



Фильтрация техногенных помех при акустико-эмиссионном мониторинге

Х.Ф. Махмудов¹✉, П.И. Афанасьев²✉

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Резюме: В рамках выполнения работ было установлено, что среди зарегистрированных сигналов большинство являются результатом техногенных шумов, были предложены критерии фильтрации, общие для всей системы акустико-эмиссионного мониторинга. В качестве параметров фильтрации были выбраны амплитуда и длительность акустико-эмиссионного сигнала, а в качестве критериев – их соответствие физически обоснованным распределениям. При выполнении нынешнего этапа работ этого оказалось недостаточно, потребовалась оценка работоспособности и зашумленности уже отдельных каналов. Результаты такой оценки, проводимой для различных суточных циклов регистрации, продемонстрированы на примере суточного файла, включающего более 3 млн записей. Показано, что одним из важнейших решений при настройке системы акустической эмиссии является выбор частотного фильтра. Отмечено, что при использовании метода акустической эмиссии следует помнить, что каждый объект контроля имеет свои уникальные свойства.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, акустико-эмиссионный мониторинг, породный массив, разрушение горных пород, график повторяемости, техногенные шумы, фильтрация техногенных шумов

Благодарности: Авторы выражают благодарность В.Н. Савельеву, Н.Г. Томилину за плодотворное обсуждение результатов, а также сотрудникам ФГУП «ГХК» Росатом В.Н. Медведеву, С.Ю. Круглову за помощь в проведении полевых исследований и подготовке первичных данных для анализа.

Для цитирования: Махмудов Х.Ф., Афанасьев П.И. Фильтрация техногенных помех при акустико-эмиссионном мониторинге. *Горная промышленность*. 2023;(S1):142–149. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-142-149>

Filtering of man-induced interference during acoustic emission monitoring

K.F. Makhmudov¹✉, P.I. Afanasev²

¹ Ioffe Institute, St. Petersburg, Russian Federation

² St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

✉ h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Abstract: During the work execution it was found that the majority of the recorded signals were the result of man-induced noise, thus the filtering criteria common to the entire acoustic emission monitoring system were proposed. The amplitude and duration of the acoustic emission signal were chosen as the filtering parameters, while their correspondence to physically valid distributions was selected as the criteria. In the current phase of the work, this turned out to be insufficient, and an assessment of the performance and noise level of individual channels was required. The results of such an assessment, carried out for different daily recording cycles, are demonstrated using the example of a daily file containing more than 3 million recordings. Selection of the frequency filter was shown to be one of the most important decisions in tuning the acoustic emission system. It is noted that when using the acoustic emission method it should be remembered that each control object has its own unique properties.

Keywords: acoustic emission, acoustic emission monitoring, rock mass, rock failure, relationship plot, man-induced noise, filtering of man-induced noise

Acknowledgements: The authors are grateful to V.N. Savelyev, N.G. Tomilin for fruitful discussion of the results, as well as to V.N. Medvedev, S. Yu. Kruglov, employees of GHK Rosatom Federal State Unitary Enterprise, for their assistance in field studies and preparation of the primary data for analysis.

For citation: Makhmudov K.F., Afanasev P.I. Filtering of man-induced interference during acoustic emission monitoring. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):142–149. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-142-149>



Введение

За последние годы в Российской Федерации произошла активизация процессов освоения подземного пространства [1–3]. Но современное состояние и проблемы законодательного регулирования, метрологического обеспечения и стандартизации в области неразрушающего контроля требуют и устанавливают определенные требования в области стандартизации неразрушающего контроля [4]. Также рассматриваются различные подходы к сертификации оборудования и методик [5], включая погрешность измерения и разработку метода расчета резонансных частот (режимов колебаний) [6; 7], особенно в полевых условиях [8; 9], которые остаются актуальными и не до конца решенными. Причиной этого является уникальность и особенности различных сооружений и различных операций по добыче полезных ископаемых [10–12]. Работа по фильтрации техногенных помех при мониторинге акустической эмиссии проводилась в одном из таких уникальных подземных сооружений (ФГУП «Горно-химический комбинат» – предприятие Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», г. Железногорск) [13–15].

