

УДК 550.34, 539.37

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО СДВИГА В ТОНКОМ СЛОЕ ГРАНУЛИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА

© 2021 г. А. А. Остапчук^{1, 2, *}, Г. Г. Кочарян¹, К. Г. Морозова¹, Д. В. Павлов¹, Г. А. Гридин^{1, 3}

¹Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
г. Долгопрудный, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

*E-mail: ostapchuk.aa@idg.ras.ru

Поступила в редакцию 24.02.2021 г.

После доработки 31.03.2021 г.

Принята к публикации 01.04.2021 г.

Гранулированные среды определяют динамику многих природных систем, включая разломы земной коры. Статья посвящена лабораторному исследованию закономерностей сдвигового деформирования модельного разлома – слоя гранулированного материала, расположенного между блоками скальной породы. Модельный разлом является сложной динамической системой, для которой характерно наличие бифуркаций, и в процессе деформирования может происходить аperiodическое чередование актов быстрого и медленного проскальзывания. Скольжение блоков сопровождается излучением импульсов акустической эмиссии (АЭ), для выделения которых применялся информационный критерий Акаике. Динамика потока импульсов отражает закономерности эволюции механических характеристик разлома. В потоке импульсов выделяются подмножества, характеризующиеся различными скоростями нарастания амплитуды (*RA-value*) и различными скейлинговыми соотношениями. Применение алгоритма машинного обучения “случайный лес” демонстрирует возможность определения ожидаемой величины скорости скольжения по разлому и времени генерации как быстрых, так и медленных динамических событий на основе анализа каталогов акустических импульсов. Зарождение определенной моды проскальзывания предопределяется процессами самоорганизации, протекающими в центральной зоне разлома, а характеристики излучаемых акустических импульсов отражают эти процессы. Разрабатываемый подход к определению характеристик скольжения может оказаться перспективным для создания новых методов мониторинга напряженных массивов при ведении горных работ.

Ключевые слова: разлом, акустическая эмиссия, машинное обучение, лабораторный эксперимент.

DOI: 10.31857/S0002333721050136

ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным представлениям основным механизмом землетрясений в верхней коре является скольжение по тектоническим разломам [Кочарян, 2016; Scholz, 2002]. Интенсивность и периодичность актов проскальзывания существенно варьируются и зависят от строения разломов, *P–T*-условий, напряженно-деформированного состояния и т.д. [Кочарян и др., 2014; Burgmann, 2018]. Долгое время считалось, что отдельный сегмент разлома может реализовывать накопленную энергию деформации либо посредством только повторяющихся медленных мод скольжения, которые сопровождаются излучением тремора или низкочастотных землетрясений, либо быстрых динамических срывов, приводящих к обычным землетрясениям, либо непрерывного крипа. Появляется все больше доказательств

того, что на одном и том же сегменте разлома могут быть реализованы различные моды скольжения [Veedu et al., 2020; Ostapchuk et al., 2020b]. Незначительное изменение структуры зоны сместителя, нарушенности массива, флюидного режима и напряженно-деформированного состояния может привести к изменению режима скольжения [Kocharyan et al., 2021].

Считается, что активные разломы земной коры находятся в состоянии, близком к предельной прочности [Townend, Zoback, 2000]. При этом небольшие флуктуации напряженного состояния, связанные с самыми разными причинами, могут привести к возникновению динамической неустойчивости [Sobolev, 2011; Kocharyan et al., 2018b]. Переход участка разлома в состояние предельного равновесия проявляется, в том числе, в снижении сдвиговой жесткости [Кочарян,

Остапчук, 2011], что характерно для различных динамических систем [Родкин, Рундквист, 2017]. При этом динамика скольжения определяется отношением эффективной величины жесткости разлома к жесткости вмещающего массива [Lee-man et al., 2016]. Выявление области формирования очага землетрясения и контроль его развития является комплексной задачей, полного решения которой в ближайшее время ожидать не приходится. В настоящее время не существует инструментальных методов, позволяющих измерить действующие напряжения или статическую жесткость в зоне очага готовящегося землетрясения. Инструментальные наблюдения лишь иногда позволяют выявить косвенные проявления изменения режима скольжения [Frank et al., 2016; Kocharyan et al., 2018a; Ostapchuk et al., 2020b].

Лабораторные эксперименты являются одним из методов получения новой информации о закономерностях развития процессов скольжения. Начиная с работы [Brace, Byerlee, 1966], прерывистое скольжение контакта горных пород рассматривается многими исследователями как лабораторный аналог сейсмического цикла [Marone, 1998; Соболев, Пономарев, 2003, Кочарян, 2016; и др.]. Многие закономерности формирования и эволюции разломов исследуются путем контроля параметров АЭ [Соболев, Пономарев, 2003; Lherminier et al., 2019; и др.]. Эти методы можно считать определенным аналогом пассивного сейсмического мониторинга. Многие физические процессы, наблюдаемые в лабораторных экспериментах, статистически описываются соотношениями, подобными тем, что описывают сейсмический режим тектонического разлома (закон Гутенберга–Рихтера, закон Омори и др.) [Lei, 2003; Остапчук и др., 2016; Smirnov et al., 2019; Родкин, 2020]. Установлены многие закономерности проявления в регистрируемых колебаниях процессов разрушения [Соболев, Пономарев, 1999; 2003; Goebel et al., 2013; Пантелеев, 2020; и др.], инициирования подвижек внешними воздействиями [Kocharyan et al., 2018b], реакции системы на изменение напряженно-деформированного состояния [Смирнов, Пономарев, 2004; Bolton et al., 2020]. Исследованы микроструктурные процессы, сопровождающие формирование и эволюцию разломов и трещин [Веттегрень и др., 2017; Дамаскинская и др., 2018].

В условиях, когда динамика системы не может быть полностью описана системой дифференциальных уравнений, чтобы ее можно было смоделировать, или в случаях, когда физика процесса до конца не ясна, в последние годы стали применяться алгоритмы машинного обучения с целью моделирования и предсказания эволюции состояния динамической системы [Bergen et al., 2019]. Преимущество этих методов заключается в возможности обрабатывать большие многомерные

массивы данных, выявлять наиболее информативные параметры процесса и автоматически определять лучшие решения из всех возможных. Технология машинного обучения активно используется при исследовании динамики разломных зон, как в лабораторных экспериментах, так и в природе [Ren et al., 2020].

В настоящей работе внимание акцентировано на лабораторных исследованиях эволюции аналога зоны магистрального сместителя разлома — слоя гранулированного материала, расположенного между блоками скальной породы. Показано, что поведение разлома как сложной динамической системы не ограничивается режимом регулярного прерывистого скольжения. Гетерогенность фрикционных и структурных свойств модельного разлома приводит к формированию нерегулярного режима скольжения, когда динамические подвижки происходят аperiодически, и их динамические параметры различаются на несколько порядков. В экспериментах установлены акустические проявления различных режимов скольжения. На основе методов машинного обучения продемонстрирована возможность определения ожидаемой величины скорости скольжения разлома и момента наступления как быстрых, так и медленных динамических событий.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Ограничивая обсуждение относительно неглубокими разломами континентальной коры, можно полагать, что сдвиговые деформации при сейсмогенных подвижках локализуются в очень узкой центральной части разлома, которая сложена мелкодисперсным гранулированным материалом (англ. “*gouge*”); при этом закономерности скольжения по разлому длиной десятки/сотни километров определяются в значительной степени свойствами контакта частиц заполнителя разлома размером единицы–десятки–сотни микрон [Кочарян, 2016; Кочарян, Кишкина, 2020]. Узкая ширина слюев локализованного динамического сдвига делает эти объекты подходящими для исследования основных закономерностей их деформирования на лабораторных моделях.

