

УДК 622.831

**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ИМПУЛЬСНОГО НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОЦЕСС РАЗРУШЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО
НАГРУЖЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД**

А. Г. Вострецов, Г. Е. Яковицкая

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: yge@ngs.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Исследовано влияние внешнего импульсного низкоэнергетического воздействия (удары) в процессе нагружения до разрушения образцов горных пород различных типов на структуру записей сигналов электромагнитного излучения.

Механическая неустойчивость, образцы горных пород, нагружение до разрушения, внешнее импульсное воздействие, электромагнитное излучение, триггерный эффект

Известно, что трещинообразование и разрушение твердых тел сопровождается электромагнитным излучением [1, 2]. Это явление свойственно горным породам при их деформировании как в массиве, так и в образцах и находит практическое применение в сейсмологии при прогнозировании землетрясений [3], в горной промышленности для контроля степени удароопасности обрабатываемых массивов и прогноза динамических проявлений горного давления [4]. Как следует из [5], перед землетрясением и перед возникновением горных и горно-тектонических ударов обширные области вокруг очага находятся в метастабильном состоянии. При этом резко возрастает чувствительность среды к малым внешним воздействиям. А так как имеет место самоподобие процессов, то можно полагать, что аналогичные явления имеют место и при подготовке динамических проявлений горного давления на разных масштабных уровнях, в том числе в лабораторных условиях.

При изучении физических аспектов возникновения различных видов динамических проявлений в массивах в [6] выделен особый вид сильных природно-техногенных землетрясений триггерного характера, возникающих в массивах горных пород, подверженных длительным и периодическим техногенным воздействиям, который отнесен к разряду так называемой иницированной наведенной сейсмичности. Источником выделения сейсмической энергии является сам энергонасыщенный массив, обладающий собственным запасом внутренних тектонических напряжений. Подобные иницируемые техногенные землетрясения отнесены к местам разрабатываемых месторождений нефти и газа, заполнения водохранилищ, проведения горных и взрывных работ и др. Кроме того, в [6] показана существенная роль триггерных эффектов при возникновении оползней и развитии динамических проявлений горного давления. Отмечено, что важнейшую роль в реализации оползней играют различного рода триггерные механизмы, например механические воздействия.

Изменение напряженно-деформированного состояния (НДС), инициирующее возникновение динамической неустойчивости, зачастую связано с изменением свойств участка локализации деформаций, источниками которых могут быть деформационные процессы в соседних областях (например, другие землетрясения, горнопроходческие горные работы) [7]. Привлекательность изучения инициирующих событий состоит в том, что эти явления представляют одну из немногих возможностей установить причинно-следственную связь в геомеханике землетрясений (и различных форм динамических проявлений горного давления в массивах при горных работах, например горных и горно-тектонических ударах).

Развивая исследования в области низкоэнергетических ударных воздействий на предварительно напряженные образцы, в работе [8] показано, что на завершающем этапе механической неустойчивости исследуемого объекта при малых величинах пороговых энергий и нелинейности процесса взаимодействия внешнее воздействие необратимо ведет к его макроразрушению. Этими же авторами отмечается, что динамика геосреды как нелинейной системы обусловлена энергообменом эндо- и экзогенных источников, а внесение в этот процесс контролируемого энерговоздействия позволяет изменять уровень структурных напряжений и оценивать параметры релаксации, деформирования. Подобный поиск востребован задачами “снижения риска” разрушения. Близкие результаты получены в [9] при изучении влияния низкоамплитудных динамических воздействий на напряженные образцы. Установлено, что применение одиночных импульсных воздействий позволяет использовать как минимум один параметр деформационного отклика межблочной границы для идентификации качественного изменения ее НДС. Использование таких характеристик дает возможность определять близость напряженного состояния к предельному, при котором возникают неустойчивые подвижки. С другой стороны, в [10] показано, что задержки между временем прихода сейсмических волн и инициированным событием изменяются от секунд до недель и более: “если в результате кратковременного воздействия происходит событие, которое иначе не могло бы произойти или произошло бы существенно позже, то говорят об инициировании деформационного процесса, или триггерном эффекте”.