В настоящее время развиты и широко используются методы контроля породных массивов, основанные на регистрации упругого энерговыделения при разрушении горных пород в герцевом диапазоне [16–18]. Только в России уже десятилетия успешно эксплуатируются шахтные сейсмологические системы в Североуральске, Норильске, на рудниках Мурманской области (АО «Апатит») [19–21] и т.д. Использование килогерцового диапазона (акустическая эмиссия, АЭ) для этих же целей встречает значительное сопротивление в основном по причине наличия техногенных акустических шумов, всегда присутствующих на горном предприятии. Источником таких шумов могут служить вибрации от транспорта, работы мощных (вентиляционных) установок и перфораторов, электромагнитные наводки от высоковольтных трансформаторов и т.п.

Фильтрация базы данных акустико-эмиссионных сигналов

При фильтрации техногенных шумов возникают следующие проблемы:

- их амплитудно-частотные параметры сравнимы с параметрами полезных АЭ сигналов;
- количество шумовых сигналов многократно превосходит число полезных АЭ сигналов, их суммарное число N (табл. 1) за сутки достигает ~ 1,5 млн (по одному каналу ~ 150000), что делает практически невозможной экспертизу каждого сигнала в ручном режиме;
- уникальным является не только шумовой «портрет» каждого горного предприятия, но может оказаться уникальным шумовой «портрет» и для отдельных его зон (блоков), и на какой глубине [22–24].

Вышесказанное определяет выбор статистического подхода [25–26] к анализу зарегистрированной исходной базы данных (ИБД) акустических сигналов, который должен основываться на физических закономерностях процесса разрушения горных пород [27–30]. Одним из таких фундаментальных законов является график повторяемости (1), устанавливающий связь между

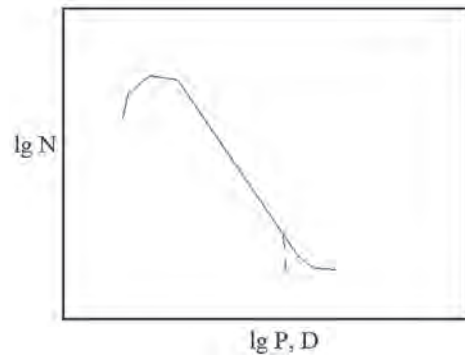


Рис. 1
Схематический график повторяемости упругих импульсов

Fig. 1
A relationship plot of the elastic pulses

энергетическим параметром упругого энерговыделения при разрушении горных пород P и их количеством N , схематически представленный на рис. 1.

$$\lg N = a + b \lg P, \quad (1)$$

где a и b коэффициенты, а в качестве параметра P могут выступать амплитуда A , энергия $E = f(A, D)$, магнитуда $M = f_1(F, D)$ сигналов. Соответствующее распределение по длительностям D сигналов имеет одномодальный вид (рис. 1).

Для зарегистрированных на практике упругих импульсов график повторяемости аппроксимируется зависимостью (1) только для средних значений P . Отклонение в области малых значений P определяется недостоверной регистрацией (слабые сигналы для одного и того же объема всегда регистрируются хуже, чем более мощные). Загиб в области максимальных P объясняется малой статистикой. **Значимые отклонения от вида схематического графика на рис. 1 будут трактоваться как вклад шумовых сигналов.**

Из параметров, представленных в ИБД для анализа, были выбраны амплитуда A (мкВ), энергия E (Дж) и длительность D (мкс). Выбранная энергия E с постоянным коэффициентом α пропорциональна сумме квадратов амплитуд отсчетов A_k , умноженной на 1 мкс (2). При этом длительность D сигнала входит неявным образом через число отсчетов n . В данном разделе приводятся результаты анализа суточных файлов ИБД и по каналу 1/7 (табл. 1).

$$E = \alpha \sum_{k=1}^n A_k^2 \times 1 \text{ мкс}. \quad (2)$$

В представленной работе анализировались полные суточные ИБД за два рабочих и два выходных дня (табл. 1). Кроме этого, отдельно анализировались события, зарегистрированные по устойчиво работающему каналу, в качестве которого был выбран канал 1/7.

