

## ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ

УДК 539.4

### МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ МНОЖЕСТВЕННЫХ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ДЕФЕКТАМИ

© 2022 г. О. Б. Наймарк<sup>а</sup>, \*, Э. А. Аглетдинов<sup>а</sup>, М. В. Банников<sup>а</sup>, Ю. В. Баяндин<sup>а</sup>,  
Е. В. Бурмистров<sup>а</sup>, С. В. Лукин<sup>б</sup>, А. С. Никитюк<sup>а</sup>, Ю. В. Овчаренко<sup>б</sup>,  
С. В. Уваров<sup>а</sup>, В. В. Чудинов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Акад. Королева, 1, Пермь, 614013 Россия

<sup>б</sup>ООО «Газпромнефть НТЦ», наб. реки Мойки, 77, Санкт-Петербург, 190000 Россия

\*e-mail: naimark@icmm.ru

Поступила в редакцию 26.07.2022 г.

После доработки 18.10.2022 г.

Принята к публикации 31.10.2022 г.

Стадийность процесса разрушения горных пород исследуется с использованием данных индентирования и акустической эмиссии с последующим анализом флуктуаций усилия индентирования и энергии акустического сигнала. Полученные экспериментальные результаты по индентированию и обработке данных акустической эмиссии позволяют установить соответствие между типами коллективных мод ансамблей дефектов сдвига, эффектами кластеризации поврежденности и стадийностью процесса разрушения в очаге деформации. Автомодельная природа коллективных мод является основой для интерпретации данных индентирования, обобщения результатов на масштабы сейсмических и техногенных событий, и определения параметров, характеризующих развитие очага разрушения в процессах бурения.

*Ключевые слова:* горные породы, поврежденность, флуктуации усилия индентирования, акустическая эмиссия, коллективные моды поврежденности, кластеризация

DOI: 10.31857/S0015323022600988

#### ВВЕДЕНИЕ

Изучение стадийности процесса разрушения является одним из фундаментальных направлений при исследовании деформационного поведения и разрушения горных пород. Это связано с проблемами обобщения результатов лабораторных исследований применительно к явлениям сейсмической и техногенной природы. Прикладное значение обусловлено технологическими приложениями, такими как бурение, и определение параметров, характеризующих взаимодействие инструмента с горными породами при заданных энергетических характеристиках воздействия на породу (плотности энергии, интенсивность воздействия).

Методология обобщения данных лабораторных экспериментов на масштабы сейсмических событий и технологических процессов в горном деле связана с учетом специфики механического поведения и разрушения горных пород, обусловленных развитием дефектов сдвиговой природы в условиях их многомасштабного взаимодействия последних и кластеризации. Следствием этих особенностей на масштабах сейсмических собы-

тий являются эмпирические законы скейлинга [1, 2], отражающие универсальную пространственно-временную динамику формирования зон поврежденности и переход к разрушению.

Установление связи между коллективным поведением многомасштабных сдвигов, автомодельными решениями уравнений кинетики поврежденности и законами скейлинга в сейсмичности рассматривается как основа для распространения результатов лабораторных экспериментов на масштабы сейсмической природы, прогнозирования режимов технологических процессов. Это предполагает реализацию экспериментов, позволяющих получать данные о пространственно-временной динамике развития поврежденности с учетом эффектов кластеризации зон поврежденности. Масштаб этих зон может быть соизмерим с размером лабораторных образцов и качественным образом изменять условия нагружения при стандартных лабораторных испытаниях. Данные проблемы могут быть преодолены при реализации нагружения горных пород методами индентирования, локализующими область разрушения в окрестности индентора.

Использование систем регистрации высокого разрешения флуктуаций усилия индентирования, акустической эмиссии с последующей обработкой данных позволяет определить закономерности пространственно-временной динамики формирования областей разрушения. Принципиально важным является установление соответствия закономерностей кластеризации зон разрушения в экспериментах на лабораторных образцах с автомоделными решениями уравнений кинетики поврежденности [3]. Проводя аналогию с подходами линейной механики разрушения, основанной на решении Ирвина об автомоделно-промежуточном характере распределения напряжений в вершине трещины в упругом материале [4], стадийность разрушения в горных породах связывается в работе [5] с промежуточно-асимптотическими автомоделными решениями уравнения кинетики поврежденности, отражающими закономерности кластеризации ансамблей дефектов.

Метод индентирования широко применяется для оптимизации процессов бурения и определения технологических параметров: буримость горных пород (rock mass drillability – RDI) [6], скорость проникания при бурении (rate of penetration – ROP), выбор геометрии бурового долота (the drilling bit), срок службы долота (the bit life) [7]. Величина параметра буримости горных пород (RDI) определяется рядом факторов, роль которых до настоящего времени исследована недостаточно, что связано с необходимостью решения сложной проблемы множественного разрушения горной породы (фрагментации) в зависимости от режимов силового воздействия. В работе [8] отмечается, что модели, применяемые для оценки скорости бурения, являются однопараметрическими и не учитывают совокупность данных, характеризующих очаг деформирования (deformation zone, crushed rock zone) и разрушения (cracked zone).