Анализируя динамические проявления горного давления на Хибинском месторождении, авторы [11] утверждают, что зачастую мощные технологические взрывы являются триггерами для возникновения сильных сейсмических событий. Поэтому необходим постоянный контроль сейсмической активности массива для своевременного выделения стадии подготовки сильного события.

В ИФЗ РАН [12] осуществлены экспериментальные исследования механоэлектрических преобразований при отбойке рудосодержащей горной породы. Результаты показали, что выделяется дополнительная, заранее накопленная механоэлектрическая энергия в виде упругих волн (УВ), акустической эмиссии (АЭ) и электромагнитной эмиссии (ЭМИ). Проведена попытка приблизительно оценить соотношение энергий возбуждения и выделенной эмиссии при прохождении УВ и волн механического перераспределения напряжения. Поставленная задача решалась сравнением динамических характеристик ЭМИ и АЭ с лабораторными исследованиями пьезоэффекта (ПЭ) в отобранных образцах руд. Зарегистрировано более одной тысячи сигналов ЭМИ и АЭ.

В ИГД СО РАН аналогичные работы выполнены с использованием ЭМИ [13]. Цель экспериментов — исследовать возникновение триггерного эффекта в процессе нагружения образцов горных пород на стадии их неустойчивого состояния при низкоэнергетических воздействиях.

Для этого необходимо было решить следующие задачи:

— разработать и создать стенд и методику для проведения экспериментальных исследований по низкоэнергетическому воздействию на пластичные и хрупкие образцы горных пород;

— выполнить экспериментальные исследования по регистрации параметров сигналов электромагнитного отклика на ударное воздействие на различных стадиях нагружения образцов горных пород;

— провести регистрацию возникновения триггерного эффекта в различных по структуре и параметрам образцах горных пород;

— исследовать изменение временных характеристик деформационного процесса на стадии неустойчивости при проведении ударных воздействий на различные по структуре и параметрам образцы горных пород, включая моменты возникновения разрушений (нарушения сплошности).

СТЕНД И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Подробное описание стенда приведено в [13], однако для исследования возникновения триггерного эффекта стенд был дополнен ударником. Образцы горных пород устанавливались между плитами гидравлического пресса с усилием до 300 кН и нагружались ступенями до разрушения. Электромагнитные импульсы и нагрузка регистрировались синхронно. Пресс с системой измерительных датчиков имел металлический экран, на боковой стенке которого крепился специально изготовленный пневматический узел. Схема стенда для исследования структуры сигналов ЭМИ при ударном воздействии на образцы горных пород представлена на рис. 1.

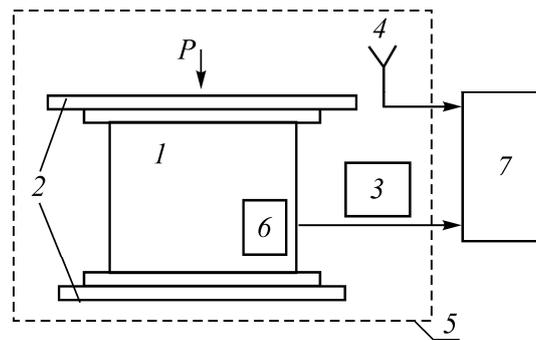


Рис. 1. Структурная схема стенда для экспериментального исследования динамических (ударных) воздействий на образцы горных пород: 1 — исследуемый образец; 2 — плиты пресса; 3 — ударник; 4 — приемная антенна; 5 — электромагнитный экран; 6 — датчик измерения нагрузки; 7 — система регистрации и обработки информации