Лабораторные эксперименты проводились на установке, в которой блок (1) под действием нормального и сдвигового усилий скользит вдоль поверхности раздела (2) (рис. 1). Контакт между поверхностями подвижного блока и основания заполнялся слоем гранулированного материала (3). Подвижный гранитный блок размером $8 \times 8 \times 3$ см³ располагался в центре гранитного основания длиной 2.5 м и сечением 10×10 см². Контактующие поверхности имели шероховатость глубиной 0.8–1.0 мм. Нормальное усилие составляло

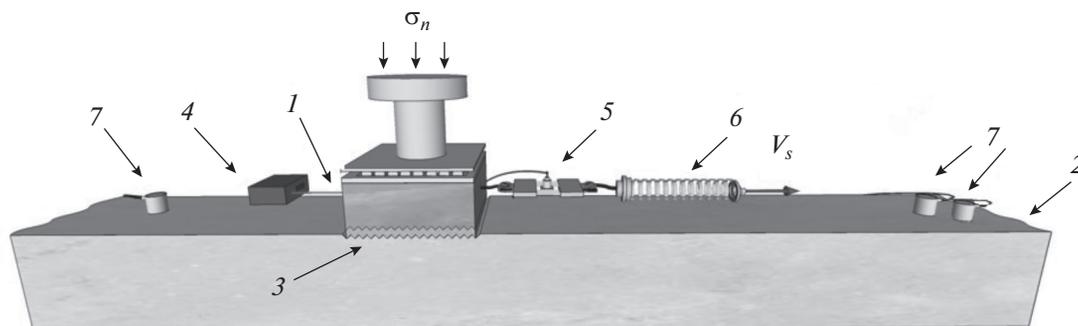


Рис. 1. Схема установки геомеханического стенда ИДГ РАН.

1 – подвижный блок, 2 – гранитное основание, 3 – слой заполнителя, 4 – датчик перемещения, 5 – датчик силы, 6 – пружинный элемент, 7 – датчики АЭ.

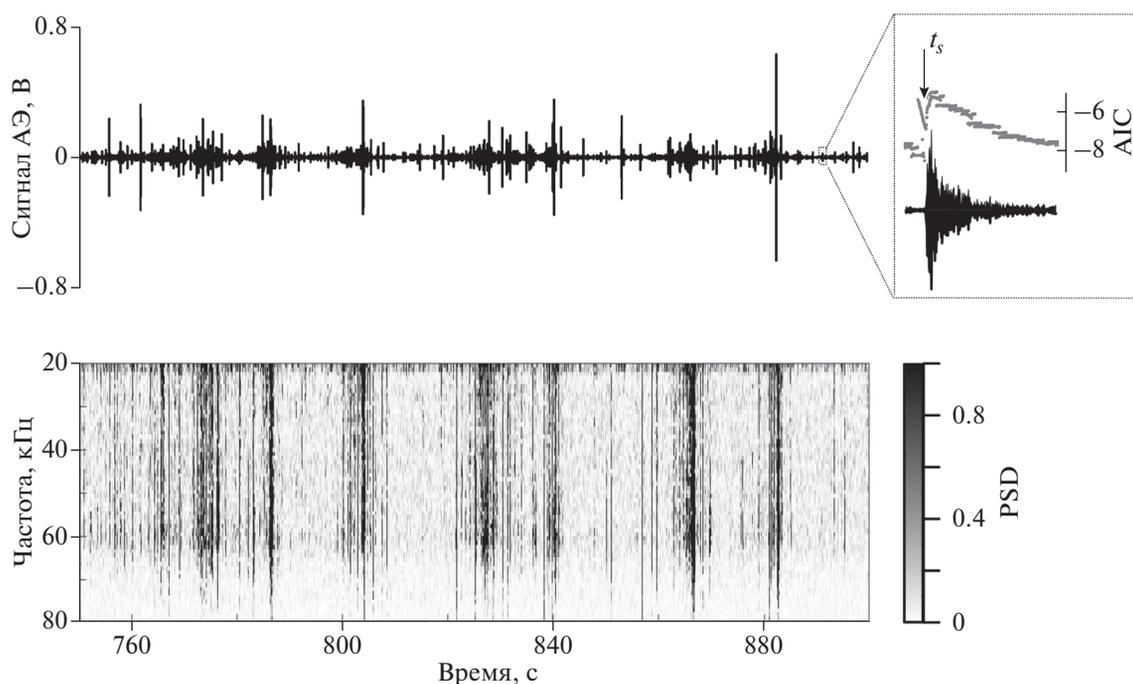


Рис. 2. Зарегистрированная запись АЭ и ее спектрограмма в диапазоне частот 20–80 кГц. На врезке показан информационный критерий Акаике (AIC) и момент t_s вступления P -волны импульса АЭ.

500 Н и прикладывалось с помощью системы грузов. Сдвиговое усилие прикладывалось через пружинный элемент (6) с жесткостью 55 кН/м, конец которого смещали с постоянной скоростью $V_s = 8$ мкм/с. В ходе эксперимента регистрировались перемещения блока и действующее на блок сдвиговое усилие.

В ходе экспериментов велась непрерывная регистрация АЭ с частотой дискретизации 1 МГц. Датчики АЭ VS30-V (7) (Vallen System, Germany) располагались на расстоянии 0.6 и 0.7 м от подвижного блока. Рабочий частотный диапазон датчиков АЭ 20–80 кГц. Пример записи АЭ представлен на рис. 2.

Изменение материального и гранулометрического состава заполнителя модельного разлома

позволяет реализовывать различные режимы скольжения: стабильное скольжение, регулярное прерывистое скольжение с различной амплитудой событий и нерегулярный режим скольжения, когда параметры динамических событий изменяются на несколько порядков. Пример регистрации кинематических параметров нерегулярного режима скольжения представлен на рис. 3. Типы режимов скольжения, реализованных в экспериментах, и их статистические параметры, представлены в таблице.

Динамика скольжения разлома

Режим регулярного стик-слипа характеризуется выраженной периодичностью и близкими па-

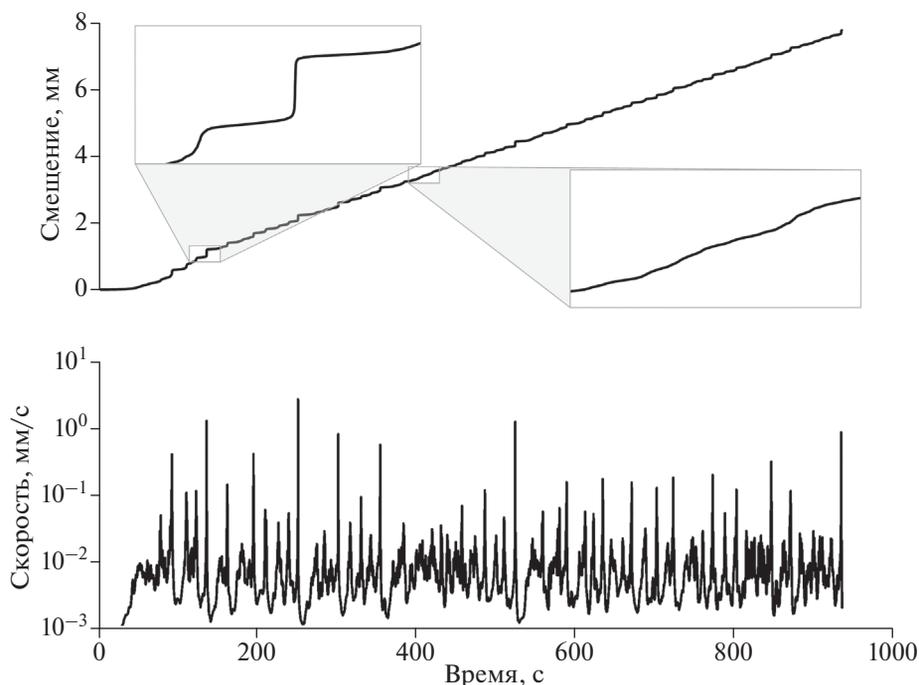


Рис. 3. Пример зависимости смещения и скорости смещения блока от времени при нерегулярном режиме скольжения. Левая вставка демонстрирует последовательность медленного и быстрого эпизода проскальзывания, правая – участок скольжения со слабыми вариациями скорости.

