

УДК 551.435.626

**ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД  
И ГЕОМАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ РАЗРУШЕНИИ**

**В. В. Середин, А. С. Хрулев**

*Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
E-mail: nedra@nedra.perm.ru, ул. Букирева 15, 614990, г. Пермь, Россия*

При нагружении горных пород вокруг дефектов возникают концентрации напряжений, которые вызывают рост и распространение трещин. С физической точки зрения внешние нагрузки на горную породу проявляются в ней в виде акустической эмиссии и электромагнитных излучений, в том числе и инфракрасных. Экспериментально установлено, что в условиях одноосного растяжения образцов геоматериалов наблюдаются минимальные значения температуры, в условиях одноосного сжатия температура увеличивается, а в объемном напряженном состоянии принимает максимальные значения. Получены уравнения, позволяющие прогнозировать температуру материала в зоне магистральной трещины разрушения в зависимости от разрушающей нагрузки. Разработан способ оценки напряженного состояния материалов по данным инфракрасного излучения.

*Напряжения в грунтах, трещина разрушения, температура, одноосное сжатие и растяжение*

При нагружении горных пород вокруг дефектов возникают концентрации напряжений, которые вызывают рост и распространение трещин. Этот процесс приводит к формированию магистральной трещины разрушения горных пород [1].

В работе [1] выдвинута гипотеза, что разрушение горных пород протекает в два этапа: первоначально формируется магистральная трещина разрыва, затем происходит сдвиг горной породы по этой трещине. В зависимости от приложенных напряжений в зоне разрушения протекают процессы микродеформирования между структурными отдельностями [2], формируется определенная морфология поверхности трещин [1], появляется песок трения, материал изменяет свое фазовое состояние, меняется минеральный состав материнской породы, появляются новые минералы [3, 4]. С физической точки зрения внешние напряжения (нагрузки) на горную породу проявляются в ней в виде акустических эмиссий [5, 6], электромагнитных излучений [7], в том числе и инфракрасных [8].

В работе [9] изучено изменение мощности инфракрасного излучения с поверхности образцов горных пород при нагружении в условиях одноосного сжатия. На основании исследований [2, 7, 10] предложены методы определения напряженного состояния горных пород и других материалов по данным инфракрасного излучения. В [8] приведены данные по изменению температуры пород на поверхности образцов в условиях одноосного растяжения и сжатия. Однако экспериментальной информации об изменении температуры пород при всестороннем сжатии материала недостаточно. Цель данной работы — изучение закономерностей изменения температуры горной породы в зоне магистральной трещины разрушения в условиях объемного на-

пряженного состояния, а также разработка метода оценки напряженного состояния материалов. Настоящая работа является продолжением начатых ранее исследований в зоне магистральной трещины разрушения материалов [1, 8, 11, 12].

#### МЕТОДИКА

Объекты исследования — гипс и цемент марок М400 и М100. Из данных геоматериалов изготавливались образцы путем формовки гипсовой и цементной паст с последующей сушкой. Для исследования в условиях одноосных сжатия и растяжения использовались образцы цилиндрической формы диаметром 39–40 мм и высотой 72–80 мм. Изучение горных пород в условиях объемного напряженного состояния проводилось на прямоугольных образцах размерами 40×40×80 мм.

Образцы на одноосные сжатие ( $\sigma_c$ ) и растяжение ( $\sigma_p$ ) испытывались по методике [8]. Для исследования материалов в объемном напряженном состоянии разработан и изготовлен механический стабилометр, позволяющий проводить испытания материалов в условиях  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 = 0$ . Образец прямоугольной формы помещался в стабилометр, боковые напряжения  $\sigma_2$  подавались на образец механическим способом через металлические пластины (рис. 1). Нагрузка фиксировалась динамометром ДОСМ-3-5, который размещался между нагрузочным устройством и металлическими пластинами. Исследования проводили при  $\sigma_2 = 3.2 - 3.4$  МПа. При этом одна сторона образца оставалась свободной, т. е.  $\sigma_3 = 0$ , и с ее поверхности снималась температура до и в процессе испытаний. Вертикальное нагружение (напряжения  $\sigma_1$ ) образца до разрушения осуществлялось прессом по методике [8].