Важным моментом для приложений является разработка моделей, которые должны обеспечивать оперативный анализ данных, получаемых в процессе бурения, и оптимизацию процесса в условиях непрерывного технологического цикла. Это предполагает проведение лабораторных экспериментов по квазистатическому и динамическому нагружению горных пород с *in-situ* регистрацией кинетики поврежденности и обоснования моделей, описывающих стадийность развития разрушения в очаге деформации.

Взаимодействие инструмента с горной породой в процессе бурения подразделяется на следующие основные стадии: создание зоны разрушения (crushed rock zone), распространение трещин (crack propagation), формирование сколов (chipping) [9]. При движении инструмента происходит деформирование породы; формирование зоны предразрушения, содержащей множество микротрещин; зарождение и распространение основ-

ной трещины, обеспечивающее концентрацию энергии при движении инструмента в окрестности вершины. При достижении усилия некоторого порогового значения в вершине основной трещины, трещинообразование начинает носить множественный характер. Такая тенденция, в свою очередь, уменьшает интенсивность воздействия и обеспечивает проникновение инструмента во фрагментированную породу. Аналогичные эффекты наблюдаются в экспериментах по проникновению индентора в образец горной породы (punch penetration tests – PPT), результаты которых могут использоваться для оценки “эффективности бурения” (drillability and boreability) горной породы.

Эксперименты по индентированию горных пород (далее “PPT”) могут обеспечить оценку основных параметров, определяющих сопротивление породы и ее фрагментацию при движении инструмента [10]. Этот тип испытания также может обеспечить получение данных для моделирования сейсмических событий и технологических процессов, соответствующих различным стадиям бурения. PPT тест был предложен в работе [11] для обоснования соотношений, определяющих скорость проникания (rate of penetration – ROP) с использованием бурильных установок (tonnel boring machine – TBM). PPT не является стандартным методом испытания и характеризуется комплексным влиянием различных механизмов, определяющих стадии проникновения инструмента в породу. Используются различные модификации PPT для исследования стадийности [12], определения основных механизмов, связанных с кинетикой фрагментации в полях напряжений, создаваемых при движении инструмента в породе. Также он может быть использован для получения данных о процессе бурения и их дальнейшей обработки, для идентификации механизмов и обоснования моделей. Данные, получаемые на основе лабораторных экспериментов по индентированию горных пород в широком диапазоне интенсивности нагружения, могут служить основой для оптимизации процесса бурения.

Оптимизация режимов бурения связана с учетом механических свойств горных пород, стадийности развития разрушения, отражаемых в технологических параметрах. К таким параметрам относятся: восприимчивость к бурению (drillability, blastability) и характерная энергия бурения (specific energy of drilling). В ходе бурения регистрируются основные параметры (measurements while drilling – MWD [13]), такие как скорость проникновения инструмента в породу, скорость вращения буровой колонны, вращательный момент и усилие на забойную часть скважины. Эти параметры являются оптимизационными технологическими показателями, значения которых зависят от условий взаимодействия инструмента с горной породой. Данные MWD сопоставляются с

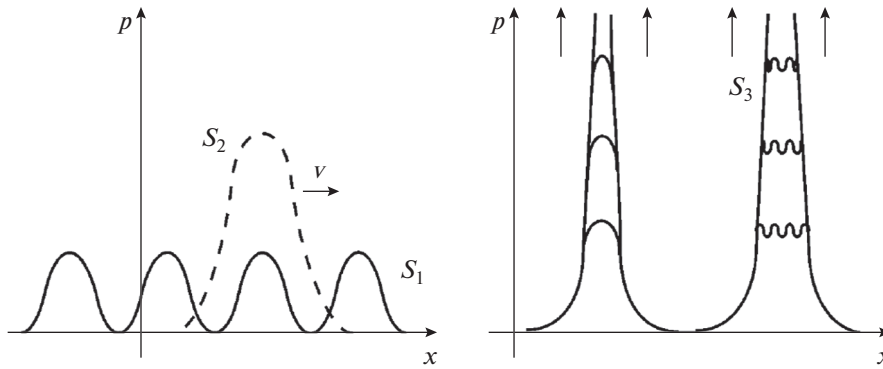


Рис. 1. Коллективные моды дефектов:  $S_1$  – моды бризерного типа;  $S_2$  – моды автоволнового типа;  $S_3$  – моды “обострения”.

лабораторными экспериментами и модельными представлениями о свойствах горных пород в необходимом диапазоне интенсивностей воздействий, что может позволить определить параметры, характеризующие взаимодействие инструмента с породой с учетом основных механизмов развития разрушения, контролирующих процесс бурения [14, 15]. К числу основных параметров MWD относятся скорость бурения проникания (rate of penetration – ROP) и плотность энергии (specific energy – SE). Последняя определяется как энергия, необходимая для извлечения единицы породы при воздействии на породу трехгранного индентора [16].

С учетом специфики процесса бурения значительный интерес представляют исследования многомасштабных механизмов разрушения в горных породах с использованием метода акустической эмиссии, получившего широкое применение для интерпретации стадийности разрушения и закономерностей скейлинга в сейсмичности [17–21].

Целью работы является изучение стадийности развития разрушения горных пород методом индентирования на основе анализа флуктуаций усилия индентирования и данных акустической эмиссии, обусловленных кинетикой поврежденности материала в очаге разрушения для последующего использования при идентификации параметров моделей и оптимизации процессов бурения.