раметрами динамических событий (рис. 4). На стадии накопления потенциальной энергии блок смещается со скоростью существенно ниже скорости протяжки V_s . В связи с этим возникает рост величины “дефицита” перемещений, который можно определить следующим образом:

$$\delta X(t) = V_s t - x(t), \quad (1)$$

где $X(t)$ – положение блока относительно основания. По мере приближения к моменту динамического срыва скорость блока начинает постепенно увеличиваться. На стадии динамического проскальзывания скорость резко возрастает, а величина функции $\delta X(t)$ снижается до локального минимума. Наблюдается устойчивая картина вариаций параметров. Фазовый портрет явным об-

Таблица 1. Типы режимов скольжения и точность алгоритма машинного обучения

№ п/п	Заполнитель центральной части	Тип режима	Определение параметров скольжения на основе алгоритма машинного обучения	
			коэффициент детерминации алгоритма (R^2) определения скорости	наиболее вероятная ошибка определения момента динамического события
1	Кварцевый песок 200–315 мкм	Регулярный	0.68	0.3
2	Смесь кварцевого песка 200–315 мкм (80%) и стеклянных шариков 200–315 мкм (20%)	Регулярный	0.73	0.4
3	Смесь кварцевого песка 200–315 мкм (90%) и шамотной глины (10%)	Нерегулярный	0.33	1.4
4	Кварцевый песок 50–1000 мкм	Нерегулярный	0.16	3.2
5	Кварцевый песок 50–1000 мкм	Нерегулярный	0.20	2.9
6	Смесь кварцевого песка 50–1000 мкм (90%) и шамотной глины (10%)	Нерегулярный	0.18	2.2

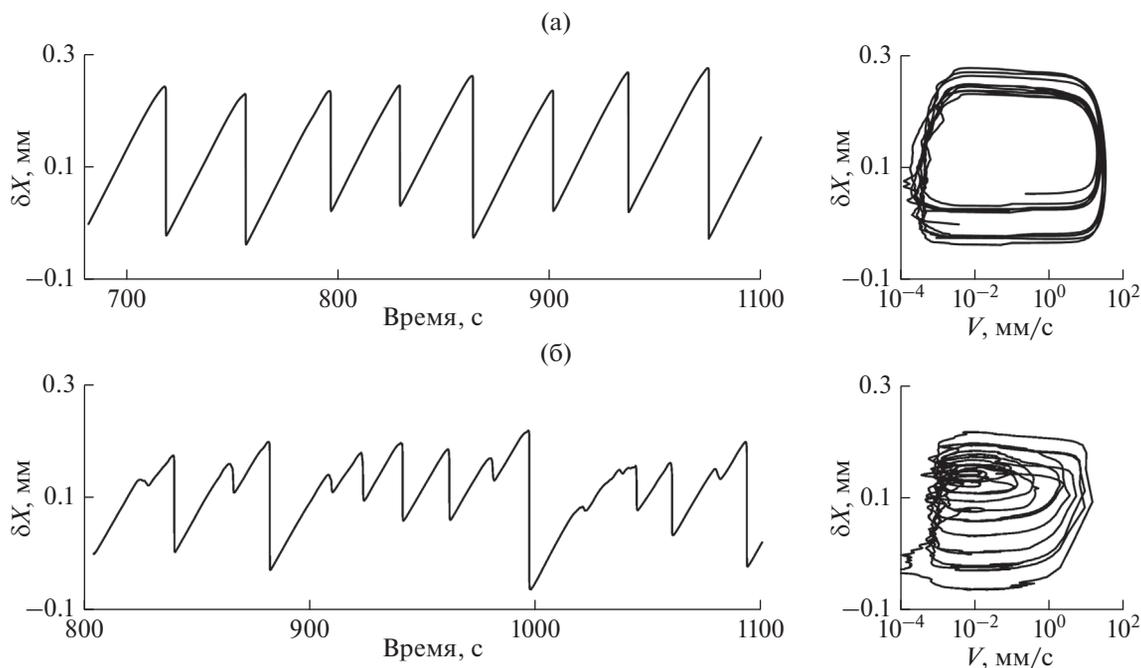


Рис. 4. Временные вариации дефицита перемещения (δX) при регулярном (а) и нерегулярном (б) режимах скольжения. Справа представлены фазовые портреты реализованных режимов скольжения блока.

разом демонстрирует регулярную повторяемость процесса (рис. 4). Траектория описывает предельный устойчивый цикл динамической системы, причем можно с высокой точностью определить области фазового пространства, соответствующие потере динамической устойчивости и началу динамического события. Для нерегулярного режима характерна более сложная картина изменения скорости скольжения. Наблюдаются как интервалы повторяющихся событий, так и интервалы квазистационарного скольжения, когда вариации дефицита перемещения $\delta X(t)$ относительно малы, а величина скорости близка к скорости протяжки V_s (рис. 3). Фазовый портрет такого режима представляет собой совокупность случайных круговых траекторий, охватывающих определенную область фазового пространства.

Вариация параметров АЭ

Скольжение модельного разлома сопровождается излучением большого количества импульсов АЭ. Для определения момента времени вступления P -волны импульса использовался информационный критерий Акаике (AIC) [Carpinteri et al., 2012]. В основе метода лежит предположение о том, что сигнал АЭ можно разделить на отдельные интервалы, каждому из которых соответствует определенный авторегрессионный (АР) процесс [Sleeman, van Eck, 1999]. AIC используется для определения порядка АР процесса, описыва-

ющего временной ряд. Момент времени, где AIC принимает минимальное значение, соответствует оптимальному разделению на интервалы, характеризующие различные стационарные процессы, и интерпретируется как момент вступления P -волны. В двухинтервальной модели AIC сигнала рассчитывается для скользящего окна длиной N точек и является функцией момента k , разделяющей два интервала [Maeda, 1985]:

$$AIC(k) = k \lg\{S(A[1, k])\} + (N - k - 1) \lg\{S(A[k + 1, N])\}. \quad (2)$$

На врезке рис. 2 приведен пример временной вариации параметра AIC , который использовался для определения момента вступления P -волны импульса АЭ. AIC рассчитывался для окна длиной $N = 500$ точек. Для каждого выявленного импульса были определены амплитуда (A) и скорость нарастания амплитуды до максимума RA -value, которая определялась согласно соотношению:

$$RA = \frac{t_m - t_s}{A}, \quad (3)$$

где t_s и t_m – моменты вступления P -волны и достижения максимальной амплитуды импульса.

На основе совокупности определенных параметров были сформированы каталоги импульсов АЭ, содержащие сведения о десятках тысяч импульсов, зарегистрированных при различных режимах скольжения.

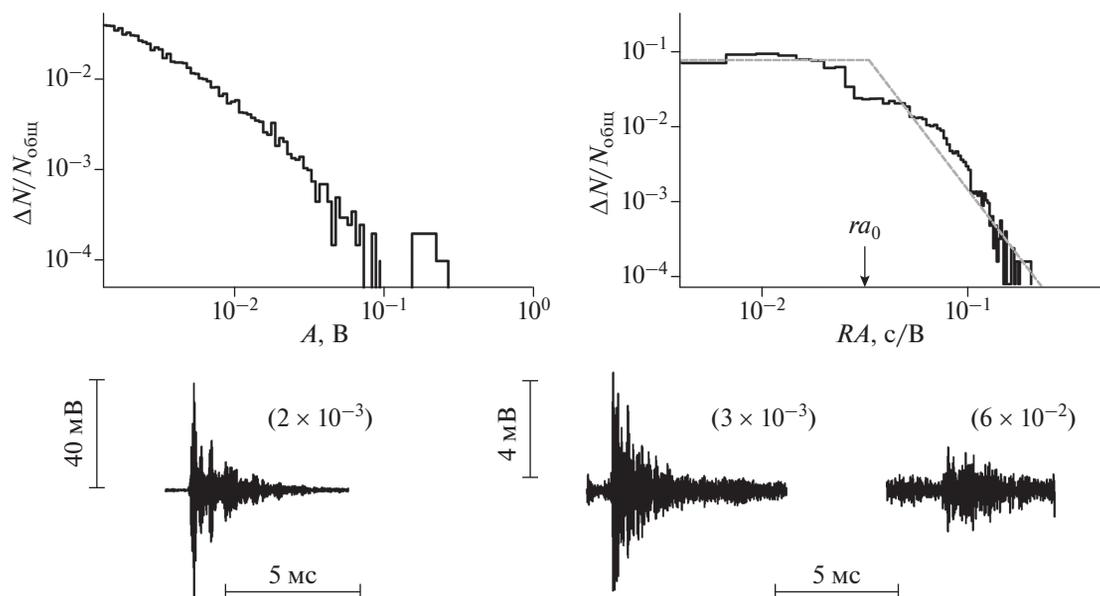


Рис. 5. Распределение импульсов АЭ по амплитуде (A) и скорости нарастания амплитуды до максимума (RA). Снизу представлены примеры импульсов АЭ с характерными значениями параметров (в скобках указано значение RA -value [с/В]).