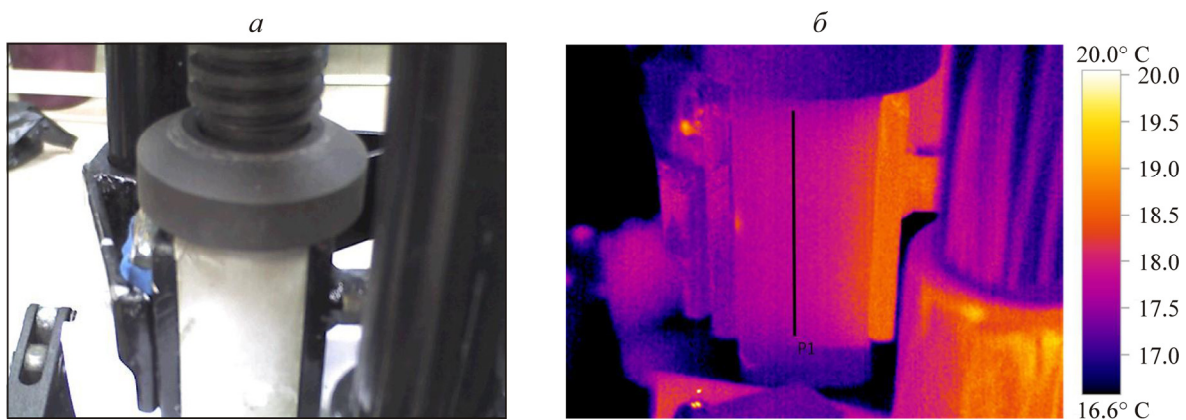


Рис. 1. Испытание образца цемента М400 в объемном напряженном состоянии (а) и термографическое обследование (б)

Для регистрации температуры пород при ее сжатии, растяжении и в объемном напряженном состоянии использовался прибор Testo 882. Обработка термограмм выполнялась с помощью программы IRSoft. Файл тепловизора сохранял два изображения: саму термограмму и фотографию разрушения образца породы (см. рис. 1). В программе проводился детальный анализ объекта съемки с указанием места разрушения и определением температур материала до ( $t_1$ ) и во время ( $t_2$ ) приложения нагрузки. Затем определялся показатель  $\Delta t$  как разница средних температур до и после опытов образца материала в зоне магистральной трещины разрушения и  $\Delta t_{\max}$  как разница температур до опытов (средняя) и самой “горячей” точки во время опытов образца материала. Точность измерений температуры образцов составляла  $0.1^\circ\text{C}$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

В табл. 1 приведены результаты первичной обработки экспериментальных данных. Видно, что для всех исследуемых материалов значение  $\Delta t$  максимально при испытаниях образцов в условиях объемного напряженного состояния, при одноосном сжатии  $\Delta t$  принимает меньшие значения, а при растяжении  $\Delta t$  — минимальные. Так, для гипса температура на поверхности образца при испытаниях его в условиях объемного напряженного состояния увеличилась на  $1.0^\circ$  по сравнению с начальной температурой образца, в условиях одноосного сжатия — на  $0.8^\circ$ , а при растяжении — на  $0.2^\circ$ .