## 2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ СКЕЙЛИНГА ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД. СТРУКТУРНО-СКЕЙЛИНГОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Масштабно-инвариантные закономерности разрушения горных пород отражены в эмпирических законах скейлинга в сейсмичности как последовательностей событий, сопровождающих землетрясения [1, 2]. Последние обнаруживают эффекты “самоорганизованной критичности”, “кластеризации” в пространстве и во времени,

отражающие иерархичность процесса формирования поврежденности [5]. Несмотря на сложность процессов, сопровождающих сейсмические события, например, последовательности афтершоков обнаруживают соответствие эмпирическим законам скейлинга [22–26]. Установлено, что частоты и магнитуды афтершоков удовлетворяют закономерностям скейлинга (закон Гутенберга–Рихтера). Закон Гутенберга–Рихтера отражает автомодельный характер числа последовательных афтершоков с магнитудой, превышающей заданную. Законы Бата и Омори характеризуют соответственно разности магнитуд между мейншоком и последующим афтершоком с максимальной магнитудой и затухание последовательности афтершоков.

Соответствие между законами скейлинга в сейсмичности и закономерностями развития поврежденности, как ансамбля взаимодействующих дефектов сдвига, установлено в работах [3, 4] при интерпретации кинетики поврежденности в рамках специального класса критических явлений в средах с дефектами – структурно-скейлинговые переходы. Последние сопровождаются формированием качественно-различных коллективных мод поврежденности, имеющих природу автомодельных решений уравнений кинетики поврежденности (конечно-амплитудные флуктуации бризерной природы, автоволновые структуры и диссипативные структуры “обострения” [5], рис. 1). Коллективные моды определяют связь эффектов кластеризации поврежденности с закономерностями скейлинга и являются основой для анализа экспериментальных данных (флуктуаций усилия индентирования и акустической эмиссии).

Кинетические уравнения для параметра плотности дефектов сдвига  $p$  (деформации сдвига, индуцированной дефектами) и параметра структурного скейлинга  $\delta$  (определяющего структурную “восприимчивость” среды к зарождению и росту дефектов сдвига) замыкают систему опре-

деляющих уравнений, связывающих механизмы структурной и механической релаксации, обусловленные динамикой взаимодействующих сдвигов [3]. Переходы через точки бифуркации  $\delta_c$  и  $\delta_*$  приводят к резкому изменению симметрии функции распределения вследствие возникновения ориентационно-выраженных макроскопических мод сдвига, имеющих различную пространственно-временную динамику, определяемую автомодельными решениями. Моды поврежденности, соответствующие различным типам поведения, представлены на рис. 1 в виде соответствующих “собственных форм” нелинейной задачи, связанных с автомодельными решениями определенного вида.

При  $\delta \rightarrow \delta_*$  решения изменяются от периодического (бризерного) типа ( $S_1$ ) к автоволновым модам ( $S_2$ ) триггерного типа  $p_{xz}(\zeta) = p_{xz}(x - Vt)$ , для которых амплитуда волны и ширина волнового фронта определяются параметрами неравновесного (структурно-скейлингового) перехода. Переход через точку бифуркации  $\delta_c$  сопровождается трансформацией автоволновых коллективных мод в пространственно-временные структуры нового типа, характеризующейся взрывообразным ростом плотности сдвигов на спектре пространственных масштабов (диссипативные структуры в режиме с “обострением”  $S_3$ ). В работе [3] показано, что развитая стадия кинетики  $p$  в пределе характерных времен  $\tau \rightarrow \tau_c$  ( $\tau_c$  – параметр решения) описывается автомодельным решением “сингулярного” типа  $p_A(x, \tau) \rightarrow \infty$  на спектре пространственных масштабов  $L_H = kL_f$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ), где  $L_f$  – так называемая фундаментальная длина. Полученные типы автомодельных решений соответствуют характерным сценариям “распада метастабильности” термодинамического потенциала – неравновесной свободной энергии материала с микросдвигами (free energy release [4]) для различных интервалов значений параметра структурного скейлинга и отражают важные закономерности “триггерности” в сейсмичности.

Последовательность инициирования структур обострения при трансформации автоволновых структур можно рассматривать как сценарий, соответствующий последовательности прешоков. Перенос импульса автоволновыми структурами может инициировать возбуждение структуры обострения за минимальные, близкие к  $\tau \sim \tau_c$  времена (резонансное возбуждение), на соответствующем “критическом” зародыше. Резонансное возбуждение структуры обострения за минимальные времена  $\tau \sim \tau_c$  может идентифицироваться с мейншоком. Инициирование мейншока формирует сейсмическую волну напряжений, способную при своем распространении реализовать обрат-

ный, наблюдаемый для прешоков, сценарий формирования диссипативных структур обострения, классифицируемый как последовательность афтершоков.