С помощью пневматического узла осуществлялись удары (“выстрелы”) по боковой поверхности образцов металлическим или пластмассовым шариком диаметром 6 мм и массой 8.06 и 1.09 г соответственно. В системе регистрации использовался IBM-совместимый компьютер со встроенным двенадцатиразрядным четырехканальным аналого-цифровым преобразователем [14]. На каждой ступени нагружения проводилось ударное воздействие на образец. Регистрировались следующие параметры: амплитуда электромагнитного сигнала $U_{уд}$, его длительность $\tau_{уд}$, величина нагрузки на образец P . Серии экспериментов выполнены на образцах мрамора, туфопесчаника, диабаз и известняка.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 2а представлена осциллограмма образца туфопесчаника при ударе пластмассовыми шариками. На начальных и последующих этапах нагружения (рис. 2б) — (12.7, 28.5 кН) амплитуды сигналов ЭМИ регистрируются в пределах 0.967–1.292 мВ, достигая достаточно больших значений. Затем по мере достижения образцом момента нарушения сплошности, на стадии механической неустойчивости, максимальная нагрузка на него составляет ~40 кН, при последующих

максимальных амплитудных значениях $U_{\max} = 1.617$ мВ при “мгновенном” падении нагрузки до 4.7 кН (так называемом триггерном эффекте). Время от начала нагружения до возникновения триггерного эффекта составляет 5930 мс.

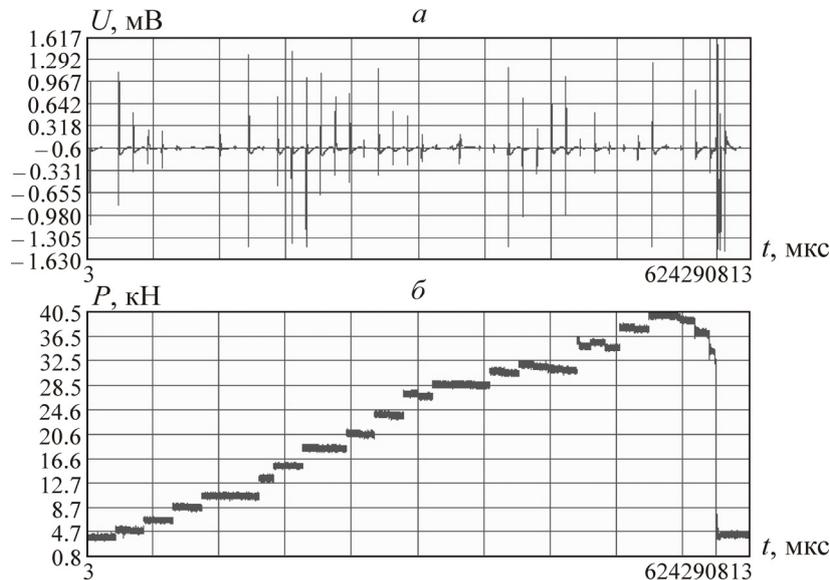


Рис. 2. Синхронные осциллограммы сигналов ЭМИ (а) ($m = 1.09$ г, $V = 30$ м/с, $E_{\text{уд}} = 0.49$ Дж) и нагрузки (б) ($U = 2 - 45$ мВ, $\sigma = 65.3$ МПа, $\tau = 2 - 12$ мс, $\Delta f = 3 - 20$ кГц, $fU_{\max} = 60 - 120$ Гц) при нагружении образца туфопесчаника и низкоэнергетическом воздействии на него пластмассовыми шарикам (см. обозн. в таблице)

Оценим величину запасенной в породном образце упругой энергии. Параметры образца: площадь поперечного сечения $S = 6.28 \cdot 10^{-4}$ м², нагрузка на образец в момент возникновения трещины $P = 22$ кН, модуль упругости материала образца $E = 4 \cdot 10^4$ МПа.