ТАБЛИЦА 1. Изменение температуры в зоне трещины разрушения материалов

Материал	Объемное напряженное состояние						Одноосное сжатие						Одноосное растяжение					
	$\sigma_1$ , МПа		$\Delta t$ , град		$\Delta t_{\max}$ , град		$\sigma_c$ , МПа		$\Delta t$ , град		$\Delta t_{\max}$ , град		$\sigma_p$ , МПа		$\Delta t$ , град		$\Delta t_{\max}$ , град	
	$\bar{\sigma}_1$	$V$	$\bar{\Delta t}$	$V$	$\bar{\Delta t}_{\max}$	$V$	$\sigma_c$	$V$	$\bar{\Delta t}$	$V$	$\bar{\Delta t}_{\max}$	$V$	$\bar{\sigma}_p$	$V$	$\bar{\Delta t}$	$V$	$\bar{\Delta t}_{\max}$	$V$
Цемент М400	30.3	4	1.4	39	2.8	45	25.6	8	0.8	47	5.4	77	0.21	14	0.5	49	0.8	76
Гипс	21.6	3	1.0	19	3.9	34	13.6	21	0.8	45	3.4	34	0.14	7	0.2	72	0.2	39
Цемент М100	8.6	12	0.8	22	4.2	35	5.8	25	0.6	42	1.8	51	0.04	15	0.1	65	0.2	52

Примечание:  $V$  — коэффициент вариации;  $\bar{\sigma}_1$  — среднее значение показателя

Следует отметить, что на формирование температурного режима в зоне разрушения материала оказывает влияние минеральный и гранулометрический состав, вид и прочность структурных связей, пористость, плотность и др. В качестве обобщающего критерия, учитывающего состав и состояние геоматериала, использовалась его прочность. Экспериментально установлено (табл. 1), что с увеличением прочности образцов в условиях объемного напряженного состояния температура геоматериала в зоне разрушения возрастает. В образцах, сложенных гипсом, при средней прочности  $\sigma_1 = 20.6$  МПа температура геоматериала  $\Delta t$  в зоне разрушения составляет  $1.0^\circ\text{C}$ . При увеличении прочности образцов до 30.3 МПа (цемент М400) температура увеличивается в 1.4 раза и составляет  $\Delta t = 1.4^\circ\text{C}$ .

В условиях одноосного растяжения наблюдается аналогичная закономерность: с увеличением прочности геоматериала температура в зоне разрушения возрастает. Например, при средней прочности на растяжения образцов цемента М400  $\sigma_p = 0.21$  МПа температура геоматериала составляет  $\Delta t = 0.5^\circ\text{C}$ , при уменьшении прочности до 0.14 МПа (гипс) она уменьшается в 2.5 раза до  $\Delta t = 0.2^\circ\text{C}$ .

Изучение влияния вида напряженного состояния на температуру материала в зонах с повышенной концентрацией напряжений проводилось по критерию  $\Delta t_{\max}$ . Выявлено, что максимальные значения  $\Delta t_{\max}$  принимает при испытании образцов в условиях одноосного сжатия, минимальные — при одноосном растяжении. В условиях объемного напряженного состояния температура имеет промежуточные значения. Так, для образцов цемента М400 в условиях простого сжатия  $\Delta t_{\max} = 5.4^\circ$ , при объемном сжатии температура уменьшается до  $\Delta t_{\max} = 2.8^\circ$ , а в условиях растяжения  $\Delta t_{\max} = 0.2^\circ\text{C}$ .

Изучение распределения температуры на поверхности образцов в зоне магистральной трещины разрушения осуществлялось по данным термограмм (рис. 2, 3). Результаты исследований

показали, что перед зоной трещины разрушения наблюдается понижение температуры по сравнению с температурой образца до опыта. В зоне разрушения фиксируется скачок (повышение) температуры.