Таким образом, скейлинг в соотношениях Гутенберга–Рихтера может отражать возбуждение структур обострения в ходе структурно-скейлинговых переходов. Такие переходы сопровождаются формированием автоволновых мод деформации сдвига, трансформирующихся в структуры обострения на некоторых пространственных масштабах. Сценарий скейлинга при формировании последовательностей сейсмических событий, основанный на установленных классах автомодельных решений, позволяет предложить интерпретацию характерных временных масштабов в законе Омори, определяющем временное затухание афтершоков, и связь этих масштабов с характерным масштабом времени  $\tau_{sc}$  в законе Гутенберга–Рихтера [25]. Оценкой параметра  $\tau_{sc}$  может быть значение времени обострения  $\tau_c$ , превышение которого в случае афтершоков соответствует переходу от абсолютно неустойчивой ветви  $\delta < \delta_c$  к метастабильной  $\delta > \delta_c$ , но в ближайшей окрестности к значению  $\delta_c$  ( $\delta > \delta_c$ ). Характерное время затухания определяется кинетикой спиноподобного распада, сопровождающегося формированием автоволновых структур, амплитуда которых и скорость распространения определяются магнитудой  $m$ . Постоянная разница в магнитудах мейншока  $m_{ms}$  и максимального значения афтершока с магнитудой  $m_{as}^{max}$  (закон Бата) определяется величиной приращения напряжений, необходимых для перехода от автоволновой кинетики (при реализации структурно-скейлингового перехода в области метастабильности) к резонансному возбуждению структуры обострения. Переход между этими режимами, связанный с наличием различных асимптотик, реализуется по сценарию “самоорганизованной критичности” [24], что объясняет независимость в разнице магнитуд от амплитуды мейншока.

Частотно-магнитудный скейлинг (закон Гутенберга–Рихтера) для последовательности афтершоков может быть связан с количеством автоволновых структур, инициируемых нагружением с магнитудами, превышающими  $m$ , и трансформирующимися в структуры обострения при структурно-скейлинговом переходе. Таким образом, частота сейсмических событий в законе Гутенберга–Рихтера может быть связана с количеством диссипативных структур обострения, возбуждаемых на спектре пространственных масштабов. Частотный и временной скейлинг, отраженный в законах Гутенберга–Рихтера и Омори, является следствием коллективного поведения ансамблей сдвигов и формирования коллективных мод различной



Рис. 2. Внешний вид индентора испытательной машины.

сложности, локализованных на определенных пространственных масштабах. С последними могут быть связаны фрактальные закономерности частоты сейсмических событий и масштабы исследуемой области (аналог закона Гутенберга–Рихтера).

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ ИНДЕНТИРОВАНИЯ С *IN SITU* РЕГИСТРАЦИЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Испытания на индентирование проводили на универсальной нагружающей машине Shimadzu AGX Plus (Япония). Схема эксперимента представлена на рис. 3. Нагружение осуществляли индентором (рис. 2) из высокопрочной закаленной стали в виде прямоугольной пирамиды, установ-

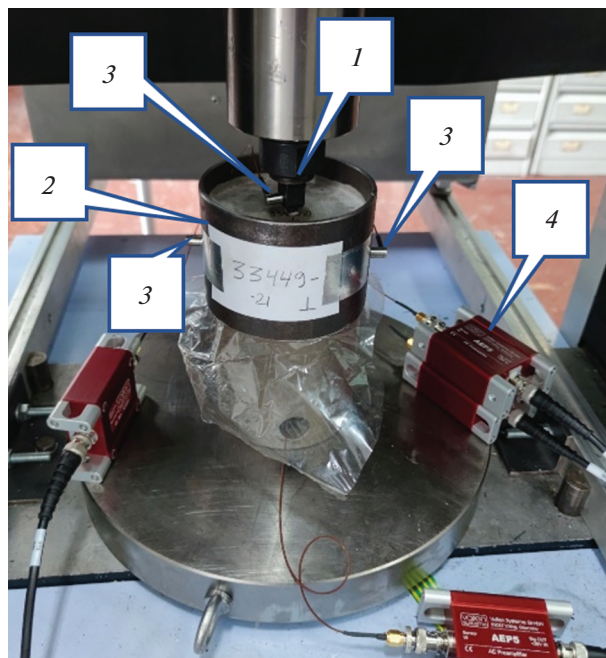


Рис. 3. Схема эксперимента: 1 – индентор, 2 – образец в обойме, 3 – датчики АЭ, 4 – усилители.

ленной на подвижной траверсе. Образцы горной породы терригенных коллекторов месторождения Восточной Сибири были предоставлены НТЦ “Газпромнефть”, г. Санкт-Петербург, и представляли собой цилиндры диаметром 30 мм и высотой 60 мм (рис. 4а). Для нагружения методом индентирования образец помещали в цилиндрическую стальную обойму для имитации стесненных условий деформации (рис. 4б). Образец размещали по центру обоймы, и пространство между образцом и стенкой обоймы заливали песчано-цементной смесью требуемой прочности. Скорость перемещения индентора составляла 0.3 мм/мин. В процессе эксперимента регистрировали перемещение и усилие индентора.