Разломы земной коры как нелинейные динамические системы характеризуются свойством самоорганизованной критичности, и, соответственно, протекающие внутренние процессы самоорганизации характеризуются степенным законом распределения параметров [De Arcangelis et al., 2016]. На рис. 5 представлены распределения импульсов АЭ для регулярного режима скольжения.

На графике распределения импульсов АЭ по амплитуде выделяется две характерные области: $A > 0.1$ В характерна для импульсов АЭ, сопровождающих динамические срывы; $A < 0.1$ В – для импульсов АЭ, излучающихся на стадии подготовки динамических событий. Распределение по амплитуде в области амплитуд $A < 0.1$ В подчиняется степенному закону:

$$\lg(N) = a - b \lg\left(\frac{A}{A_0}\right), \quad (4)$$

где a , b – положительные константы и величина, $\lg\left(\frac{A}{A_0}\right)$ соответствует магнитуде импульса АЭ [Lei, 2003]. Параметр b является скейлинговым параметром, который характеризует процессы самоорганизации геосреды [Turcotte, 1999].

Распределение по параметру RA имеет более сложный вид. Выделяются две характерные области: при RA меньше характеристического значения ra_0 , наблюдается “плато”, в то время как при $RA \geq ra_0$ наблюдается степенной закон распределения. Стоит отметить, что величина ra_0 варьиру-

ется для различных условий проведения экспериментов и материального состава заполнителя. Для импульсов АЭ с $RA < ra_0$ характерна более высокая амплитуда и скейлинговый параметр $b \cong 1.3$, для импульсов АЭ с $RA \geq ra_0$ амплитуда импульсов существенно ниже и скейлинговый параметр $b \cong 2.0$. Существенное различие скейлинговых параметров двух выборок может указывать на формирование двух динамических подсистем, эволюция которых сопровождается излучением импульсов АЭ с $RA < ra_0$ и $RA \geq ra_0$ [Hadda et al., 2015; Ostapchuk, Morozova, 2020a].

На рис. 6 представлены временные вариации параметров АЭ. При регулярном прерывистом скольжении наблюдается периодичность изменения параметров. По мере приближения к моменту динамического срыва постепенно растет активность и доля высокоамплитудных импульсов.

Для нерегулярного режима скольжения временные вариации параметров имеют более сложный вид (рис. 7). На стадии увеличения нагрузки активность АЭ практически не изменяется, резкий рост наблюдается только при переходе разлома в метастабильное состояние, когда скорость скольжения близка к V_s . После акта проскальзывания активность снижается до фонового уровня $10-15$ с⁻¹. Особое внимание обращает на себя последовательность медленного и быстрого актов проскальзывания, произошедших во временном интервале 1030–1040 с. После медленного проскальзывания в окрестности $t \sim 1030$ с, несмотря на увеличение нагрузки, функция дефицита пере-

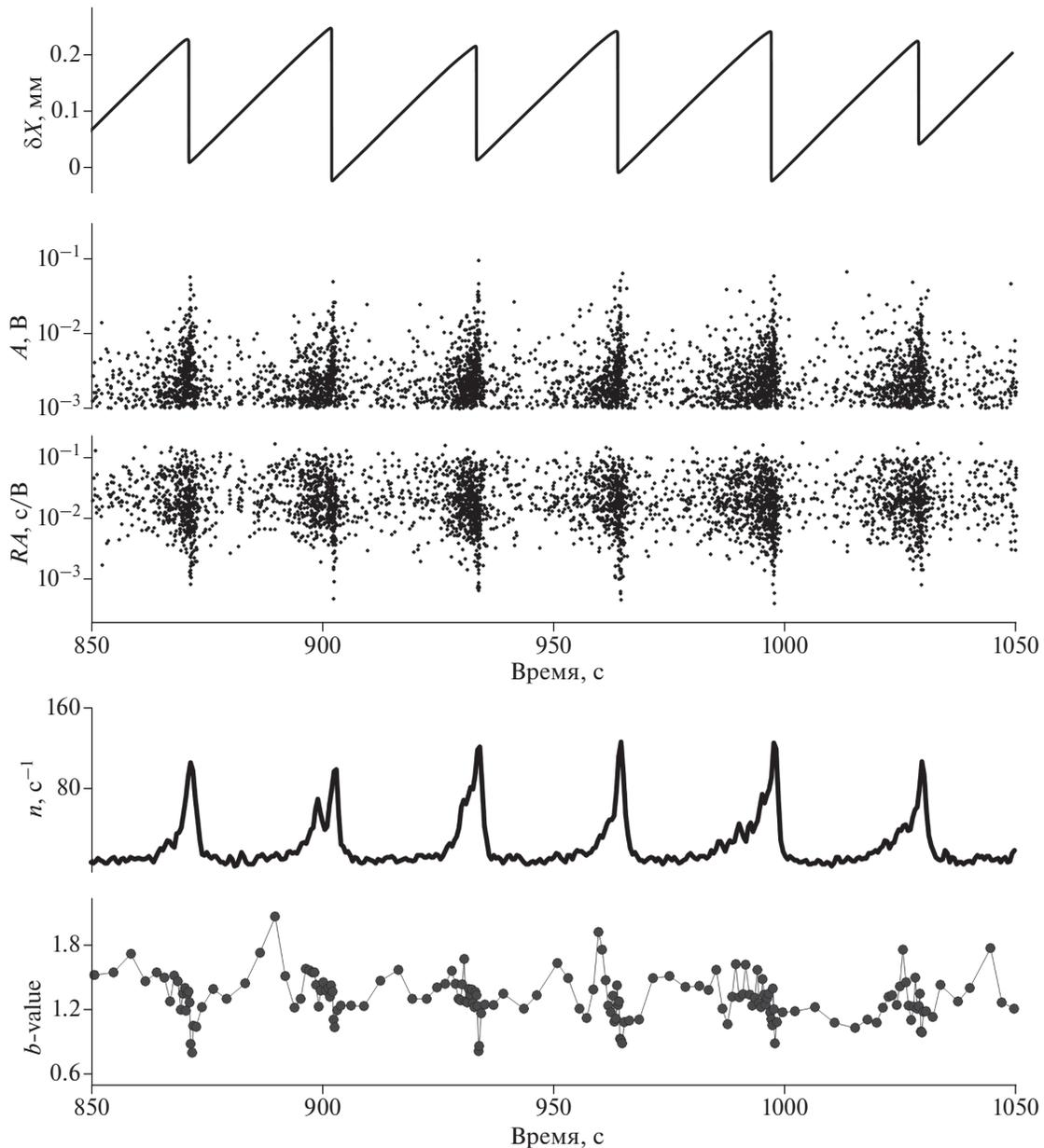


Рис. 6. Вариации параметров при регулярном прерывистом скольжении: δX – дефицит перемещения, определенный согласно соотношению (1); A и RA – амплитуда и скорость нарастания амплитуды; n – активность импульсов АЭ; b -value – скелинговый параметр, определяемый согласно соотношению (4).