Таблица 1
Суточное количество зарегистрированных сигналов

Table 1
Daily number of recorded signals

Дата	N	N_{D1}	N_{D1}/N	N_{D2}	N_{D2}/N	t_1 мкс	t_2 мкс	$A > 40000$ мкВ
Рабочий день	1 422 282	76 640	5.4%					30
Суббота	1 570 585	64 838	4%					30
Воскресенье	1 422 281	77 258	5.4%	419 353	29.5%	400	650	31
Рабочий день	1 688 113	88 758	5.3%	816 021	48.3%			30
Канал 1/7	138 201	21						

Примечание: Общее число сигналов за сутки N , число сигналов с длительностью $D_1 > 60000$ мкс (N_{D1}), число сигналов с длительностью $D_2 < 350$ мкс (N_{D2}), число сигналов с длительностью 350 мкс $< D_n < 60000$ мкс (N_{Dn})



Результаты и обсуждение

а) длительность зарегистрированных сигналов

На рис. 2 приведены графики повторяемости суточной ИБД для амплитуд и энергий сигналов, которые демонстрируют парадоксальную ситуацию: одномодальное амплитудное распределение при соответствующем бимодальном для энергии. Поскольку энергия упругого импульса является функцией A и D , то исследования начнем с анализа длительностей сигналов.

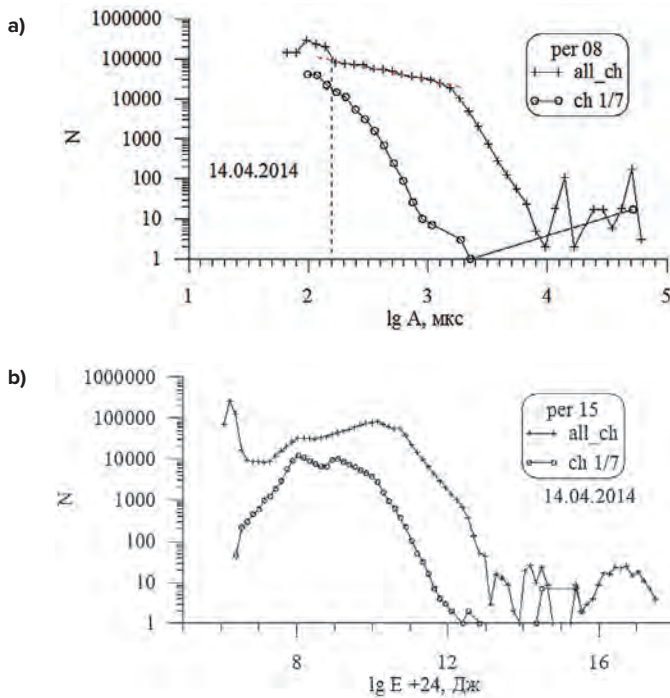


Рис. 2
Графики повторяемости ИБД 14.04.2014 по амплитуде (а) и энергии (б)

Fig. 2
Amplitude (a) and energy (b) relationship plots of the Initial Data Base on 14.04.2014

На рис. 3 приведены частотные распределения по длительностям для разных суточных ИБД. Общими особенностями для всех являются:

- существенно избыточное (N_{D_2} , табл. 1) по сравнению с рис. 1 число сигналов с малыми длительностями. Выбор длительностей $D \leq t_1$ (рис. 3, б), которые мы будем считать малыми, будет обсуждаться ниже;
- десятки тысяч (N_{D_1} , табл. 1) сигналов с максимально возможной для регистрации длительностью ($D = 65000$ мкс);
- наличие выбросов шириной $\sim 150\text{--}200$ мкс и с периодичностью ~ 3250 мкс, более выраженные в рабочие дни (сравнить 13.04.2014 и 14.04.2014);

Наличие значимой ступеньки на распределениях t_2 в диапазоне $4900\text{--}5200$ мкс.

Рассмотрим выявленные общие отклонения от схемы на рис. 1 более детально. Амплитуда и длительность упругого импульса, выделяемого при образовании дефекта, определенным образом пропорциональны. Большей амплитуде соответствует и большая длительность. У сигналов шума эта пропорциональность нарушается. Из графиков, представленных на рис. 4, а, видно, что сигналам с малыми D_{N_2} и аномально большими D_{N_1} длительностями соответствует широкий диапазон A , что позволяет предполагать большой вклад шумов в этих диапазонах D . Примером сигнала-