Энергия, затрачиваемая при деформировании:

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon = \frac{\sigma^2}{2E}.$$

На основании вычислений по приведенной формуле получено, что упругая энергия \mathcal{E} , запасенная в образце до начала его разрушения, составила 9.6 Дж. Эта величина в 19.6 раза превышает энергию удара пластмассового и в 9.2 раза — стального шарика (таблица).

Параметры сигналов электромагнитного отклика (ЭМИ) при соударении образцов горных пород с ударником

Порода	Параметр электромагнитного импульса					Параметр ударника		
	U , мВ	σ , МПа	τ , мс	Δf , кГц	fU_{\max} , Гц	m , г	V , м/с	$E_{\text{уд}}$, Дж
Пластмассовый шарик								
Мрамор	2 – 45	65.3	2 – 12	3 – 20	60 – 120	1.09	30	0.49
Туфопесчаник	38 – 164	148	1 – 4	7 – 20	100 – 300			
Металлический шарик								
Мрамор	40 – 400	52.1	4 – 5	3 – 20	30	8.07	15	1.04
Туфопесчаник	200 – 1200	124.6	0.5 – 1.8	6 – 20	30			

Примечание: U — амплитуда электромагнитного сигнала (ЭМИ); σ — напряжение в образце; τ — длительность импульса ЭМИ; Δf — его частотный диапазон; fU_{\max} — частота максимальной спектральной амплитуды; m — масса шарика; V — скорость соударения шарика с образцом; $E_{\text{уд}}$ — энергия удара

Заметим, что эксперименты, включающие удары шариками (5–8) с величинами энергий, приведенными в таблице, по предварительно ненагруженным породным образцам никогда не приводили к разрушению последних или возникновению в них трещин.

На рис. 3 представлены осциллограммы образца мрамора при его соударении с пластмассовыми шариками. Максимальная нагрузка на образец достигала 70 кН.

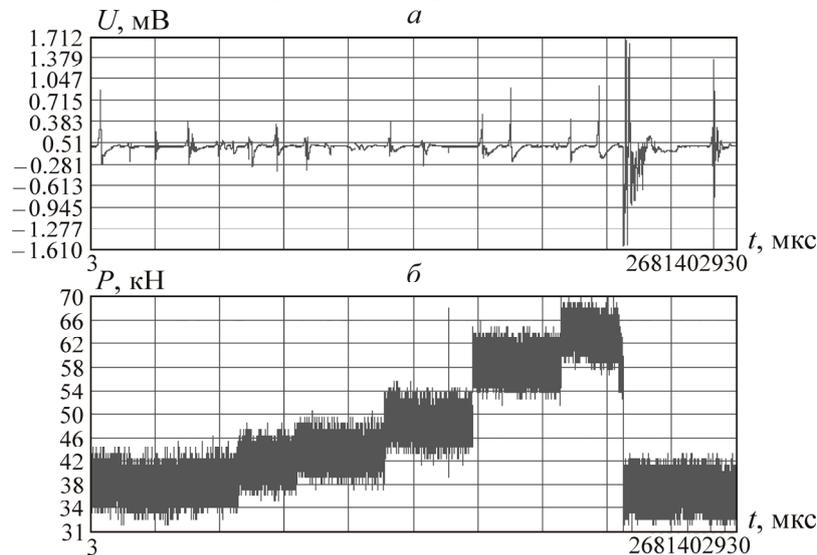


Рис. 3. Синхронные осциллограммы сигналов ЭМИ (а) и нагрузки (б) при соударении образца мрамора с пластмассовыми шариками

Средняя величина амплитуд регистрировалась на уровне 0.383 мВ, а максимальная амплитуда сигнала электромагнитного отклика достигала 1.712 мВ (на конечной стадии неустойчивости, за которой следует так называемый эффект триггерного воздействия, т. е. практически мгновенного падения нагрузки). Время нагружения до момента возникновения триггерного воздействия составило 2677 мс.

Проведем анализ нагружения образца мрамора на четырех ступенях его нагружения при соударении с металлическими шариками (рис. 4).