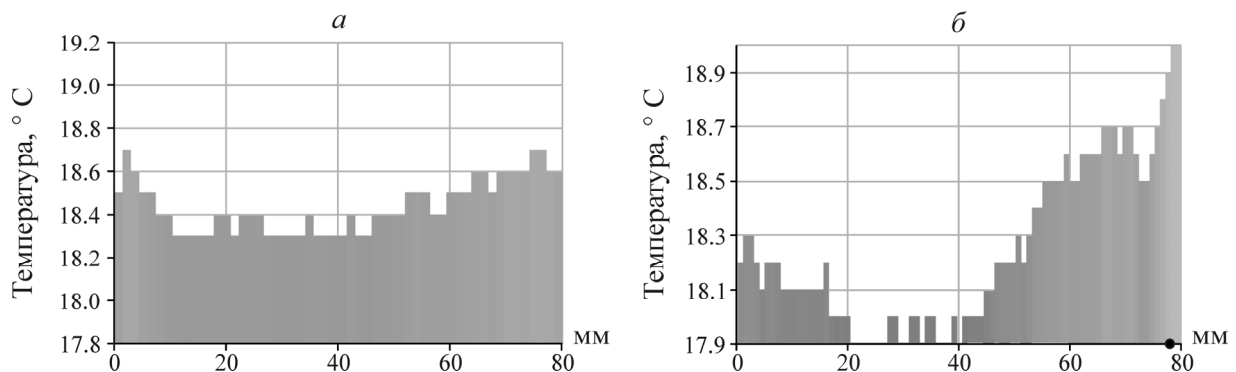


Рис. 2. Распределение температуры по поверхности образца гипса: *а* — до опыта (минимум 18.3°C, максимум 18.7°C, среднее 18.4°C); *б* — в процессе одноосного растяжения (минимум 17.9°C, максимум 19.9°C, среднее 18.2°C). Маркером обозначено место локализации трещины

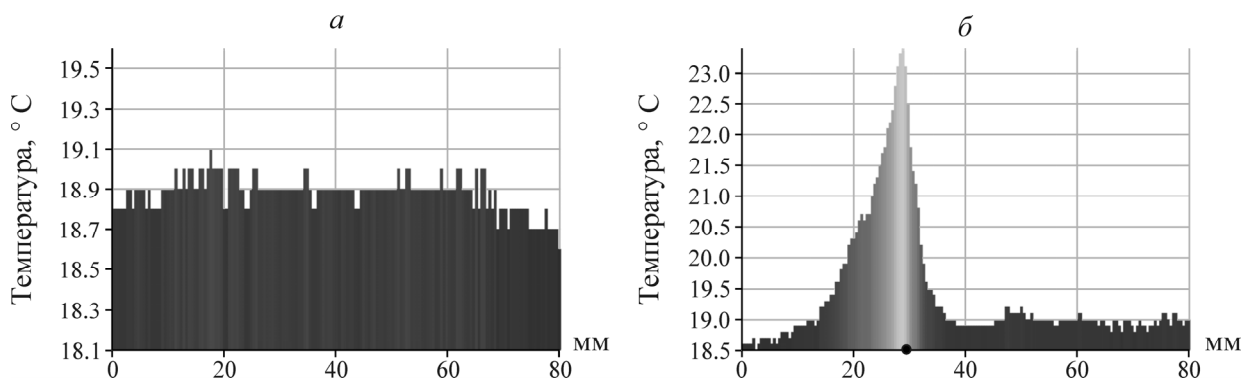


Рис. 3. Распределение температуры по поверхности образца цемента М400: *а* — до опыта (минимум 18.6°C, максимум 19.1°C, среднее 18.9°C); *б* — в процессе испытания (минимум 18.5°C, максимум 23.4°C, среднее 19.4°C). Маркером обозначено место локализации трещины

Исследование взаимосвязей между напряжениями и температурой образцов в зоне магистральной трещины разрушения выполнялось с использованием корреляционного анализа. Результаты расчетов коэффициентов корреляции для цемента М400 и гипса для условий объемного напряженного состояния приведены в табл. 2.