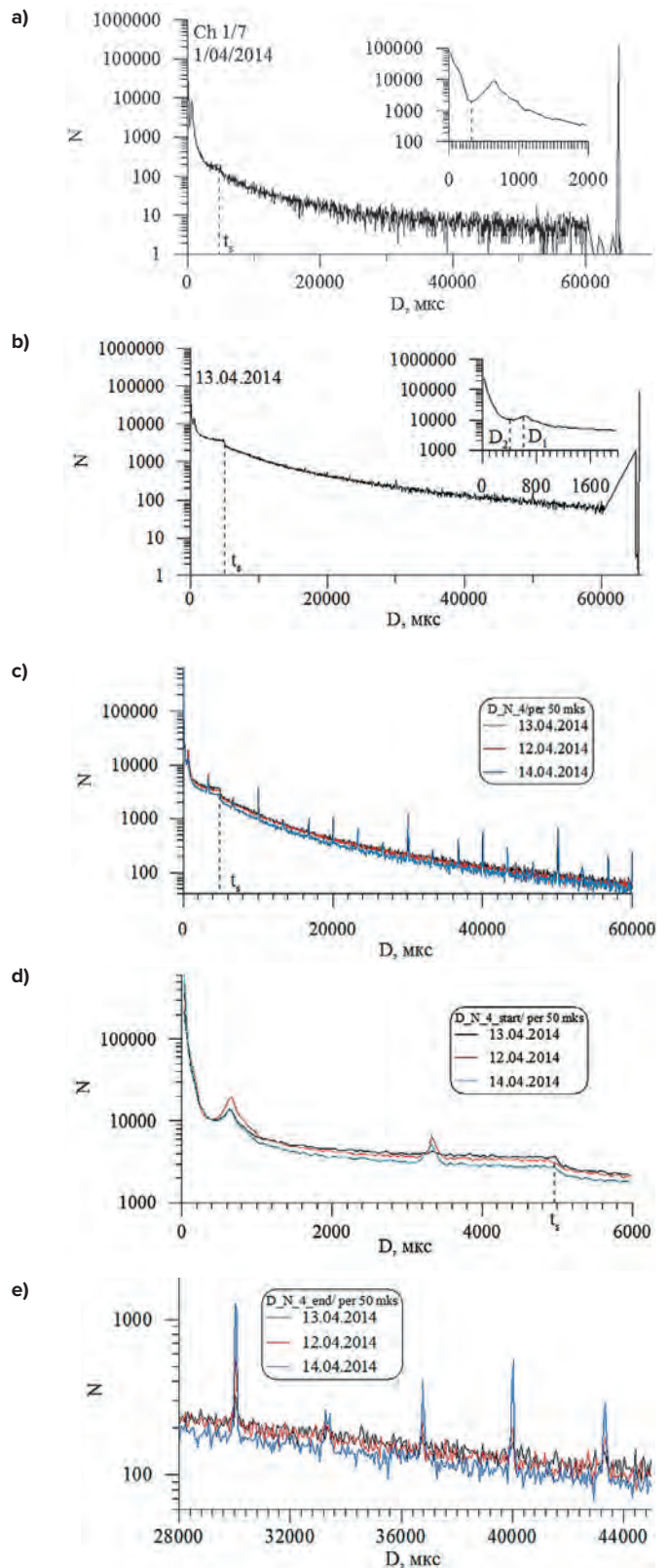


Рис. 3
Распределение зарегистрированных сигналов по длительностям:
а – канал 1/7 ИБД 01.04.2014;
б – ИБД 13.04.2014;
с – ИБД 12,13,14.04.2014 ограниченные $D < 60000$ мкс;
д – ИБД 12,13,14.04.2014 ограниченные $D < 6000$ мкс;
е – ИБД 12,13,14.04.2014 в диапазоне $28000 < D < 45000$ мкс

Fig. 3
Distribution of the recorded signals by duration:
а – 1/7 channel of the Initial Data Base on 01.04.2014;
б - Initial Data Base on 13.04.2014;
с – Initial Data Base on 12,13,14.04.2014 limited to $D < 60000 \mu\text{s}$; д – Initial Data Base on 12,13,14.04.2014 limited to $D < 6000 \mu\text{s}$; е – Initial Data Base on 12,13,14.04.2014 within the range of $28000 < D < 45000 \mu\text{s}$



лов с D_{N2} могут служить электромагнитные наводки, а с D_{N1} – квазипериодический техногенный шум. На рис. 5, а приведено суточное изменение сигналов с малой длительностью. При наличии переменного фона в первой половине выходного дня, в течение ~1000 с наблюдается мощная (до ~50000 сигналов) вспышка, что подтверждает ее техногенное происхождение.