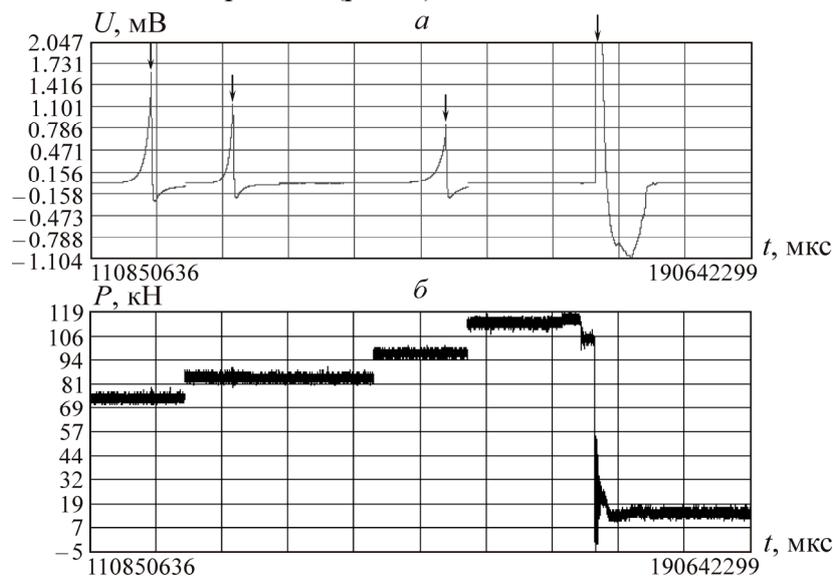


Рис. 4. Синхронные осциллограммы сигналов ЭМИ (а) и нагрузки (б) при соударении образца мрамора с металлическими шариками

Здесь возникновение импульсов ЭМИ соответствует меткам ударных воздействий. Осциллограммы показывают, что при соударении образца с металлическим шариком нагрузка последовательно увеличивается, и только при наступлении в нем стадии неустойчивости (3-й импульс на рис. 4) возникает достаточно продолжительный временной промежуток (1 595 мс), после которого отмечается сначала незначительное увеличение нагрузки (с 113 до 119 кН), затем также незначительное ее падение (с 119 до 106 кН). Далее практически мгновенно проявляется эффект триггерного воздействия (нагрузка падает ~ до 19 кН).

Таким образом, анализ низкоэнергетических воздействий на пластичные образцы горных пород показывает, что при достижении ими неустойчивых состояний практически мгновенно происходит эффект триггерного воздействия, т. е. мгновенное разрушение образцов.

На рис. 5 представлены синхронные осциллограммы сигналов нагружения и электромагнитных откликов на низкоэнергетические воздействия для образцов туфопесчаника. Особое внимание следует обратить на участок осциллограммы для стадии, предшествующей нарушению сплошности образца. Видно, что после низкоэнергетического ударного воздействия (8-й сигнал, 152 513 354 мкс) проходит определенный временной период, после которого происходит разрушение образца, так называемый триггерный эффект.