мещения $\delta X(t)$ остается примерно постоянной – разлом скользит со скоростью, близкой к V_s – и в момент $t \sim 1040$ с происходит резкое проскальзывание. В отличие от остальных быстрых событий перед этим наблюдается снижение активности АЭ, что напоминает сейсмическое затишье перед землетрясениями [Wyss, Habermann, 1988]. Таким образом, при нерегулярном режиме скольжения можно наблюдать как рост, так и снижение активности АЭ перед актами проскальзывания.

Выявить акустоэмиссионные признаки эволюции модельного разлома в условиях нерегулярного режима скольжения позволило разделение всего потока импульсов АЭ на два кластера. Такая обработка позволила наблюдать регулярные вариации доли импульсов АЭ с $RA \geq ra_0$. По мере приближения к моменту динамического проскальзывания доля таких импульсов снижается, достигая минимума перед событием, а затем быстро возрастает.

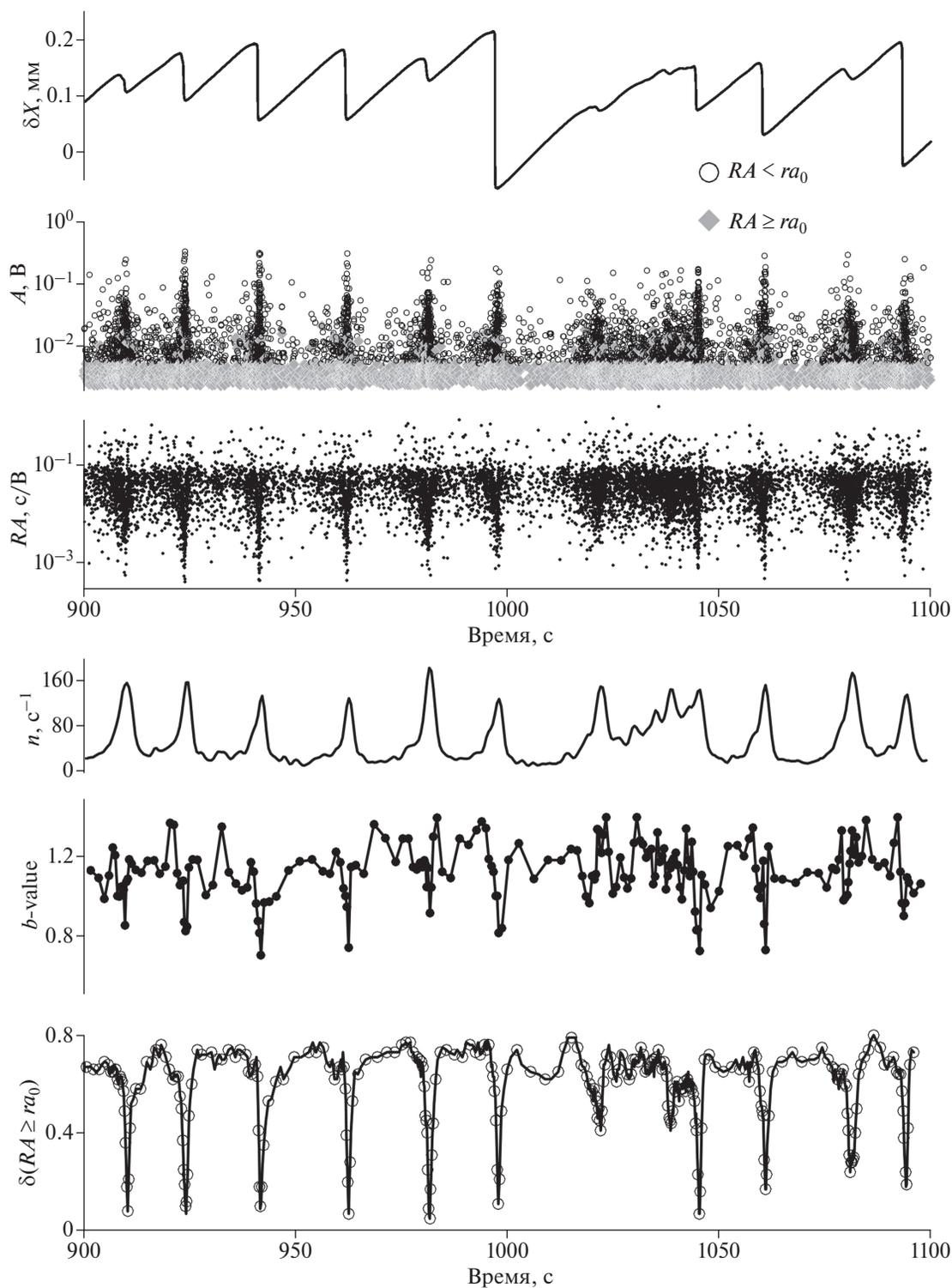


Рис. 7. Вариации параметров при нерегулярном режиме скольжения: δX – дефицит перемещения, определенный согласно соотношению (1); A и RA – амплитуда и скорость нарастания амплитуды; n – активность импульсов АЭ; b -value – скейлинговый параметр, определяемый согласно соотношению (4); δ – относительное количество импульсов АЭ кластера $RA \geq ra_0$.

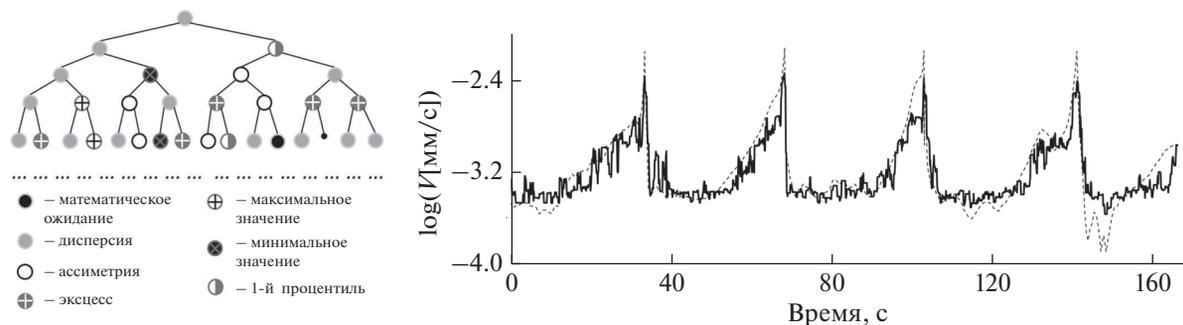


Рис. 8. Обучение алгоритма “случайный лес” — предсказания скорости скольжения блока. Слева представлен пример одного из деревьев решений и параметры, на основании которых принимается решение в определенном узле дерева. Справа представлена экспериментальная зависимость изменения скорости (пунктирная линия) и предсказанные значения (сплошная линия). Коэффициент детерминации $R^2 = 0.79$.

Определение скорости скольжения и момента динамического события

В условиях, когда развитие процесса сопровождается сложной картиной вариаций параметров, применение методов анализа многомерных рядов данных, одним из которых является машинное обучение, позволяет определить параметры состояния исследуемой динамической системы. Для определения ожидаемой скорости скольжения блока и момента старта динамического события был применен алгоритм “случайный лес” [Breiman, 2001]. Программная реализация алгоритма выполнена в среде MATLAB. Алгоритм предполагает построение совокупности независимых деревьев принятий решений на основе набора параметров. Каждое дерево независимо определяет значение параметра, а результатом “случайного леса” является значение параметра, усредненное по всем деревьям. Количество деревьев в модели было принято равным 300, минимальная глубина каждого дерева составляла 13. Если одно из деревьев решений является ошибочным, то усреднение по совокупности независимых деревьев минимизирует данную ошибку. Для определения скорости скольжения была рассмотрена непрерывная запись сигнала АЭ, а для определения момента старта событий использовался сформированный каталог импульсов АЭ.

