по мере достижения пиковой нагрузки ( $t/t_{пр}=1$ ) и далее перед началом образования трещины ( $t/t_{пр}=1,5$ ) они принимают постоянное значение (это ее компоненты  $R_y(t)$ ,  $R_{xy}(t)$ ). Такой характер поведения компонент сканирующей функции  $R_y(t)$ ,  $R_{xy}(t)$  в сочетании с возрастающими значениями соответствующих компонент микродеформаций  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_{xy}$  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 в основном деформации  $\varepsilon_y$  и  $\varepsilon_{xy}$ . Причем по этим характеристикам диагностируется вполне определенная область образования будущего макроразрушения. На рис. 6 приведена фотография поверхности образца геоматериала, который был разрушен на «запредельном» участке нагружения – при  $t/t_{пр}=1,3$ . Образовавшаяся трещина скола имеет сложную ступенчатую поверхность и образует углы  $20 - 40^\circ$  с направлением «х» действия осевой силы, составляя комбинацию из микротрещин в направлениях деформаций  $\varepsilon_y$  и  $\varepsilon_{xy}$ .

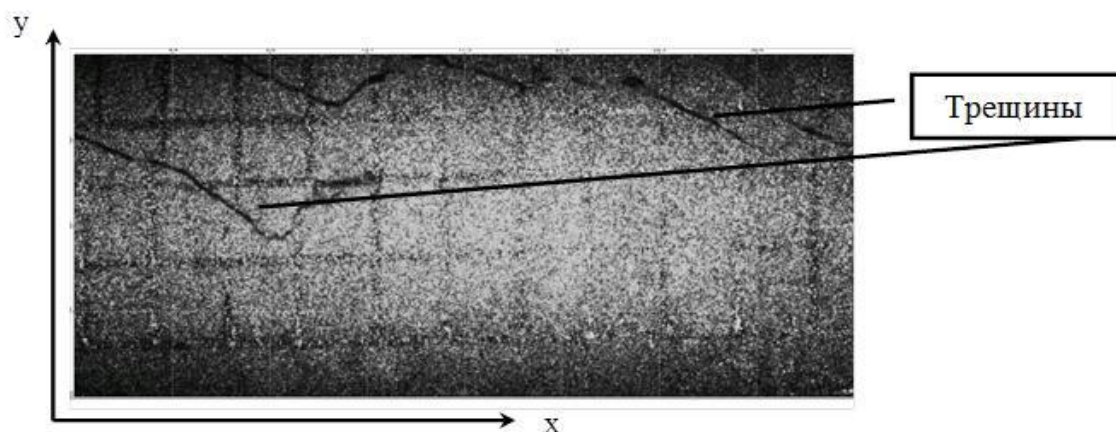


Рис. 6 – Фотография поверхности образца искусственного материала после его разрушения при двухосном сжатии, время нагружения  $t/t_{пр}=1,3$

2. *Испытание образца из искусственного геоматериала при одноосном нагружении до разрушения.* Для сравнения результатов рассмотренного выше случая проведен эксперимент на одноосное сжатие образца из искусственного геоматериала. На основании отмеченных признаков (критериев) также попытаемся по характеру изменения во времени компонент микродеформации  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  и  $\varepsilon_{xy}$ , а также компонент сканирующей функции  $R(1) - R_x(t)$ ,  $R_y(t)$  и  $R_{xy}(t)$  оценить вид будущего разрушения.

Для данного вида нагружения образца из искусственного геоматериала графики изменения компоненты микродеформации  $\varepsilon_x$  в областях 1 и 2 сканируемой поверхности образца (рис. 7, а) практически совпадают между собой в пределах погрешности эксперимента. Соответствующая им компонента сканирующей функции  $R_x(t)$  для областей поверхности 1 и 2 (рис. 8, а) также изменяется подобным образом и совпадает для сравниваемых областей до значений  $t/t_{пр}=0,8$ ; далее появляются высокочастотные колебания деформаций вплоть до предела прочности  $t/t_{пр}=1$ .

Весьма контрастно для сравниваемых областей 1 и 2 отличается поведение компонент микродеформаций  $\varepsilon_y$  (см. 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 высокочастотных колебаний  $\varepsilon_y$  существенно выше, чем у компонент  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_{xy}$ .