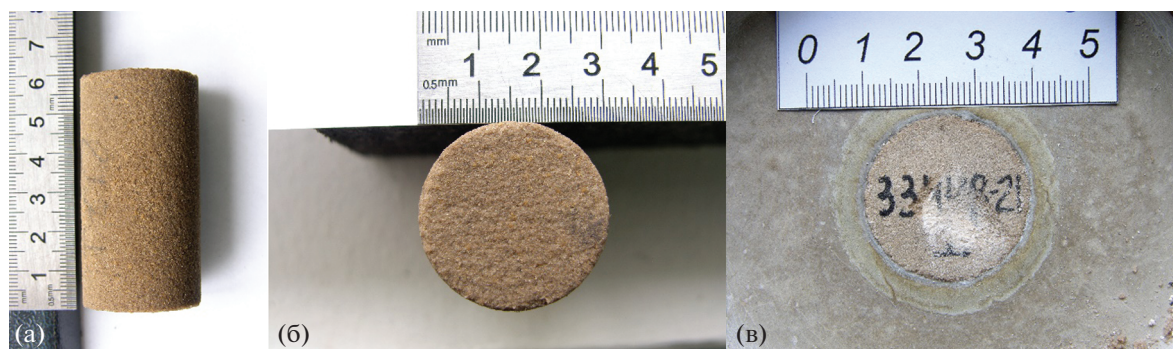


Рис. 4. Сборка для проведения эксперимента по индентированию: (а) образец горной породы; (б) поверхность образца до индентирования горной породы; (в) поверхность образца после испытания.

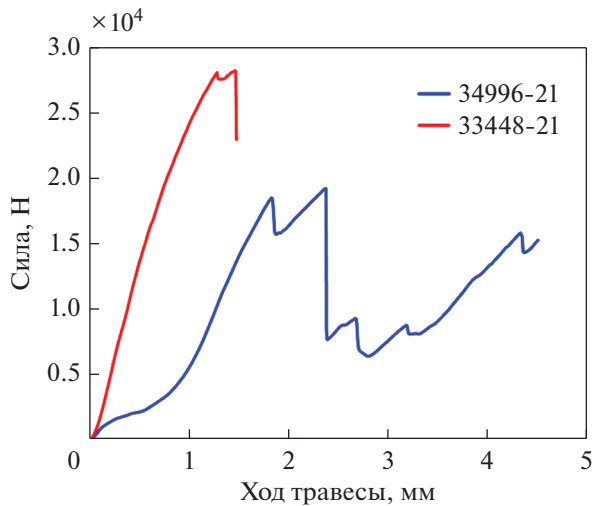


Рис. 5. Макрофлуктуации значения приложенной силы в процессе индентирования образцов № 34996-21 и № 33448-21.

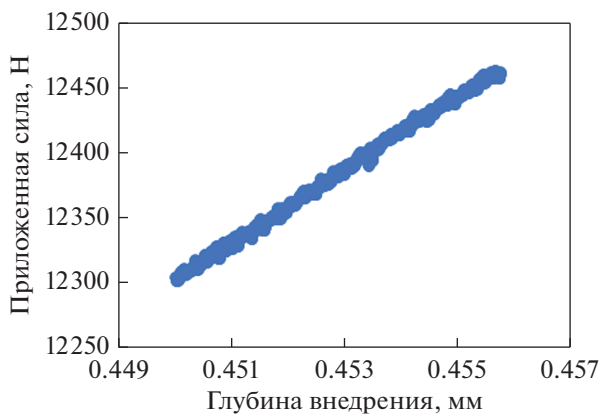


Рис. 6. Микрофлуктуации значения приложенной силы в процессе индентирования образца № 33448-21.

Частота дискретизации при испытаниях составляла 10 кГц, что позволяло при квазистатическом нагружении идентифицировать колебания по нагрузке с высоким временным разрешением. Также был проведен цикл испытаний с измерением сигналов акустической эмиссии с помощью системы Amsy Vallen 6 с использованием 4-х каналов. Микрофоны крепили к индентору и к боковым поверхностям обоймы.

В процессе нагружения наблюдали макроскопические (рис. 5) и микроскопические флуктуации (рис. 6) усилия индентирования. Макроскопические флуктуации были связаны с развитием макротрещин и образованием крупных фрагментов породы. Микроскопические флуктуации связаны с уплотнением породы, образованием мик-

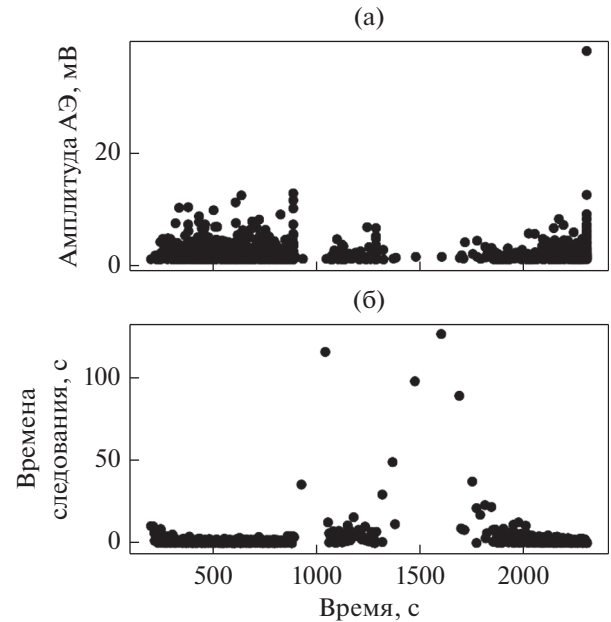


Рис. 7. Исходные данные АЭ для образца № 33449\_21: (а) амплитуда сигналов АЭ от времени; (б) временные интервалы между последующими событиями (времена следования) от времени.