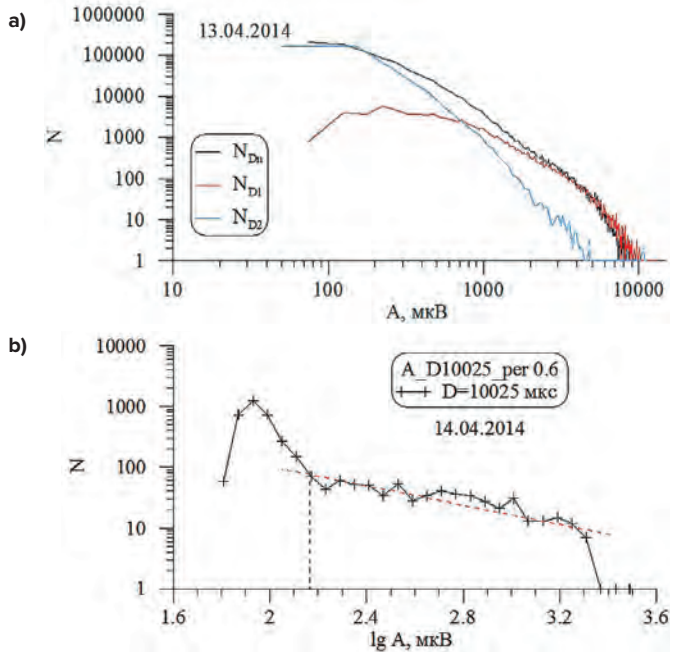


Рис. 4
Графики повторяемости A :
а – сигналы с длительностями N_{Dn1} , N_{Dn1} , N_{Dn2} ;
б – сигналы в выбросе с $D = 10025 \pm 125$ мкс

Fig. 4
Relationship plots (A):
а – signals with durations of N_{Dn1} , N_{Dn1} , N_{Dn2} ;
б – signals in outburst with $D = 10025 \pm 125$ μ s

На рис. 5, б приведено суточное изменение сигналов с D_{N1} , которое характеризуется существенной неравномерностью: возможно многократное (~6 раз) возрастание интенсивности в течение нескольких тысяч секунд. На этом графике для совмещения масштабов изменение для сигналов с D_{N2} начинается после рассмотренной вспышки события с малой длительностью.

Неожиданным оказалось выявление периодических выбросов на распределениях длительностей (рис. 3). Амплитуда этих выбросов (число событий) больше в рабочие дни (для больших длительностей) (рис. 3, е) и неоднозначна для малых (рис. 3, д), а положение совпадает и не меняется от суток к суткам (рис. 3, д, е). В течение суток события с длительностями 6675 ± 125 и 10025 ± 125 мкс, соответствующими двум соседним выбросам, локализованы при незначительном фоне в одних и тех же временных интервалах (рис. 5, с), что косвенно свидетельствует об их техногенном происхождении.

График повторяемости для событий с $D_{10025} = 10025 \pm 125$ мкс, приведенный на рис. 4, б, демонстрирует отклонение от зависимости (1) в интервале $\lg A < 2,18$. Перестроим распределение по длительностям сигналов, удалив из суточной ИБД события с $\lg A < 2,18$ (рис. 6). Сравнение полученного графика с аналогичной зависимостью на рис. 2, с демонстрирует, что отфильтровался не только выброс, соответствующий $D = 10025 \pm 125$ мкс, но и все остальные. Уменьшилось число сигналов с anomalously большими длительностями D_{N1} , с 88758 до ~ 68000.