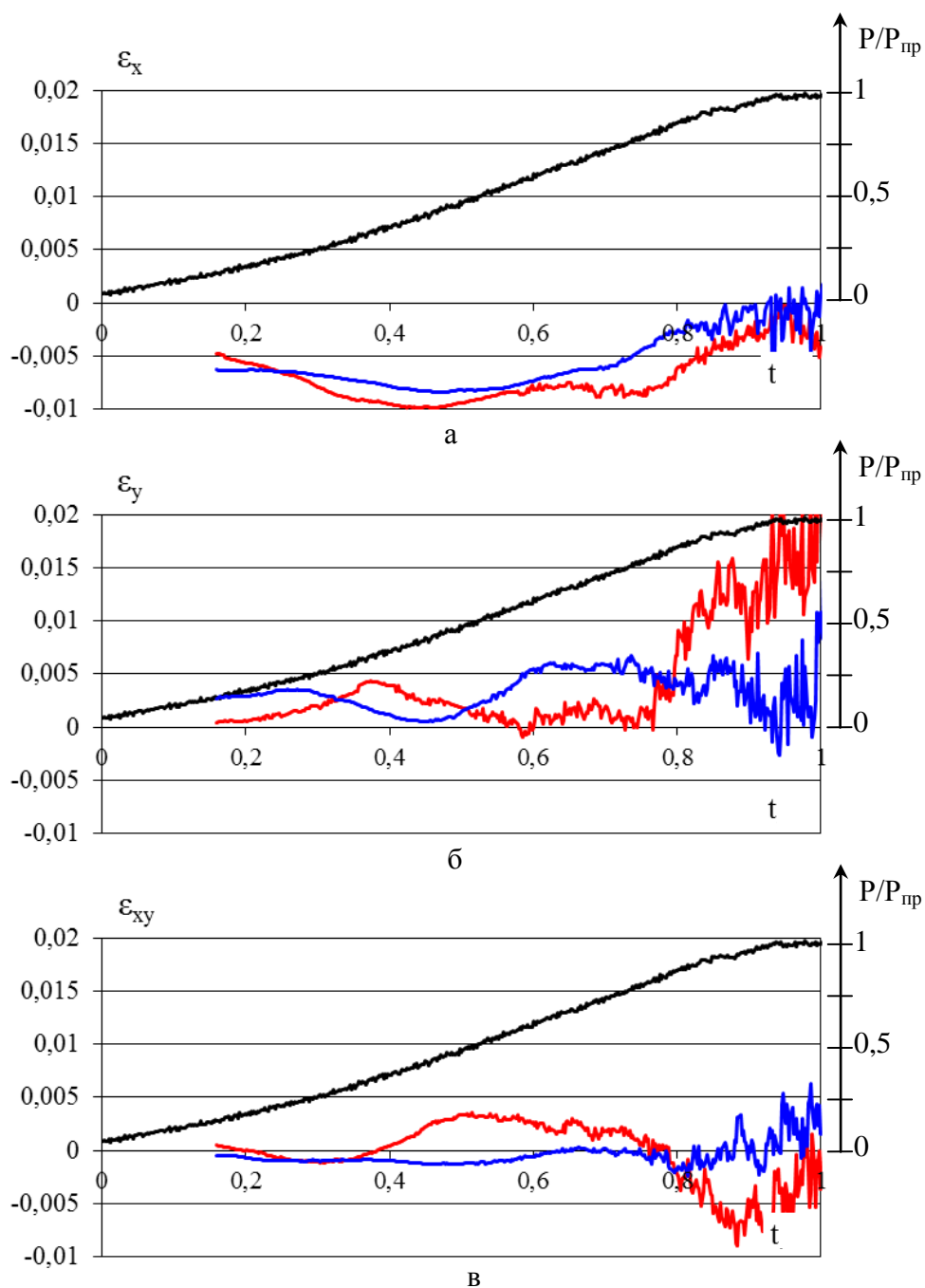


Рис. 7 – Зависимости микродеформаций  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  и  $\varepsilon_{xy}$  во времени в безразмерных координатах  $t/t_{пр}$ ,  $P/P_{пр}$  для эксперимента на двухосное нагружение образца из искусственного геоматериала: красная линия – область 1 (будущего разрушения); синяя линия – область 2 (неразрушенного материала)

По функции  $R_y(t)$  в области 2 (см. рис. 8, б) наблюдаются высокочастотные колебания вплоть до предела прочности, в то время для области 1 при значениях  $t/t_{пр}=0,8 \div 1$  она принимает постоянное значение.