Выявлено, что при стабилметрических испытаниях цемента М400 между главными нормальными напряжениями  $\sigma_1$  и  $\Delta t$  существует статистическая связь, о чем свидетельствует значимый расчетный ( $r_p$ ) коэффициент парной корреляции:  $r_p = 0.65$ . Он превышает критическое значение  $r_c = 0.57$  при  $k = 10$  степенях свободы и уровне значимости  $\alpha = 0.05$ . Подобная закономерность характерна и для гипса:  $r_p = 0.67 > r_c = 0.57$ . Отсюда следует, что при увеличении главных нормальных напряжений  $\sigma_2$  и  $\sigma_1$  в зоне магистральной трещины разрушения закономерно возрастает температура геоматериала. Таким образом, экспериментально подтверждена возможность формирования в зоне магистральной трещины разрушения повышенных температур в условиях всестороннего сжатия горных пород. Эти факторы (высокие давления и температура) в зоне магистральной трещины разрушения вызывают процессы преобразования первичной материнской породы с появлением новых минералов, что не противоречит результатам работ [4, 13, 14 и др.].

ТАБЛИЦА 2. Корреляционная матрица

Цемент М400	$\sigma_1$ , МПа	$\Delta t$ , град	$\Delta t_{\max}$ , град	Гипс	$\sigma_1$ , МПа	$\Delta t$ , град	$\Delta t_{\max}$ , град
$\sigma_1$ , МПа	1	<b>0.65</b>	-0.04	$\sigma_1$ , МПа	1	<b>0.67</b>	0.22
$\Delta t$ , град	—	1	0.07	$\Delta t$ , град.	—	1	0.39

Для прогноза температуры в зоне магистральной трещины разрушения в зависимости от напряжений, действующих на материал, проведен регрессионный анализ. На рис. 4 приведена диаграмма “рассеивания” между нормальным напряжением  $\sigma_1$  и температурой  $\Delta t$  образца цемента М400 и гипса при их разрушении в объемном напряженном состоянии.

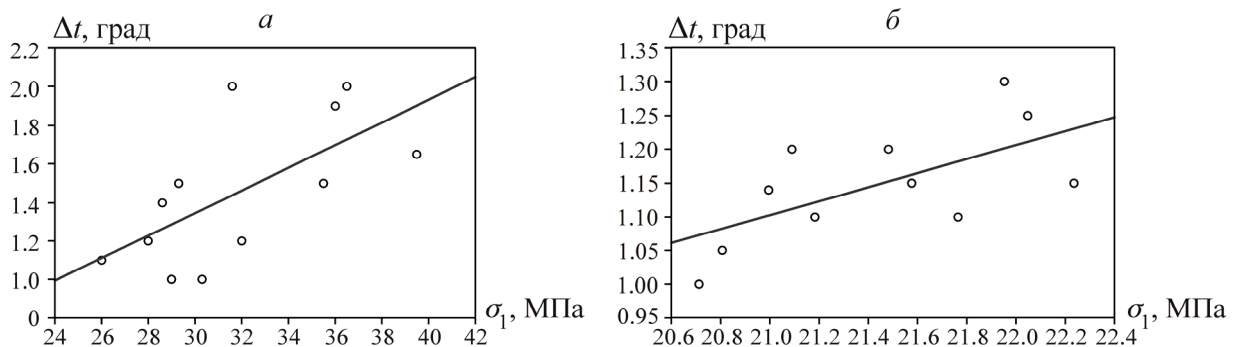


Рис. 4. Поле корреляции между напряжением  $\sigma_1$  и температурой  $\Delta t$  образцов цемента М400 (а) и гипса (б) при их разрушении в объемном напряженном состоянии

Видно, что между исследуемыми показателями существует прямая связь: с увеличением главных нормальных напряжений, оцениваемых посредством показателя  $\sigma_1$ , температура в зоне магистральной трещины разрушения возрастает. На основании выявленной статистической связи между  $\sigma_1$  и  $\Delta t$  получены уравнения связи, позволяющие прогнозировать температуру в зоне магистральной трещины разрушения в зависимости от разрушающих напряжений:

$$\text{для цемента М400} \quad \Delta t = 0.0586\sigma_1 - 0.4136,$$

$$\text{для гипса} \quad \Delta t = 0.1035\sigma_1 - 1.0712.$$

Данные уравнения справедливы при следующих условиях: материал цемент М400 и гипс, прочность которых в среднем составляет 30 МПа, при боковых давлениях  $\sigma_2 = 3$  МПа.