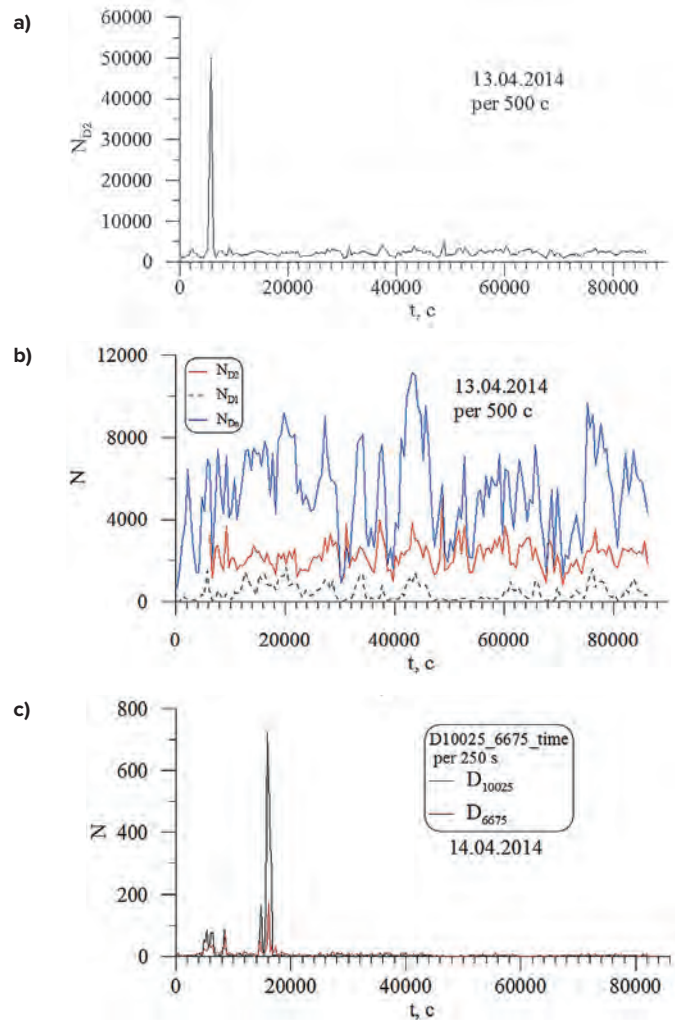


Рис. 5
Суточное изменение числа сигналов с:
а – малой длительностью (N_{Dn2});
б – «нормальной» (N_{Dn1}) и аномальной (N_{Dn1} , N_{Dn2}) длительностью;
с – с длительностями D_{10025} , D_{6675}

Fig. 5
Daily variation in the number of signals with:
а – short duration (N_{Dn2});
б – "normal" (N_{Dn1}) and abnormal (N_{Dn1} , N_{Dn2}) durations;
с – with durations of D_{10025} , D_{6675}

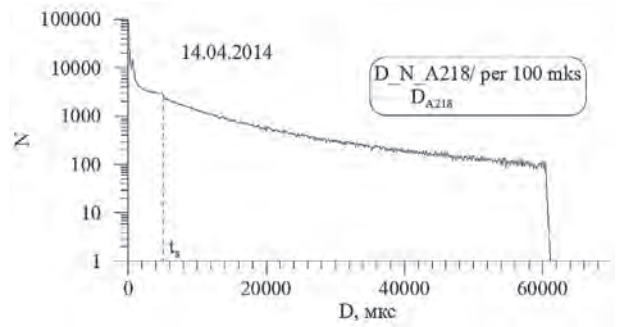


Рис. 6
Распределение зарегистрированных сигналов по длительностям: ИБД 14.04.2014 после фильтрации по амплитуде $\lg A < 2,18$

Fig. 6
Distribution of the recorded signals by duration: Initial Data Base on 14.04.2014 after filtering by amplitude $\lg A < 2,18$

При этом на распределение в области малых значений длительностей остался локальный максимум и ступенька. Именно положение этого локального максимума



Таблица 2
Число событий в базах данных до и после амплитудной A фильтрации и фильтрации по длительности сигнала D

Дата, канал*	Исходная	Фильтр A	Фильтр D
Общее количество событий за одни сутки 14.04.	1 688 113	684 159	512 118
Количество событий за одни сутки на определенном канале: 14.04. ch 1/7	138 201	41 613	18 746

Table 2
Number of events in the databases before and after the amplitude (A) and signal duration filtering (D)

$D1 \approx 650$ мкс и было выбрано в качестве критерия сигналов с малой длительностью. Исходя из вышеприведенных рассуждений можно сделать вывод о техногенной природе обнаруженных выбросов на распределениях длительностей, а вот четкого ответа о постоянстве их положения и периодичности в данной работе не получено. Точно так же нет понимания о природе возникающей ступеньки с фиксированным положением на распределениях D . Но можно предположить ее техногенное происхождение, а значит использовать в качестве более жесткого критерия при определении сигналов с малой длительностью.

b) энергетические параметры зарегистрированных сигналов

(Приведенные в данном разделе значения энергии представлены в условных единицах, для представления в джоулях необходимо умножить на 10-24)

Во всех рассматриваемых ИБД в начальный момент (~30 с) после перезапуска АЭ системы обнаружены сигналы с максимально возможными для данной системы регистрации амплитудами. Физического объяснения этому факту нет, рекомендуется фильтрация сигналов с $A > 40000$ мкВ в течение 60 с после ежедневного перезапуска АЭ системы. На рис. 2 приведены графики повторяемости по амплитуде и энергии, двухмодальность последних и послужила физическим основанием для проведения фильтрации шумовых сигналов. Для сравнения соответствующие графики повторяемости после фильтрации по амплитуде и длительности приведены на рис. 7. Видно, что после двойной селекции график повторяемости по энергии стал одномодальным в соответствии со схемой на рис. 1. Число отфильтрованных сигналов уменьшилось в разы (табл. 2), причем для устойчиво работающего канала 1/7 это уменьшение более значительно.