Для компоненты микродеформаций  $\varepsilon_{xy}$  (см. рис. 7, в) имеются существенные различия в ее поведении для областей 1 и 2 (противофазность). Однако по абсолютной величине они уменьшаются по мере нагружения до предела прочности. Компонента сканирующей функции  $R_{xy}(t)$  в областях 1 и 2 (см. рис. 8, в) также имеет колебательный характер, но ее значения для сравниваемых областей резко отличаются по своей структуре (амплитудно-периодному спектру) при  $t/t_{пр} > 0,4$ .

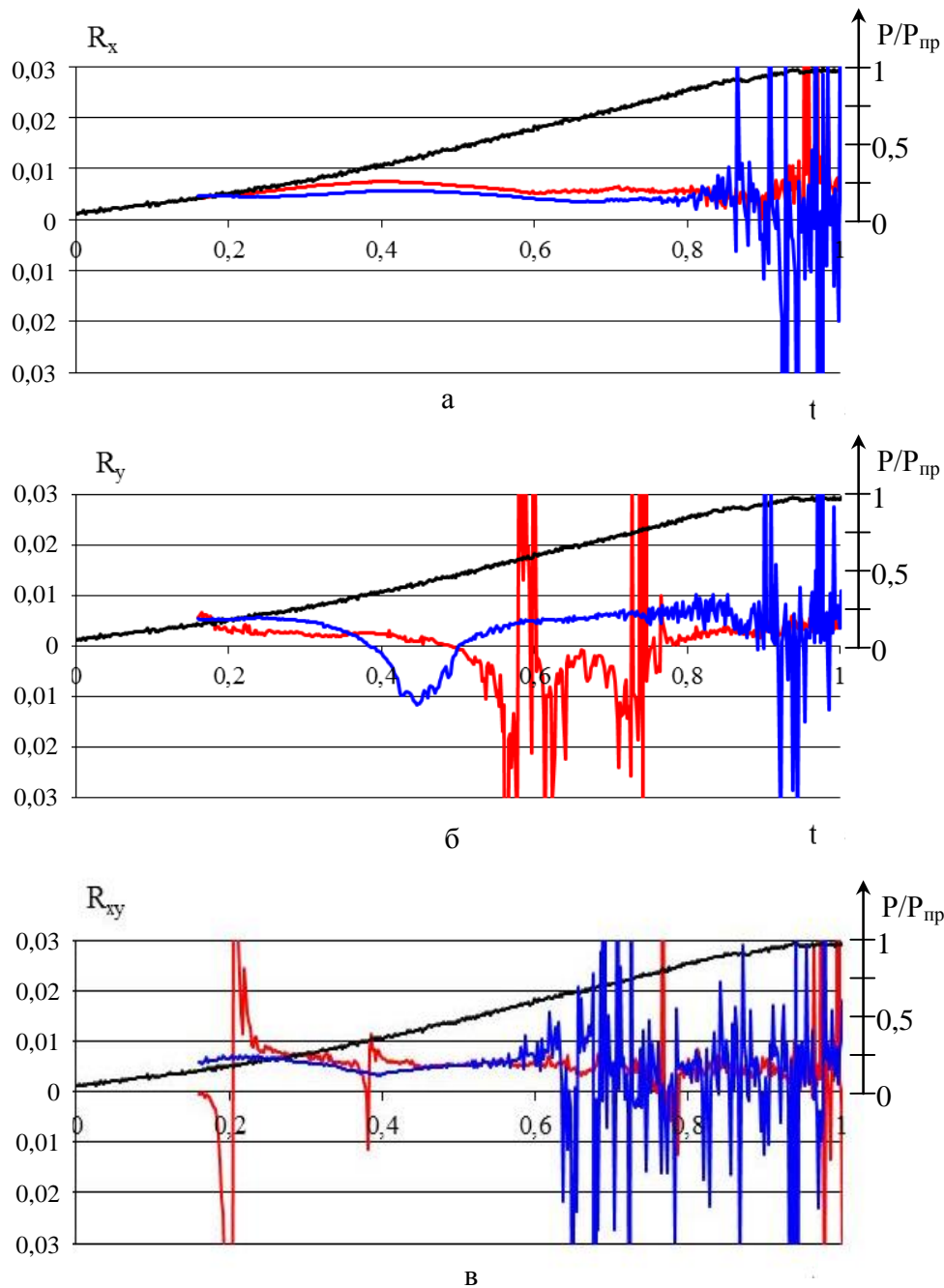


Рис. 8 – Поведение компонент сканирующей функции  $R_x(t)$ ,  $R_y(t)$  и  $R_{xy}(t)$  для микродеформаций  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  и  $\varepsilon_{xy}$  во времени в безразмерных координатах  $t/t_{пр}$ ,  $P/P_{пр}$  для эксперимента на двухосное нагружение образца из искусственного геоматериала:  
 красная линия – область 1 (будущего разрушения);  
 синяя линия – область 2 (неразрушенного материала)