Таким образом, экспериментально установлено, что при нагружении геоматериалов до разрушения в зоне магистральной трещины наблюдается закономерное изменение температуры  $\Delta t$ : в условиях одноосного растяжения  $\Delta t$  принимает меньшие значения, чем при одноосном сжатии [8] и при объемном напряженном состоянии.

На основании выявленной закономерности может быть предложен следующий способ оценки напряженного состояния геоматериала, который включает в себя такие операции:

— изготавливаются образцы из исследуемого материала, например гипса строительного по методике, изложенной в [8]. Образцы материалов испытываются на одноосное  $\sigma_p$ -растяжение,  $\sigma_c$ -сжатие и в условиях объемного напряженного состояния (см. табл. 1);

— по результатам испытаний строится паспорт прочности;

— при разрушении образцов определяется температура  $\Delta t$  в зоне магистральной трещины разрушения для каждого вида напряженного состояния грунта — одноосных сжатия и растяжения, объемного напряженного состояния (результаты измерений  $\Delta t$  приведены в табл. 1);

— определяется  $\sigma_n$  по зависимости

$$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha,$$

где  $\sigma_n$  — напряжение в зоне магистральной трещины разрушения;  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  — главные нормальные напряжения, МПа;  $\alpha$  — угол наклона площадки (зоны разрушения) с максимальными касательными напряжениями:  $\alpha = 45 - \varphi/2$ , где  $\varphi$  — угол внутреннего трения, град;

— строится номограмма изменения  $\Delta t$  в зависимости от  $\sigma_n$  (рис. 5);

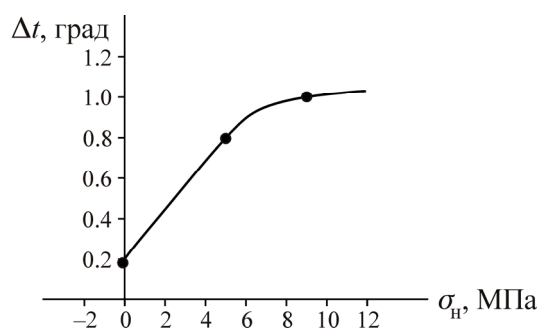


Рис. 5. Номограмма изменения  $\Delta t$  от  $\sigma_n$

— при помощи тепловизора с поверхности исследуемого элемента конструкции сооружения снимается термограмма, по ней рассчитывается температура: например,  $\Delta t_1 = 0.9^\circ \text{C}$ , при которой произошло разрушение материала;

— по  $\Delta t_1 = 0.9^\circ \text{C}$  с помощью полученной номограммы (см. рис. 5) вычисляется значение максимальных нормальных напряжений, действующих в зоне разрушения материалов:  $\sigma_n = 6$  МПа;

— по  $\sigma_n = 6$  МПа, используя паспорт прочности гипса строительного, определяется напряженное состояние материала:  $\sigma_1 = 17$  МПа и  $\sigma_2 = 1$  МПа, при котором произошло разрушение элемента исследуемого сооружения (рис. 6).

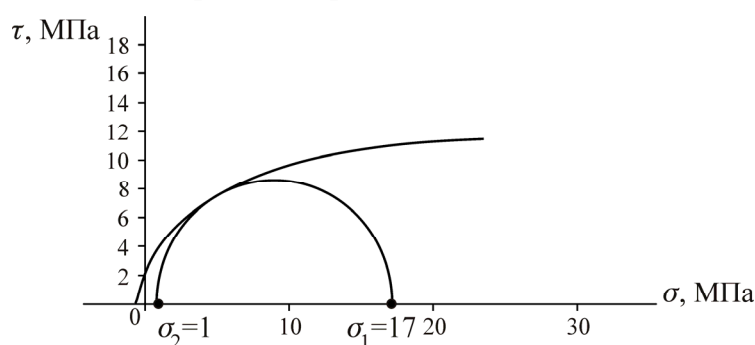


Рис. 6. Определение напряженного состояния гипса строительного по паспорту прочности