с) хронологические ошибки в исходных файлах

Как уже отмечалось, для корректной работы программы SEISPREД необходимым условием является хронологическая упорядоченность записей сигналов в файле. В много-

Таблица 3
Хронологические ошибки в исходных файлах

01.04.	9:27:25	502930	4	7/1	(ÀÝ)	48	49	292	2556856793	94	777	52	42	54	---
01.04.	9:27:25	502930	4	7/1	(ÀÝ)	48	49	292	2563921743	94	777	52	42	54	---
01.04.	12:14:51	354412	10050	7/1	(ÀÝ)	32	46	195	2498353453	94	583	36	15	25	---
01.04.	12:14:51	338818	10050	7/1	(ÀÝ)	23	43	140	662089560	88	113	42	5	44	---

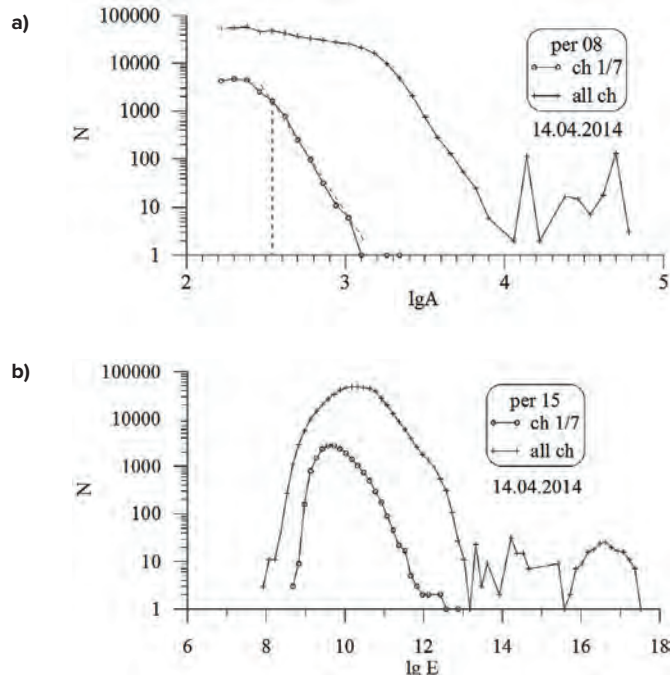


Рис. 7
Графики повторяемости ИБД 14.04.2014 по амплитуде (a) и энергии (b) после фильтрации по амплитуде и длительности сигналов

Fig. 7
Amplitude (a) and energy (b) relationship plots of the Initial Data Base on 14.04.2014 after filtering by amplitude and duration of the signals

канальной регистрирующей системе нарушения принципа хронологии не удивительны. К сожалению, подобные нарушения обнаружены и для одного выбранного канала 1/7 (табл. 3). За 01.04.2014 г. обнаружена 21 хронологическая ошибка на ~173000 событий по каналу 1/7.

Рекомендуется или удаление нарушающих хронологию записей, если их немного, или осуществление процедуры хронологического упорядочивания записей.

1. Удаление высокоамплитудных сигналов ($A > 40000$ мкВ, $lg A = 4,6$) на начальном этапе регистрации (~1 мин) после перезапуска АЭ-системы.
2. Удаление сигналов с $lg A < 2,18$.
3. Удаление сигналов с $D < D2$.
4. Поканальное хронологическое упорядочивание событий для корректной работы программы SEISPREД.
5. Формальную фильтрацию оставшихся сигналов с $D > D1$ считаем необоснованной, появляется возможность пропуска высокоэнергичного полезного сигнала от трещины. Необходим поиск дополнительных, физически обоснованных критериев. Приведенный в данной работе анализ с целью выделения шумовых сигналов нельзя считать исчерпанным.