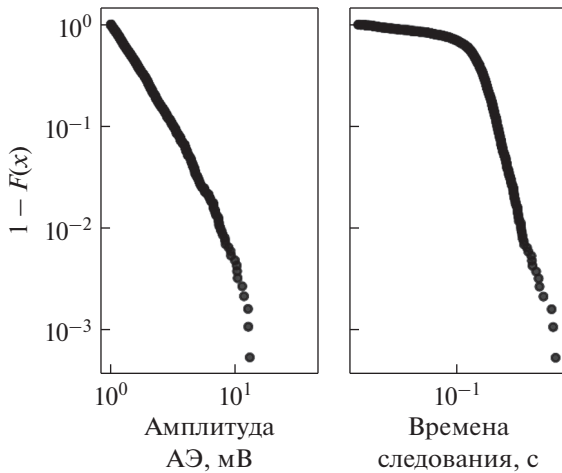
ротрещин, схлопыванием микропор, а также с жесткостью испытательной машины.

Флуктуации усилия индентирования были проанализированы путем вычисления корреляционной функции относительно тренда (Detrended Fluctuation Analysis – DFA) [27]. Значение показателя Херста (наклона корреляционной функции) близко к 1.5 и может быть идентифицировано как “белый” (слабокоррелированный) шум измерительных приборов или испытательной машины.

#### 4. РЕГИСТРАЦИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Исходные данные акустической эмиссии (АЭ), зарегистрированные в процессе индентирования с применением амплитудного порога, показаны на рис. 7. Распределения амплитуд и времен следования близки к степенной зависимости, что является отражением законов Гутенберга–Рихтера и Омори (рис. 8).

Обработку данных АЭ осуществляли с целью установления связи между стадийностью формирования очага разрушения, его распространения и установленными типами автомодельных решений, коллективных мод поврежденности, динамика которых определяет стадийность развития разрушения. Автомодельные решения определяют типы коллективных мод ансамблей дефектов, “подчиняющих” динамику нелинейной системы



**Рис. 8.** Распределения амплитуд и времен следования. По оси ординат изображена комплементарная кумулятивная функция распределения, определяемая как  $1 - F(x)$ , где  $F(x)$  – кумулятивная функция распределения.

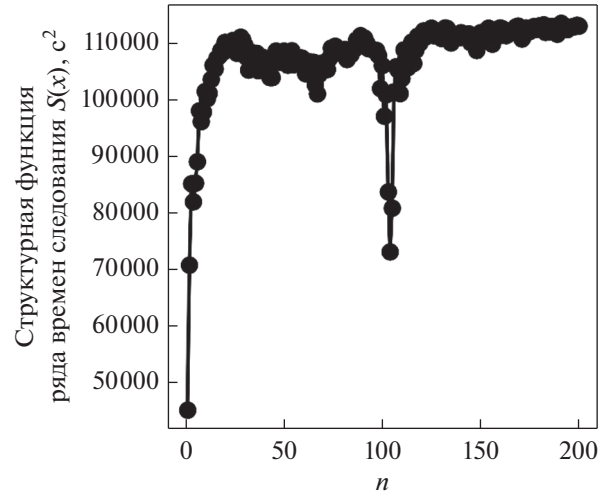
на различных стадиях развития поврежденности в очаге деформации. Пространственно-временная динамика системы в этом случае характеризуется резким изменением симметрии, определяемой типом и количеством коллективных мод. Последние определяют размерность аттрактора нелинейной системы и устанавливаются на основе анализа значений структурной функции:

$$S(n) = \sum_{i=1}^{N-n} [x(t_i + n\Delta t) - x(t_i)]^2, \quad (1)$$

где  $n$  – натуральные числа,  $n\Delta t$  – временная задержка,  $N$  – длина временного ряда  $x(t)$ . Если сигнал стохастический (например, фрактальное броуновское движение), то имеется скейлинг, определяемый степенным законом, где  $H$  – показатель Херста (фрактальная размерность стохастического процесса  $D = 2 - H$ ) [28].

Анализ акустического сигнала, инициированного процессами поврежденности в зоне индентирования в терминах времен следования, показывает наличие двух асимптотических режимов, соответствующих плато “насыщения” структурной функции (1) и определяющих симметрию (“размерность аттракторов”) системы, демонстрирующей детерминированный хаос [29]. Установлена важная особенность поведения структурной функции  $S(n)$ : разделение двух плато “насыщения” выраженным локальным минимумом (рис. 9), что можно интерпретировать как сосуществование двух режимов, соответствующих различным типам аттракторов (коллективным модам дефектов).