Применение алгоритма машинного обучения “случайный лес” предполагает, что на первом этапе выполняется обучение модели на известных данных. Обучение заключается в установлении связи между входными статистическими параметрами и выходными значениями относительной скорости смещения блоков и/или времени до момента динамического события (рис. 8). При обучении не учитывается информация о прошлом или будущем состоянии разлома, в модели используются данные АЭ только в пределах выбранного временного окна. Обучение алгоритма проводилось на данных двух экспери-

ментов, в которых были реализованы регулярный и нерегулярный режимы скольжения. При обучении алгоритма определения скорости скольжения были использованы параметры сигнала АЭ, рассчитанные во временном окне 1 с с перекрытием 90%. В качестве параметров были взяты значения среднего и более высокие моменты, процентиля от 1-го до 9-го и от 91-го до 99-го с шагом 1%, максимальные и минимальные значения амплитуды сигнала.

На рис. 9 показан результат применения алгоритма восстановления скорости скольжения блока по данным регистрации акустического сигнала для последовательности событий скольжения, которые модель “случайного леса” никогда ранее не “видела”. По непрерывному сигналу АЭ достаточно успешно предсказывается скорость смещения блока как при регулярном, так и при нерегулярном режиме скольжения.

При определении времени до динамического срыва был использован сформированный каталог импульсов АЭ. Статистические параметры, которые характеризуют поток АЭ, сопровождающий процесс деформирования, были рассчитаны в скользящем окне шириной 100 импульсов с шагом 20 импульсов. В качестве параметров были использованы среднее, дисперсия, асимметрия, эксцесс, максимальные и минимальные значения амплитуды, активность, b -value, а также все представленные параметры для каждого из кластеров. На рис. 10 представлены результаты определения времени до динамического события на основе алгоритма “случайный лес” для различных режимов скольжения. Для режима регулярного прерывистого скольжения алгоритм демонстрирует высокую эффективность с учетом малой выборки параметров, используемых в модели, и коэффициент детерминации алгоритма составляет $R^2 = 0.73$. На межсейсмической стадии время до срыва определяется с достаточно большой ошибкой 5–10 с, однако по мере приближения к моменту динами-

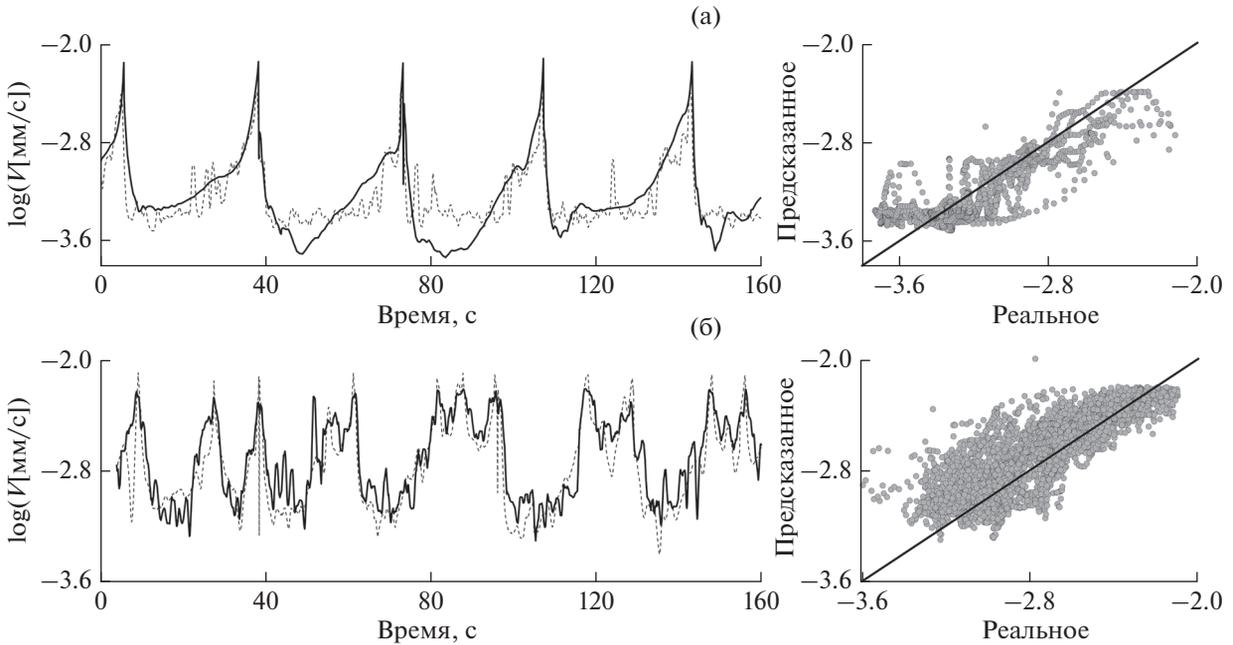


Рис. 9. Определение скорости скольжения блока при регулярном (а) и нерегулярном (б) режимах. Пунктирная линия – реальные значения скорости, сплошная линия – значения, предсказанные моделью. Справа представлено сравнение истинных и предсказанных значений. Прямая линия соответствует точному определению скорости. При регулярном режиме точность (коэффициент детерминации) алгоритма составляет $R^2 = 0.69$, при нерегулярном – $R^2 = 0.54$.

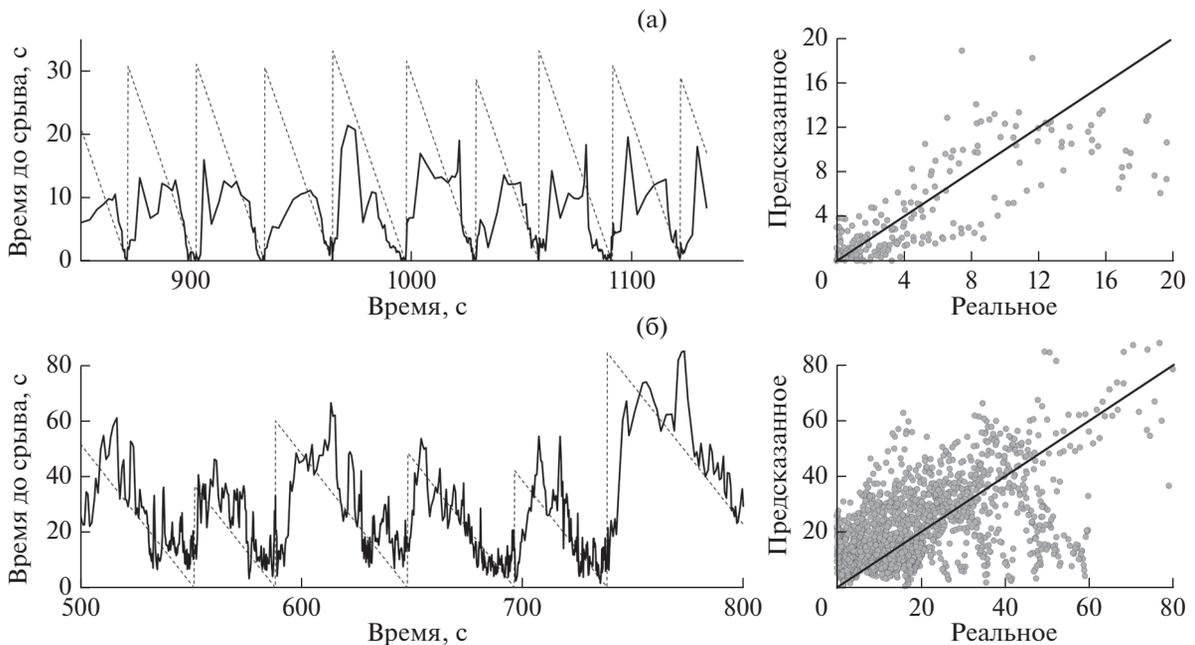


Рис. 10. Результаты определения времени до динамического события на основе алгоритма “случайный лес” при регулярном (а) и нерегулярном (б) режиме скольжения. Пунктирная линия – реальное время до срыва, сплошная – значение, предсказанное моделью. Справа представлено сравнение истинных и предсказанных значений. Прямая линия соответствует точному определению скорости. При регулярном режиме коэффициент детерминации $R^2 = 0.73$ при нерегулярном – $R^2 = 0.22$.