Отмеченные особенности поведения деформационных микрохарактеристик свидетельствуют о том, что наиболее «опасным» по разрушению является направление  $y$  – вдоль него наблюдаются более высокие значения микродеформаций  $\varepsilon_y$  и скоростей их изменения. Стабилизация компоненты  $R_y(t)$  указывает на процесс сужения зоны их локализации. Поэтому можно ожидать, что макроразрушение обуславливает компонента  $\varepsilon_y$ . Действительно, на фотографии сканируемой поверхности образца геоматериала (рис. 9) видно, что трещина образовалась преимущественно в направлении  $y$  по компоненте деформации  $\varepsilon_y$  при  $t/t_{пр} = 1,3$ .

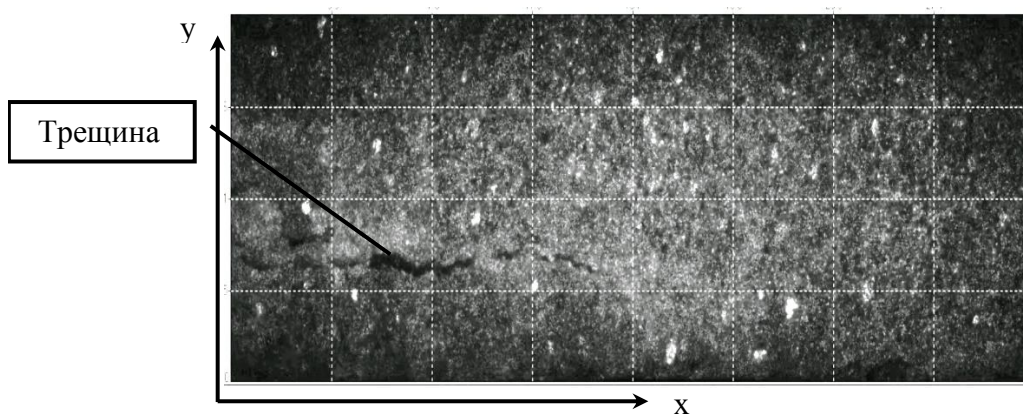


Рис. 9 – Фотография поверхности образца из искусственного геоматериала после его разрушения при одноосном сжатии, время эксперимента  $t/t_{пр}=1,3$

Выполненное экспериментальное исследование на образцах из искусственных геоматериалов при их двухосном и одноосном нагружении позволило установить особенности в поведении компонент микродеформаций  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  и  $\varepsilon_{xy}$  и соответствующих им компонент сканирующей функции (1) –  $R_x(t)$ ,  $R_y(t)$  и  $R_{xy}(t)$  (в продольном, поперечном и сдвиговом направлениях, соответственно). Отмеченные особенности можно использовать как диагностические параметры для определения времени, места расположения и вида участка формирующейся основной трещины макроразрушения (либо зоны трещиноватости).

Отметим, что в работах [14, 15] представлены общие закономерности для процессов локализации деформаций на стадии предразрушения образцов горных пород типа сильвинита, мрамора и песчаника, где активно использовался метод спекл-фотографий. Здесь также особо отмечен «автоволновой» характер развития пластической деформации при сжатии горных пород, а скорость распространения «автоволн» оценивается величинами порядка  $10^{-5} \div 10^{-4}$  м/с.

3. *Энергетические особенности накопления упругих деформаций и развития деформационных процессов.* Для оценки общих особенностей накопления упругой энергии деформации и развития деформационных процессов внутри нагружаемых образцов горных пород применена сканирующая функция  $R_E$ .

$$R_E = \sum_{i=1}^N r_i E_i / \sum_{i=1}^N E_i, \quad E_i = \varepsilon_{xi} \sigma_x + \varepsilon_{yi} \sigma_y, \quad r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}, \quad (3)$$

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  $P$ ;

$\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – главные компоненты напряжения в направлении максимальной нагрузки и боковом, соответственно, которые считаются постоянными для любого значения  $r_i$  в каждый отдельный момент времени.