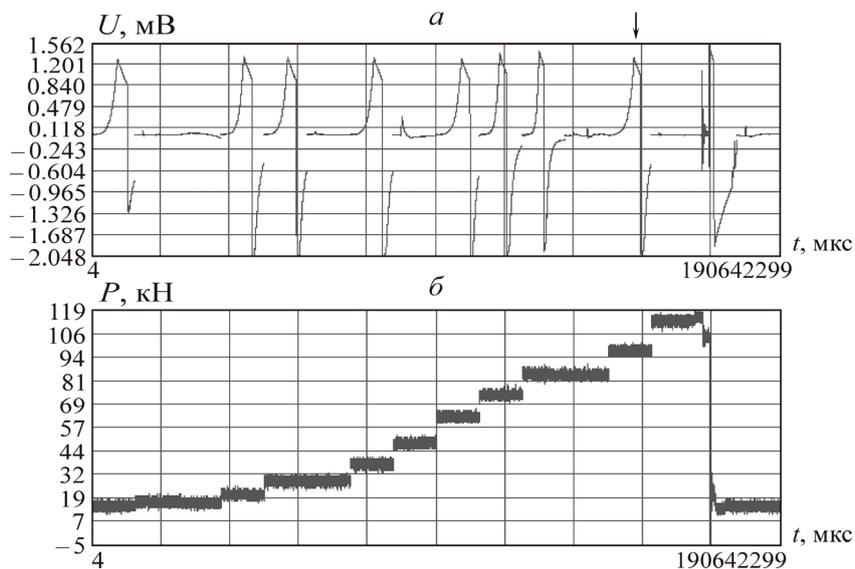


Рис. 5. Изменение сигналов ЭМИ (а) и нагрузки (б) образца туфопесчаника при внешних энергетических импульсных воздействиях на него (~ 1.04 Дж) металлическими шариками

Рассмотрим этот участок осциллограммы более детально (рис. 6). Из приведенных записей следует, что при низкоэнергетическом внешнем импульсном воздействии на образец туфопесчаника, находящийся в “неустойчивом” состоянии, происходит падение нагрузки с 106 до 67 кН, а спустя 3 507 мс — вновь ее падение с 67 до 9 кН, после чего образец разрушается.

Исследуем нагружение образца туфопесчаника с одновременным ударным воздействием на него. Для этого возвратимся к рис. 2, где представлены синхронные осциллограммы образца туфопесчаника с регистрацией сигналов нагрузки и электромагнитных низкоэнергетических откликов, но с использованием другого временного масштаба (рис. 7).

Из рис. 7 видно, что за достаточно протяженный промежуток времени (35 175 мс) происходит нагружение образца, а затем за короткий временной промежуток — его разрушение. Анализ графиков показывает, что на упругой или начальной пластической стадии деформирования образца при внешнем импульсном воздействии нагрузка продолжает расти. Однако при достиже-

нии критической стадии нагружения или неустойчивости даже без внешнего импульсного воздействия нагрузка начинает медленно падать (7235 и 3517 мс). После этого при последовательных внешних импульсных воздействиях она также незначительно падает (35 и 22 кН), а через 723 мс происходит “катастрофическое” падение нагрузки, что связывается авторами с так называемым триггерным воздействием на испытываемый образец. Аналогичные результаты при ударном воздействии на породные образцы с регистрацией сигналов АЭ получены в [3, 6–9, 11].

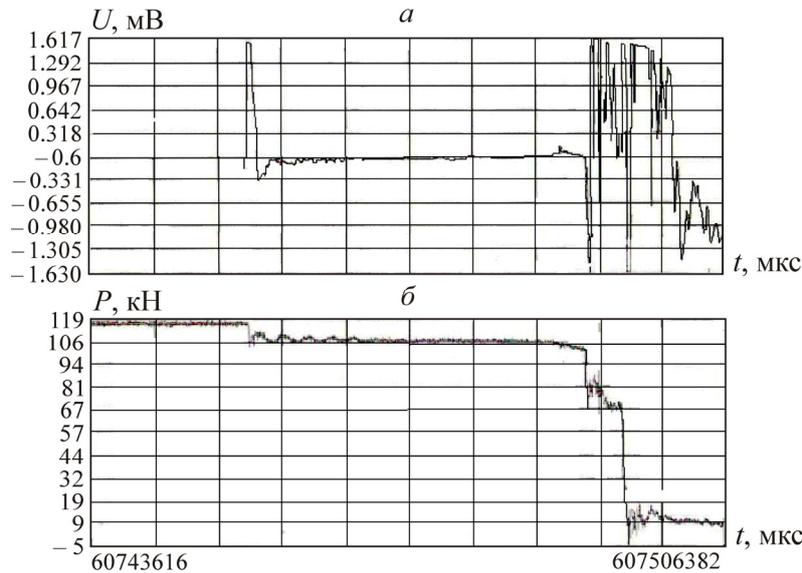


Рис. 6. Фрагмент рис. 5 синхронных осциллограмм сигналов электромагнитных откликов (а) и нагрузки (б) при внешнем импульсном воздействии на образец туфрпесчаника