Аналогичная особенность проявляется при определении оптимальной размерности вложе-



**Рис. 9.** Зависимость структурной функции ряда времен следования от временной задержки.

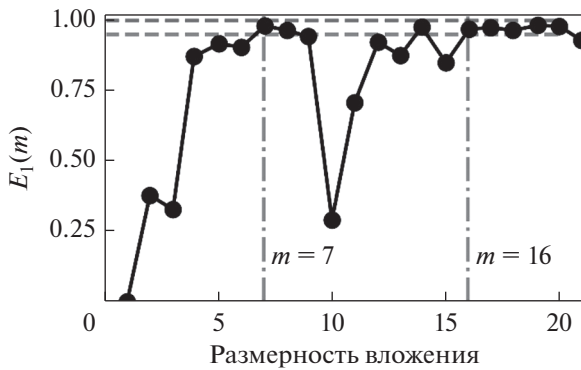
ния, определяемой как величина  $m$ , при которой функция  $E_1(m)$ :

$$E_1(m) = E(m+1)/E(m), \quad (2)$$

$$E(m) = \frac{1}{N - m\tau} \sum_{i=1}^{N-m\tau} \frac{\|x_i(m+1) - x_{n(i,m)}(m+1)\|}{\|x_i(m) - x_{n(i,m)}(m)\|} \quad (3)$$

выходит на насыщение [30]. Здесь прямыми скобками обозначено Евклидово расстояние,  $n(i, m)$  – целочисленный индекс, определяющий минимальное расстояние. В нашем случае на плато “насыщения” присутствует локальный минимум, что подтверждает предположение о существовании двух аттракторов, вложенных соответственно в пространства с размерностями 7 и 16 (значения определены по графику рис. 10). Показано, что эволюционное уравнение для параметра плотности дефектов (деформации, индуцированной дефектами сдвига) описывает кинетику “спиновального распада” в различных областях метастабильности термодинамического потенциала (скорости уменьшения свободной энергии материала с дефектами – free energy release) вследствие формирования коллективных мод ансамблей дефектов. Тип коллективных мод, определяемый видом метастабильности термодинамического потенциала, соответствует установленным автомодельным решениям эволюционного уравнения для параметра плотности дефектов – автоволновые структуры и диссипативные структуры обострения [5]. Они в свою очередь являются обобщенными координатами двух “аттракторов” нелинейной динамической системы “твердое тело с ансамблем дефектов сдвига”.

Применительно к явлениям сейсмической природы метастабильность неравновесного термодинамического потенциала и соответствующую



**Рис. 10.** Определения минимальной размерности фазового пространства (размерности вложения), как значения  $m$ , при котором функция  $E_1(m)$  выходит на насыщение, принимая значение близкое к единице. Наличие глубокого локального минимума определяет два значения  $m$ , при котором происходит насыщение  $E_1(m)$ .

щие коллективные моды дефектов позволяют предложить объяснение эффектов триггерности в сейсмичности и эмпирическим законам Гутенберга–Рихтера, Омори, Бата.

Автомодельные решения, описывающие коллективную динамику дефектов сдвига в горных породах, определяют закономерности кластеризации дефектов и, как следствие, стадийность процесса разрушения, фрагментации, инициирования и распространения трещин. Эти особенности стадийности развития поврежденности горных пород, включающие образование кластеров дефектов, соизмеримых с характерными размерами образцов для лабораторных испытаний. Это позволяет обосновать методологию лабораторных экспериментов, устанавливающих соответствие между схемой нагружения образцов, параметрами нагружения и универсальными (автомодельными) закономерностями стадийности поврежденности. Метод индентирования, совмещенный с прецизионной регистрацией флуктуаций усилия индентирования и данных акустической эмиссии, дает возможность анализировать стадийность развития разрушения, обусловленную кинетикой поврежденности материала в очаге разрушения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные результаты по динамике индентирования и обработке данных акустической эмиссии позволяют установить соответствие между типами коллективных мод ансамблей дефектов сдвига и стадийностью процесса разрушения в очаге деформации.

Существование двух “плато структурной функции”, соответствующих различным интервалам “времен задержки” и соответствующих им

“пространств вложения”, свидетельствует о проявлениях “детерминированного хаоса” для разных аттракторов динамической системы.

Первое плато и “размерность вложения” соответствуют спектру автомодельных решений – автоволновых структур, определяющих пространственно-временную динамику кластеров из ориентационно-упорядоченных дефектов сдвига различного масштаба.

Второе плато и “размерность вложения” определяют трансформацию автоволновых структур в моды диссипативных структур обострения, предшествующих формированию очага макроскопического разрушения. Минимум, разделяющий оба плато “структурной функции”, связан с резким изменением временных параметров, определяющих динамику автоволновых и обостряющихся структур.