На рис. 10 приведены значения функции  $R_E$ , определенные при одноосном и двухосном нагружении: красная линия – область 1 (будущего разрушения); синяя линия – область 2 (неразрушенного материала).

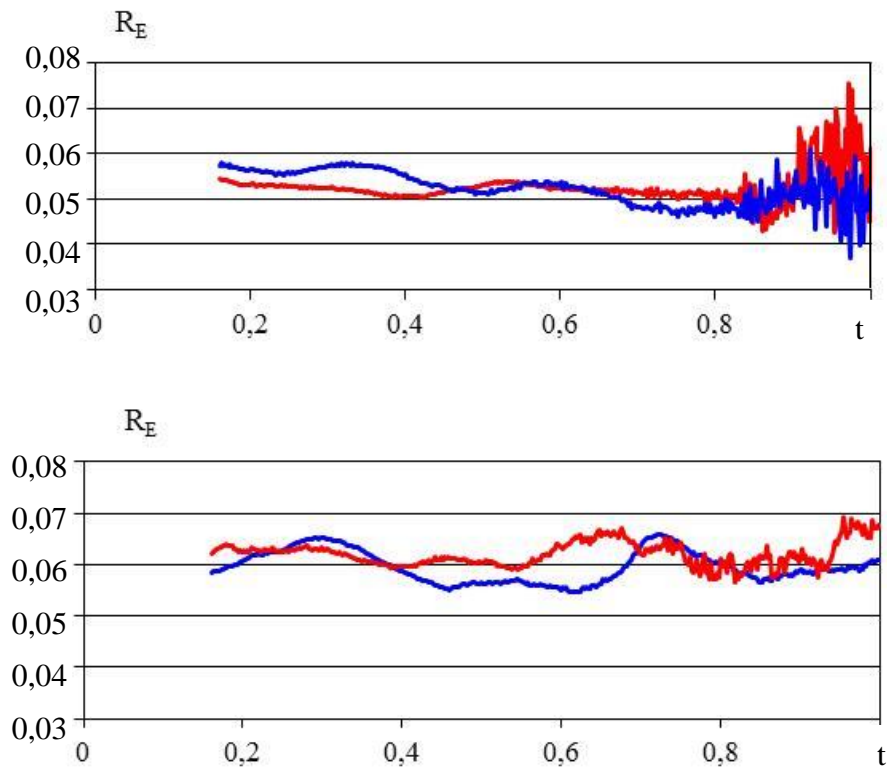


Рис. 10 – Поведение сканирующих функций  $R_E(t)$  времени в безразмерных координатах  $t/t_{пр}$ ,  $P/P_{пр}$  для эксперимента на одноосное (а) двухосное (б) нагружение образца из искусственного геоматериала:  
красная линия – область 1 (будущего разрушения);  
синяя линия – область 2 (неразрушенного материала)

Общий анализ структуры приведенных здесь графиков позволяет отметить:

- как при одноосном, так и при двухосном нагружении образцов геоматериалов значения функции  $R_E$  имеют колебательный характер от момента  $t/t_{пр} = 0,2$  и до  $t = 1$ , причем колебания в выделенных областях 1 и 2 происходят практически в противофазе;
- при одноосном сжатии для значений  $t/t_{пр} = 0,75 \div 0,80$  появляются более высокочастотные колебания и сохраняются до  $t/t_{пр} = 1$ ;
- при двухосном сжатии высокочастотные колебания появляются при значениях  $t/t_{пр} = 0,75 \div 0,80$  и сохраняются до  $t/t_{пр} = 1$  только в зоне 1 с будущим разрушением, в зоне 2 неразрушенного материала такие колебания имеют существенно более низкую амплитуду;
- амплитуды высокочастотных колебаний сканирующих функций  $R_E$  при одноосном сжатии превышают аналогичные при двухосном сжатии, что логично связывается со стесненными условиями деформирования образца геоматериала в поперечном направлении при соответствующем виде испытания;
- при одноосном сжатии не наблюдаются существенные различия по амплитуде сканирующих функций в областях 1 и 2 для  $t/t_{пр} > 0,85 \div 0,90$ .