ческого срыва ошибка существенно снижается; наиболее вероятное значение ошибки определения времени динамического события составляет

0.4 с при длительности цикла порядка 30 с. В условиях нерегулярного режима скольжения алгоритм демонстрирует более низкую точность

определения времени до срыва. Коэффициент детерминации $R^2 = 0.20$ и наиболее вероятная ошибка определения времени до динамического события составляет 2.9 с, однако при этом отчетливо наблюдаются сейсмические циклы лабораторного разлома.

Реализованный алгоритм машинного обучения демонстрирует потенциальную возможность определения скорости скольжения и предсказания момента динамического события. Необходимо подчеркнуть, что в проведенных экспериментах обучение алгоритма на относительно коротких временных интервалах позволяет осуществлять успешный прогноз поведения системы в дальнейшем.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Выполненные исследования демонстрируют возможность рассмотрения модельного разлома как двухкомпонентной динамической системы. Хотя в проведенных экспериментах отсутствовала возможность визуализировать протекающие на микроуровне процессы самоорганизации, выявленные вариации АЭ согласуются с результатами численных [Hadda et al., 2015; Gao et al., 2019] и лабораторных исследований [Nauman et al., 2011] деформирования слоев зернистого материала. Скольжение модельного разлома контролируется процессами формирования и разрушения в центральной части конгломератов нагруженных частиц так называемых силовых цепочек [Sammis et al., 1987]. Занимая относительно малый объем, данные образования являются естественными границами других, относительно разгруженных, областей.

Единственным источником информации о состоянии локального участка разлома являются упругие колебания, инициированные процессами самоорганизации на микро- и мезоуровне. При этом, возможно, основная доля информации содержится в сейсмическом шуме. Анализ непрерывных записей шума с применением новых методов обработки позволяет использовать информацию, полученную от источников в зоне разлома, физика которых не до конца известна [Ren et al., 2020]. Рассмотрение в лабораторных экспериментах статистических характеристик АЭ позволяет с неплохой точностью практически в режиме реального времени определить текущие параметры скольжения разлома, а также время и магнитуду готовящегося динамического события.

Хранение и высокопроизводительная обработка непрерывных высокочастотных записей сейсмических и/или акустических колебаний требует больших вычислительных мощностей. В этой связи подход, основанный на формировании и анализе каталогов сейсмических событий, выглядит более приемлемым. Однако классиче-

ский сейсмический каталог, содержащий сведения о времени и магнитуде событий, целесообразно расширять, включая дополнительные параметры, характеризующие динамику косейсмического скольжения. В проведенных экспериментах при анализе нерегулярного режима скольжения особо информативным оказалось использование параметра *RA-value*. Вероятно, *RA-value* характеризует динамику межгранулярного скольжения аналогично тому, как это происходит при разрушении горных пород. В условиях развития процесса разрушения в образце горных пород скорость нарастания амплитуды уменьшается по мере развития трещины. Кроме того, при прогрессирующем разрушении доминирует низкочастотная компонента колебаний [Shiotani et al., 2001]. Вероятно, разрушение силовых цепочек сопровождается импульсами с резким вступлением, в то время как при изменении структурированности относительно разгруженных областей будут излучаться импульсы с большим *RA-value* [Michlmayr, Or, 2014; Gao et al., 2019].

В условиях стохастического процесса формирования динамических событий базовые представления о формировании в центральной зоне разлома двух динамических подсистем – нагруженных конгломератов гранул и относительно разгруженных областей – могут лежать в основе метода пассивного акустического контроля состояния модельного разлома. Выделение в потоке импульсов АЭ проявлений эволюции двух динамических подсистем делает возможным определение времени динамического события не только для регулярного, но и для нерегулярного режима скольжения.

Полученные результаты демонстрируют потенциально высокую эффективность использования методов машинного обучения при решении задач геомеханики разломов. Так, например, привлекательно выглядит возможность применения разрабатываемых подходов для ведения мониторинга опасности возникновения крупных землетрясений, связанных с ведением горных работ. Поскольку непрерывная регистрация сейсмического шума в условиях работающего предприятия малоперспективна, то получение информативных записей возможно лишь в течение коротких технологических перерывов. В этой связи, обученная глубокая нейронная сеть сможет эффективно моделировать многие процессы и предсказывать возможные катастрофические события.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Разработка концепции и проведение экспериментов выполнялись в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № АААА-А17-117 112350020-9 (Д.В.П., Г.А.Г., К.Г.М)) и проекта РФФИ № 20-55-53031 (Г.Г.К., Д.В.П.). Раз-

работка концепции анализа акустоэмиссионных данных и ее программная реализация выполнялась в рамках проекта РНФ № 20-77-10087 (А.А.О., К.Г.М.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Веттегрень В.И., Соболев Г.А., Пономарев А.В., Щербатов И.П., Мамалимов Р.И.* Наносекундная динамика разрушения поверхностного слоя гетерогенного нанокристаллического тела (песчаника) при трении // *Физика твердого тела*. 2017. Т. 59. № 5. С. 931–934.
- Дамаскинская Е.Е., Гиляров В.Л., Пантелеев И.А., Гафурова Д.Р., Фролов Д.И.* Статистические закономерности формирования магистральной трещины в структурно-неоднородном материале при различных условиях деформирования // *Физика твердого тела*. 2018. Т. 60. № 7. С. 1353–1357.
- Кочарян Г.Г.* Геомеханика разломов. М.: ГЕОС. 2016. 424 с.
- Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Новиков В.А., Остапчук А.А.* Медленные перемещения по разломам: параметры, условия возникновения, перспективы исследований // *Геодинамика и тектонофизика*. 2014. Т. 5. № 4. С. 863–891.
<https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0160>
- Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б.* Физическая мезомеханика очага землетрясения // *Физическая мезомеханика*. 2020. Т. 23. № 6. С. 9–24
- Кочарян Г.Г., Остапчук А.А.* Изменение жесткости разломной зоны в ходе сейсмического цикла // *Докл. РАН*. 2011. Т. 441. № 3. С. 384–387.
- Остапчук А.А., Павлов Д.В., Марков В.К., Крашенинников А.В.* Исследование сигналов акустической эмиссии при сдвиговом деформировании трещины // *Акустический журн*. 2016. Т. 62. № 4. С. 503–512.
- Пантелеев И.А.* Анализ тензора сейсмического момента акустической эмиссии: микромеханизмы разрушения гранита при трехточечном изгибе // *Акустический журн*. 2020. Т. 66. № 6. С. 654–668.
- Родкин М.В.* Типовая фор- и афтершоковая аномалия – эмпирика, интерпретация, применение // *Вулканология и сейсмология*. 2020. № 1. С. 640–76
- Родкин М.В., Рундквист Д.В.* Геофлюидогеодинамика. Приложение к сейсмологии, тектонике, процессам рудо- и нефтегенеза. Долгопрудный: издательский дом “Интеллект”. 2017. 288 с.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В.* Закономерности релаксации сейсмического режима по натурным и лабораторным данным // *Физика Земли*. 2004. № 10. С. 26–36.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Акустическая эмиссия и стадии подготовки разрушения в лабораторном эксперименте // *Вулканология и сейсмология*. 1999. № 4–5. С. 50–62.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
- Bergen K.J., Johnson P.A., de Hoop M.V., Beroza G.C.* Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience // *Science*. 2019. V. 363. eaau0323.
<https://doi.org/10.1126/science.aau0323>
- Brace W.F., Byerlee J.D.* Stick-slip as a mechanism for earthquakes // *Science*. 1966. Volume 153. P. 990–992.
- Breiman L.* Random Forests // *Machine Learning*. 2001. V. 45. P. 5–32.
<https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Bolton D.C., Shreedharan S., Rivière J., Marone C.* Acoustic energy release during the laboratory seismic cycle: Insights on laboratory earthquake precursors and prediction // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2020. V. 125. e2019JB018975.
<https://doi.org/10.1029/2019JB018975>
- Burgmann R.* The geophysics, geology and mechanics of slow fault slip // *Earth Planet. Sci. Lett*. 2018. V. 495. P. 112–134.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.062>
- Carpinteri A., Xu J., Lacidogna G., Manuello A.* Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures // *Cem. Concr. Compos*. 2012. V. 34. № 4. P. 529–537.
- de Arcangelis L., Godano C., Grasso J.R., Lippiello E.* Statistical physics approach to earthquake occurrence and forecasting // *Phys. Rep*. 2016. V. 628. P. 1–91.
<https://doi.org/10.1016/j.physrep.2016.03.002>
- Frank W., Shapiro N.M., Husker A. et al.* The evolving interaction of lowfrequency earthquakes during transient slip // *Sci. Adv*. 2016. V. 2. № 4. e1501616.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1501616>
- Gao K., Guyer R., Rougier E. et al.* From stress chains to acoustic emission // *Phys. Rev. Lett*. 2019. V. 123. 048003.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.048003>
- Goebel T.H.W., Schorlemmer D., Becker T.W. et al.* Acoustic emissions document stress changes over many seismic cycles in stick-slip experiments // *Geophys. Res. Lett*. 2013. V. 40. P. 2049–2054.
<https://doi.org/10.1002/grl.50507>
- Hadda N., Nicot F., Wan R., Darve F.* Microstructural self-organization in granular materials during failure // *C. R. Mec*. 2015. V. 343. № 2. P. 143–154.
<https://doi.org/10.1016/j.crme.2014.09.009>
- Hayman N.W., Ducloué L., Foco K.L. et al.* Granular controls on periodicity of stick-slip events: kinematics and force-chains in an experimental fault // *PAGEOPH*. 2011. V. 168. P. 2239.
<https://doi.org/10.1007/s00024-011-0269-3>
- Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V.* Traces of Laboratory Earthquake Nucleation in the spectrum of ambient noise // *Sci. Rep*. 2018a. V. 8. P. 10764.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-28976-9>
- Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V.* Fault Sliding Modes – Governing, Evolution and Transformation. Multiscale Biomechanics and Tribology of Inorganic and Organic Systems / Eds. G.P. Ostermeyer, V.L. Popov, E.V. Shilko, O.S. Vasiljeva. Springer Tracts in Mechanical Engineering. Springer. Cham. 2021.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-60124-9_15
- Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Markov V.K.* The effects of weak dynamic pulses on the slip dynamics of a laboratory fault // *Bull. Seismol. Soc. Am*. 2018b. V. 108. № 5B. P. 2983–2992.
<https://doi.org/10.1785/0120170363>
- Leeman J., Saffer D., Scuderi M. et al.* Laboratory observations of slow earthquakes and the spectrum of tectonic fault slip modes // *Nat. Commun*. 2016. V. 7. P. 11104.
<https://doi.org/10.1038/ncomms11104>
- Lei X.* How does asperities fracture? An experimental study of unbroken asperities // *Earth Planet. Sci. Lett*. 2003.