Качественно различная динамика стадий развития разрушения подтверждается также результатами количественного рекуррентного анализа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-41-596013.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Corral Á. Long-term clustering, scaling, and universality in the temporal occurrence of earthquakes // *Phys. Rev. Letters*. 2004. V. 92. № 10. P. 108501.
2. Corral Á. Universal local versus unified global scaling laws in the statistics of seismicity // *Physica A: Stat. Mech. Appl.* 2004. V. 340. № 4. P. 590–597.
3. Naimark O.B. Defect induced transitions as mechanisms of plasticity and failure in multifield continua / In: *Advances in multifield theories of continua with substructure*. Ed.: G. Capriz, P. Mariano. Boston, Birkhauser. 2004. P. 75–114.
4. Naimark O., Bayandin Yu., Uvarov S., Bannikova I., Saveleva N. Critical Dynamics of Damage-Failure Transition in Wide Range of Load Intensity // *Acta Mechanica*. 2021. V. 232. P. 1943–1959.
5. Naimark O.B. Structural-scaling transitions and self-similar features of earthquake development // *Phys. Mesomechanics*. 2008. V. 11. № 2. P. 89–106.
6. Tanaino A.S. Rock classification by drillability. Part I: analysis of the available classifications // *J. Mining Sci.* 2005. V. 41. P. 541–549.
7. Hoseinie S.H., Ataiea M., Osanloo M. A new classification system for evaluating rock penetrability // *Intern. J. Rock Mech. Mining Sci.* 2009. V. 46. Is. 8. P. 1329–1340.
8. Reckmann H., Jogi P., Herbig C. Using dynamics measurements while drilling to detect lithology changes and to model drilling dynamics // *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE*. 2007. V. 2. P. 915–924.
9. Jeong H. Y., Cho J. W., Jeon S., Rostami J. Performance assessment of hard rock TBM and rock boreability us-



- ing punch penetration test // *Rock Mechanics and Rock Eng.* 2016. V. 49. Is. 4. P. 1517–1532.
10. *Anemangely M., Ramezanzadeh A., Tokhmehi B.* Development of a new rock drillability index for oil and gas reservoir rocks using punch penetration test // *J. Petroleum Sci. Eng.* 2018. V. 166. P. 131–145.
  11. *Handewith H.J.* Predicting economic success of continuous tunneling in hard rock // *Canadian Mining and Metallurgical Bulletin.* 1970. V. 63. Is. 697. P. 595.
  12. *Dollinger G.L., Handewith H.J., Breeds C.D.* Use of the punch test for estimating TBM performance // *Tunneling and Underground Space Technology.* 1998. V. 13. Is. 4. P. 403–408.
  13. *Long R., Sun S., Lian Z., Liao Y., Qin X.* A new technology for hard-rock tunneling based on drilling and hydraulic impact breaking // *International J. Mining Sci. Techn.* 2015. V. 25. Is. 6. P. 1053–1058.
  14. *Schunnesson H.* Rock characterisation using percussive drilling // *Intern. J. Rock Mechan. Mining Sci.* 1998. V. 35. Is. 6. P. 711–725.
  15. *Babaei Khorzoughi M., Hall R.* Processing of measurement while drilling data for rock mass characterization // *Intern. J. Mining Sci. Techn.* 2016. V. 26. Is. 6. P. 989–994.
  16. *Teale R.* The concept of specific energy in rock drilling // *Intern. J. Rock Mechan. Mining Sci. & Geomechanics Abstracts.* 1965. V. 2. Is. 2. P. 245.
  17. *Chen L.-H., Chen W.-C., Chen Y.-C.* Shear fracture evolution in rocks examined using a novel shear device associated with acoustic emissions // *Eng. Fracture Mechanics.* 2019. V. 210. P. 42–53.
  18. *Carpinteri A., Corrado M., Lacidogna G.* Heterogeneous materials in compression: Correlations between absorbed, released and acoustic emission energies // *Eng. Failure Analysis.* 2013. V. 33. P. 236–250.
  19. *Carpinteri A., Lacidogna G., Niccolini G., Puzzi S.* Critical defect size distributions in concrete structures detected by the acoustic emission technique // *Meccanica.* 2008. V. 43. Is. 3. P. 349.
  20. *Carpinteri A., Xu J., Lacidogna G., Manuello A.* Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures // *Cement and Concrete Composites.* 2012. V. 34. Is. 4. P. 529–537.
  21. *Carpinteri A., Corrado M., Lacidogna G.* Three different approaches for damage domain characterization in disordered materials: Fractal energy density, b-value statistics, renormalization group theory // *Mechan. Mater.* 2012. V. 53. P. 15–28.
  22. *Kisslinger C.* Aftershocks and fault-zone properties // In: *Advances in Geophysics.* Academic Press, San Diego. 1996. V. 38. P. 1–36.
  23. *Console R., Lombardi A.M., Muru M., Rhoades D.* Bath's law and the self-similarity of e-arthquakes // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. P. 2128–2136.
  24. *Console R., Murru M., Catali F.* Physical and stochastic models of earthquake clustering // *Tectonophysics.* 2006. V. 417. P. 141–153.
  25. *Helmstetter A., Sornette D.* Bath's law derived from the Gutenberg-Richter law and from aftershock properties // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. P. 2069–2074.
  26. *Utsu T., Ogata Y., Matsuura R.S.* The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity. // *J. Phys. Earth.* 1995. V. 43. № 1. P. 1–33.
  27. *Naimark O.* Energy release rate and criticality of multi-scale defects kinetics // *Intern. J. Fracture.* 2016. P. 1–9.
  28. *Provenzale A., Osborne A.R., Kirwan Jr.A.D., Bergamasco L.* The study of fluid parcel trajectories in large-scale ocean flows // *Nonlinear Topics in Ocean Physics.* 1991. V. 367. P. 401.
  29. *Заславский Г.М., Сагдеев П.З.* Введение в нелинейную физику: От маятника до турбулентности и хаоса. М.: Наука, 1988. 368 с.
  30. *Cao L.* Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series. *Physica D: Nonlinear Phenomena.* 1997. V. 110. P. 43–50.