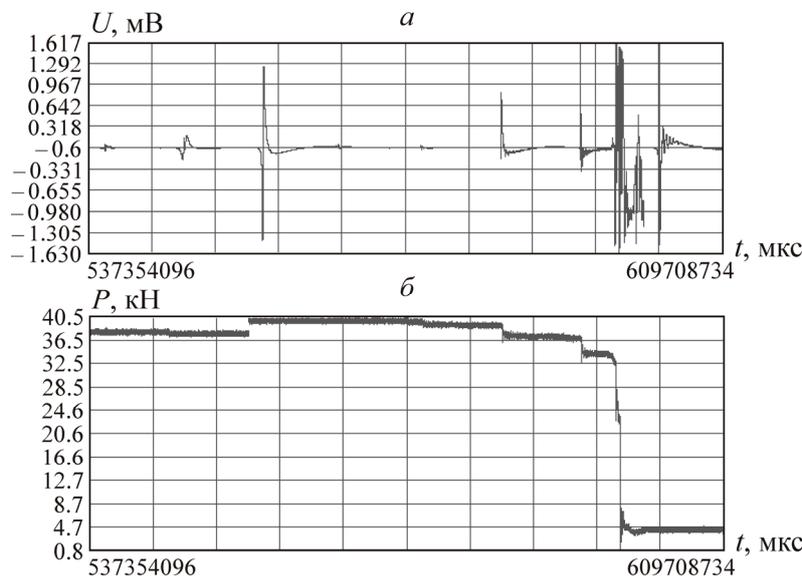


Рис. 7. Фрагмент рис. 2 изменения сигналов ЭМИ (а) и нагрузки (б) на критической стадии неустойчивого состояния образца туфрпесчаника при низкоэнергетическом внешнем импульсном воздействии

Исследуем более детально временные параметры, характеризующие стадию неустойчивости для некоторых типов хрупких и пластичных образцов при внешних низкоэнергетических воздействиях на них пластмассовыми или металлическими шариками. Так, для образца туфо-

песчаника при воздействии на него пластмассовым шариком с кинетической энергией 0.49 Дж и последующим возникновением триггерного эффекта это время составляет 5930 мс, а с металлическим шариком и кинетической энергией 1.04 Дж — 35175 мс. Для образца мрамора при соударении его с пластмассовым шариком с кинетической энергией 0.49 Дж и последующим триггерным эффектом время составляет 2677 мс, а с металлическим шариком с кинетической энергией 1.04 Дж — 1595 мс.

Таким образом для различных типов образцов горных пород, находящихся на стадии механической неустойчивости, временные характеристики между низкоэнергетическим воздействием и триггерным эффектом могут быть различны.

На основании описанных экспериментов разработана методика анализа осциллограмм сигналов электромагнитных откликов при ударном воздействии на предварительно нагруженные породные образцы. Проведенную серию экспериментов можно рассматривать как реализацию в породных образцах триггерного эффекта в процессе разрушения горных пород: на стадии нагружения образцов, предшествующих моменту нарушения сплошности, в них возникает состояние неустойчивости, которое при низкоэнергетическом ударном воздействии вызывает эффект мгновенного разрушения.

ВЫВОДЫ

Экспериментально изучена структура сигналов электромагнитных откликов на внешнее импульсное воздействие образцов горных пород в процессе их нагружения до разрушения. Получено экспериментальное подтверждение в лабораторных условиях триггерного эффекта, заключающегося в том, что на стадии предразрушения устойчивый процесс неупругого деформирования массива может переходить в неустойчивую сверхбыструю катастрофическую стадию, приводящую к разрушению высоконапряженных горных пород.