Выше были определены признаки формирования зоны разрушения: 1 – более высокие значения компоненты микродеформации и скорости ее изменения, чем в зоне неразрушенного материала; 2 – стабилизация значений сканирующей функции, соответствующей данной компоненте микродеформации. В случае одноосного сжатия макроразрушение произошло по компоненте  $\varepsilon_y$ . Но именно она не была учтена в формуле (2) при вычислении функции  $R_E$ , так как напряжение  $\sigma_2 = 0$ .

Кроме того надо отметить, что как при одноосном, так и при двухосном нагружении образца геоматериала поле микродеформаций было существенно неоднородным, компоненты микродеформации  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_{xy}$  в отдельных малых фрагментах (0,5 – 1 мм) сканируемой поверхности принимали как положительные, так и отрицательные значения. При вычислении в (1) сканирующих функций  $R_x(t)$ ,  $R_y(t)$ ,  $R_{xy}(t)$  знаки компонент микродеформаций были учтены, тогда как в (2) при расчете  $R_E$  все значения  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  считались положительными. Можно заключить, что сканирующие функции  $R_x(t)$ ,  $R_y(t)$ ,  $R_{xy}(t)$ , вычисленные по компонентам микродеформаций  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_{xy}$ , более тонко учитывают изменение микродеформированного состояния в точках сканируемой поверхности.

#### *Выводы и заключение*

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 известный способ определения приведенного центра сейсмозонного выделения за заданный период времени в пределах заданного объема массива горных пород.

Определены особенности поведения сканирующих функций для компонент деформаций  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  и  $\varepsilon_{xy}$  (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 ее применения в новых мониторинговых системах геомеханико-геодинамической безопасности горных предприятий на основе комплексного использования сейсмо-деформационной информации.

## Литература

1. Адушкин В.В. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. I / В.В. Адушкин, В.Н. Опарин // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 2. – С. 3 – 27.
2. Адушкин В.В. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. II / В.В. Адушкин, В.Н. Опарин // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 2. – С. 3 – 46.
3. Опарин В. Н. О нелинейных деформационно-волновых в виброволновых геотехнологиях освоения нефтегазовых месторождений / В.Н. Опарин, Б.Ф. Симонов // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – № 2. – С. 3 – 25.
4. Садовский В.М. Математическое моделирование волн маятникового типа с применением высокопроизводительных вычислений / В.М. Садовский, О.В. Садовская, М.П. Варыгина // Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах: 2-я Российско-Китайская научная конференция: сборник трудов. – Новосибирск, ИГД СО РАН, 2012.
5. Опарин В.Н. Волны маятникового типа и «геомеханическая температура» / В.Н. Опарин // Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах: 2-я Российско-Китайская научная конференция: сборник трудов. – Новосибирск, ИГД СО РАН, 2012.
6. Курленя М.В. О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа  $V_{\mu}$  / В.Н. Опарин, В.И. Востриков // ДАН. – 1993. – т. 333, № 4.
7. Курленя М.В. О явлении знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия / М.В. Курленя, В.Н. Опарин // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 1990. – № 4. – С. 3 – 13.
8. О некоторых особенностях реакции горных пород на взрывные воздействия в ближней зоне / М.В. Курленя, В.Н. Опарин, А.Ф. Ревуженко, Е.И. Шемякин // ДАН. – 1987. – т. 293, № 1.
9. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы / М.А. Садовский // ДАН. – 1979. – т. 247, № 4.
10. О некоторых особенностях эволюции гармонических акустических сигналов при нагружении блочных сред с цилиндрической полостью / М.В. Курленя и др. // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 1999. – № 6. – С. 10 – 32.
11. Геомеханические и технические основы увеличения нефтедобычи пластов в виброволновых технологиях / В.Н. Опарин и др. – Новосибирск: Наука, 2010.
12. 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 // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 5. – С. 3-19.
13. Курленя М.В. Об одном методе сканирования шахтной сейсмологической информации / М.В. Курленя, В.Н. Опарин, А.А. Еременко // ДАН. – 1993. – т. 333, № 6.
14. Исследование генезиса и эволюции нарушений сплошности в геоматериалах: теория и лабораторный эксперимент / О.М. Усольцева и др. // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 1. – С. 3-10.
15. Локализация деформаций и возможность прогнозирования разрушения горных пород / Л.Б. Зуев, С.А. Баранникова, М.В. Надежкин, В.В. Горбатенко // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 1. – С. 49 – 56.