- V. 213. P. 347–359.
[https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00328-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00328-5)
- Lherminier S., Planet R., Levy dit Vehel V. et al.* Continuously Sheared Granular Matter Reproduces in Detail Seismicity Laws // *Phys. Rev. Lett.* 2019. V. 122. P. 218501.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.218501>
- Maeda N.* A method for reading and checking phase times in autoprocesing system of seismic wave data // *Zisin = Jishin.* 1985. V. 38. P. 365–379.
- Marone C.* Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting // *Annu. Rev. Earth. Planet. Sci.* 1998. V. 26. P. 643–696.
<https://doi.org/10.1146/annurev.earth.26.1.643>
- Michlmayr G., Or D.* Mechanisms for acoustic emissions generation during granular shearing // *Granular Matter.* 2014. V. 16. P. 627–640.
<https://doi.org/10.1007/s10035-014-0516-2>
- Ostapchuk A.A., Morozova K.G.* On the mechanism of laboratory earthquake nucleation highlighted by acoustic emission // *Sci. Rep.* 2020a. V. 10. P. 7245.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-64272-1>
- Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Ruzhich V.V. et al.* Seismic-acoustics of a block sliding along a fault // *Pure Appl. Geophys.* 2020b. V. 117. P. 2641–2651.
<https://doi.org/10.1007/s00024-019-02375-1>
- Ren C.X., Hulbert C., Johnson P.A., Rouet-Leduc B.* Machine learning and fault rupture: a review // *Adv. Geophys.* 2020. V. 61. P. 57–107.
<https://doi.org/10.1016/bs.agph.2020.08.003>
- Sammis C., King G., Biegel R.* The kinematics of gouge deformation // *PAGEOPH.* 1987. V. 125. № 5. P. 777–812.
- Scholz C.H.* The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge: Cambridge University Press. 2002. 504p.
- Shiotani T., Ohtsu M., Ikeda K.* Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation // *Constr. Build. Mater.* 2001. V. 15. № 5–6. P. 235–246.
[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00073-8](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00073-8)
- Sleman R., van Eck T.* Robust automatic P-phase picking: an on-line implementation in the analysis of broadband seismogram recordings // *Phys. Earth Planet. Interiors.* 1999. V. 113. P. 265–275.
- Sobolev G.A.* Seismicity dynamics and earthquake predictability // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011. V. 11. P. 445–458.
<https://doi.org/10.5194/nhess-11-445-2011>
- Smirnov V.B., Ponomarev A.V., Stanchits S.A. et al.* Laboratory Modeling of Aftershock Sequences: Stress Dependences of the Omori and Gutenberg–Richter Parameters // *Izv., Phys. Solid Earth.* 2019. V. 55. № 1. P. 124–137.
<https://doi.org/10.1134/S1069351319010105>
- Townend J., Zoback M.D.* How faulting keeps the crust strong // *Geology.* 2000. V. 28. № 5. P. 399–402.
- Turcotte D.L.* Self-organized criticality // *Rep. Prog. Phys.* 1999. V. 62. P. 1377.
<https://doi.org/10.1088/0034-4885/62/10/201>
- Veedu D.M., Giorgetti C., Scuderi M. et al.* Bifurcations at the stability transition of earthquake faulting // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. e2020GL087985.
<https://doi.org/10.1029/2020GL087985>
- Wyss M., Habermann R.E.* Precursory seismic quiescence // *PAGEOPH.* 1988. V. 126. P. 2–4.
<https://doi.org/10.1007/BF00879001>

Dynamic Shear Formation in a Thin Granular Layer

A. A. Ostapchuk^{a, b, *}, G. G. Kocharyan^a, K. G. Morozova^a, D. V. Pavlov^a, and G. A. Gridin^{a, b}

^a*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

^b*Moscow Institute of Physics and Technology (State University),
Dolgoprudnyi, 141701 Russia*

^c*Faculty of Geology, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: ostapchuk.aa@idg.ras.ru*

Granular media determine the dynamics of many natural systems including faults in the Earth's crust. The paper addresses the laboratory study of shearing deformation of a model fault simulated by a layer of granular material located between rock blocks. The model fault is a complex dynamic system characterized by the presence of bifurcations, which may deform with aperiodic alternation of slow and fast slip events. The rock-block sliding is accompanied by the generation of acoustic emission (AE) pulses which are identified based on the Akaike information criterion. The dynamics of the AE rate reflects the evolution of the mechanical properties of the fault. In the flow of the AE pulses, the subsets characterized by the different rise time/amplitude rates (*RA*-values) and different scaling relations are identified. The use of the random forest machine learning algorithm demonstrates the possibility to determine the expected sliding velocity on the fault and the generation time of both the fast and slow dynamic events based on the analysis of acoustic emission catalogs. The emergence of a certain slip mode is predetermined by the self-organization processes that take place in the central fault zone, and the characteristics of the emitted acoustic pulses reflect these processes. The developed approach to the determination of sliding parameters can be promising for the creation of new methods for monitoring the stressed massifs during mining.

Keywords: fault, acoustic emission, machine learning, laboratory experiment