Продемонстрированы возможности метода электромагнитного излучения при изучении процессов, происходящих в предельно напряженных породах при низкоэнергетическом воздействии на них.

Показано, что временные параметры между внешним импульсным низкоэнергетическим воздействием на исследуемый образец горной породы и триггерным воздействием — разрушением этого образца — могут быть различны. Так, в процессе экспериментов получены следующие их значения: время от начала нагружения до возникновения триггерного эффекта составляет для образца туфопесчаника с пластмассовым шариком 5 930 мс, а с металлическим шариком — 35 175 мс. Для образца мрамора при соударении его с пластмассовым шариком и последующим триггерным эффектом время составляет 2 677 мс, а с металлическим шариком — 1 595 мс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев А. А., Завадовская Е. К., Сальников В. Н. Изменение электропроводимости и радиоизлучения горных пород и минералов при физико-химических процессах в них // ДАН СССР. — 1975. — Т. 220. — № 1.
2. Перельман М. Е., Хатиашвили Н. Г. О радиоизлучении при хрупком разрушении диэлектриков // ДАН СССР. — 1981. — Т. 256. — № 4.
3. Соболев Г. А. Основы прогноза землетрясений. — М.: Наука, 1993.

4. **Петухов И. М., Винокур Б. Ш., Смирнов В. А.** Комплексный метод прогноза удароопасности участков угольных пластов // *Безопасность труда в пром-сти.* — 1969. — № 10.
5. **Соболев Г. А., Пономарев А. В.** Динамика разрушения моделей геологической среды при триггерном влиянии жидкости // *Физика Земли.* — 2011. — № 10.
6. **Адушкин В. В.** Триггерные эффекты при образовании оползней // *Материалы Всерос. семинара-совещания “Триггерные эффекты в геосистемах”.* — М.: ГЕОС, 2010.
7. **Кочарян Г. Г.** Дистанционное инициирование динамических событий // *Материалы Всерос. семинара-совещания “Триггерные эффекты в геосистемах”.* — М.: ГЕОС, 2010.
8. **Авагимов А. А., Зейгарник В. А., Окунев В. И.** Параметрические характеристики процесса развития механической неустойчивости // *Материалы Всерос. семинара-совещания “Триггерные эффекты в геосистемах”.* — М.: ИДГ РАН, 2013.
9. **Псахье С. Г., Шилько Е. В., Астафуров С. В., Григорьев А. С.** О возможности оценки близости сдвиговых напряжений на активных границах раздела в блочных средах к критическому значению // *Материалы Всерос. семинара-совещания “Триггерные эффекты в геосистемах”.* — М.: ИДГ РАН, 2013.
10. **Кочарян Г. Г.** Режим деформирования разломных зон и инициирующий потенциал сейсмических колебаний // *Материалы Всерос. семинара-совещания “Триггерные эффекты в геосистемах”.* — М.: ИДГ РАН, 2013.
11. **Козырев А. А., Федотова Ю. В., Журавлева О. Г.** Контроль изменений сейсмической активности и поиск предвестников сильных сейсмических событий при техногенном воздействии // *Материалы всероссийского семинара-совещания “Триггерные эффекты в геосистемах”.* — М.: ИДГ РАН, 2013.
12. **Майбук З.-Ю. Я.** Триггерные эффекты при изменении напряженно-деформируемого состояния рудосодержащих горных пород // *Материалы Всерос. семинара-совещания “Триггерные эффекты в геосистемах”.* — М.: ИДГ РАН, 2013.
13. **Яковицкая Г. Е.** Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии. — М.: Параллель, 2008.
14. **Курленя М. В., Вострецов А. Г., Кулаков Г. И., Яковицкая Г. Е.** Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения при разрушении горных пород. — Новосибирск: Изд-во СО РАН. — 2000.

Поступила в редакцию 29/VIII 2014