## ВЫВОДЫ

Экспериментально установлено, что изменение температуры геоматериала в зоне магистральной трещины разрушения зависит от типа геоматериала и вида напряженного состояния (объемное сжатие, одноосные сжатие и растяжение). В условиях одноосного растяжения на-

блюдаются минимальные изменения температуры, в условиях одноосного сжатия температура закономерно увеличивается с ростом напряжений, а в объемном напряженном состоянии она принимает максимальные значения.

Результаты экспериментальных исследований показали, что перед зоной трещины разрушения отмечается понижение температуры по сравнению с температурой образца до опыта. В зоне магистральной трещины разрушения фиксируется скачок (повышение) температуры.

Получены уравнения связи, позволяющие прогнозировать температуру геоматериалов в зоне магистральной трещины разрушения в зависимости от разрушающей нагрузки.

Предложен способ оценки напряженного состояния материалов по данным инфракрасного излучения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Середин В. В., Лейбович Л. О., Пушкарева М. В., Копылов И. С., Хрулев А. С. К вопросу о формировании морфологии поверхности трещины разрушения горных пород // ФТПРПИ. — 2013. — № 3. — С. 85–90.
2. 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.
3. Бобряков А. П. О механизме прерывистого скольжения в сыпучей среде // ФТПРПИ. — 2010. — № 6. — С. 11–16.
4. Чиков Б. М., Каргаполов С. А., Ушаков Г. Д. Экспериментальное стресс-преобразование пироксенита // Геология и геофизика. — 1989. — № 6. — С. 75–79.
5. Вознесенский А. С., Устинов К. Б., Шкуратник В. Л. Теоретическая модель акустической эмиссии при механическом нагружении горных пород в области максимального уплотнения // Прикл. механика и техн. физика. — 2006. — Т. 47. — № 4. — С. 145–152.
6. Вознесенский А. С., Куткин Я. О., Красилов М. Н. Взаимосвязь акустической добротности с прочностными свойствами известняков // ФТПРПИ. — 2015. — № 1. — С. 30–39.
7. 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. — С. 3–20.
8. Середин В. В. Исследование температуры пород в зоне трещины разрушения // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 9-12. — С. 2713–2717.
9. Шейнин В. И., Левин Б. В., Мотовилов Э. Ф., Морозов А. А., Фаворов А. В. Диагностика быстрых периодических изменений напряжений в горных породах по данным инфракрасной радиометрии // Физика Земли. — 2001. — № 4. — С. 24–30.
10. Опарин В. Н., Киряева Т. А., Гаврилов В. Ю., Шутилов Р. А., Ковчавцев А. П., Танайно А. С., Ефимов В. П., Астраханцев И. Е., Грнев И. В. О некоторых особенностях взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах Кузбасса // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 64–89.
11. Середин В. В. Способ построения паспортов прочности горных пород // ФТПРПИ. — 1985. — № 2. — С. 110–111.
12. А. с. 1173244 СССР. Способ определения напряженного состояния материалов / В. В. Середин, Б. В. Лаптев. — № 3668212; заявл. 25.11.83, опублик. 15.08.85, Бюл. № 30. — 3 с.
13. Молчанов В. И., Селезнева О. Г., Осипов С. Л. Механоактивизация минерального вещества как предпосылка стресс-преобразований в линеаментных зонах // Структура линеаментных зон стресс-метаморфизма. — Новосибирск: Наука, 1990. — С. 89–97.
14. Куксенко В. С., Махмудов Х. В., Мансуров В. А., Султанов У., Рустамова М. З. Структурные изменения при деформации природных гетерогенных материалов // ФТПРПИ. — 2009. — № 4. — С. 55–59.

Поступила в редакцию 17/VIII 2015