Table 3
Chronological errors in the source files



Заключение

Разработана методика и оптимизирован расчет определения передаточной характеристики штатных датчиков системы АЭ мониторинга, фильтрация техногенных помех при АЭ мониторинге в природных условиях горного (массива с бетонной обделкой) в подземных сооружениях ФГУП «ГХК» РОСАТОМ. В неповрежденных гетерогенных породах на микроуровне акустические волны излучаются в процессе трещинообразования в зернах гетерогенных пород (0,5–2,00 МГц), когда преодолен локальный предел прочности материала.

При использовании метода акустической эмиссии следует помнить, что каждый объект контроля имеет свои уникальные свойства.

1. Выбор частотного фильтра является одним из важнейших решений при настройке системы акустической эмиссии. Фильтры, используемые в системах: 30–500 кГц – универсальный для всех задач;

30–100 кГц – для контроля утечек; 100–300 (400) кГц – для контроля сварных соединений и основного металла стальных конструкций.

2. Выбор временных параметров. Интервал контроля импульса: 500 мкс для сосудов и стенки резервуаров; 1000 мкс – для технологических трубопроводов; 2000 мкс – для магистральных трубопроводов; мертвое время – половина от Интервала контроля импульса. Максимальная длительность – всегда 65535 мкс.
3. Важным параметром при настройке на объекте является скорость распространения волн в объекте. Скорость зависит от материала объекта, его заполнения, изоляции, толщины, типа ПАЭ, рабочей полосы частот, порога, расстояния между ПАЭ и др. При проведении контроля и настройки локации очень важно провести предварительные измерения скорости распространения волн. Данная операция предусмотрена программным обеспечением.

Список литературы

1. Протосеня А.Г., Катеров А.М. Обоснование параметров реологической модели соляного массива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(3):16–28. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_3_0_16
2. Trushko V.L., Protosenya A.G., Verbilo P.E. Predicting strength of pillars in fractured rock mass during development of apatite-nephelinic ores. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018;13(8):2864–2872. Available at: https://arpnjournals.org/jeas/research_papers/tr_2018/jeas_0418_7007.pdf
3. Козырев А.А., Журавлева О.Г., Жукова С.А. Пространственно-временные вариации сейсмичности в районе Саамского разлома (Хибинский массив, Кольский полуостров). *Горный журнал*. 2023;(1):79–84. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.01.13>
4. Гоголинский К.В., Сясько В.А. Современное состояние и проблемы законодательного регулирования, метрологического обеспечения и стандартизации в области неразрушающего контроля. *Законодательная и прикладная метрология*. 2019;(4):15–21.
5. Гоголинский К.В., Кремчев Э.А., Кремчева Д.А., Сытько И.И., Ушаков И.Е., Смирнова Е.Е. и др. Новое значение метрологии в инновационных процессах в эпоху четвертой промышленной революции. В кн.: *Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Международные форум, г. Санкт-Петербург, 4 марта 2020 г.* СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; 2020. С. 135–136.
6. Potapov A.I., Polyakov V.E., Syas'ko V.A., Popov A. A., Kur'anova P.V. Erratum to: "Low-frequency broadband ultrasonic transducers for testing articles that are manufactured of large-structure and composite materials. Part 2. Excitation of low-frequency ultrasonic wide-band signals". *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015;51(9):595. <https://doi.org/10.1134/S1061830915090119>
7. Потапов А.И., Поляков В.Е., Сясько В.А. Попов А.А., Курьянова П.В. Низкочастотные ультразвуковые широкополосные преобразователи для контроля изделий из крупнотекстурных и композиционных материалов. Часть 1. Полное и частичное вырождение мод колебаний в пьезоэлементах различных геометрических форм. *Дефектоскопия*. 2015;(6):15–31.
8. Махмудов Х.Ф., Савельев В.Н., Савельев Д.В., Медведев В.Н., Круглов С.Ю. Проведение натурных исследований акустических свойств горного массива и бетонной обделки в подземных сооружениях ФГУП «Горно-Химического Комбината» – предприятие госкорпорации «Росатом». В кн.: *XXIII Петербургские чтения по проблемам прочности, посвященные 100-летию ФТИ им. А.Ф. Иоффе и 110-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР А.В. Степанова, г. Санкт-Петербург, 10–12 апреля 2018 г.* С. 136–137.
9. Afanasev P.I., Makhmudov K.F. Assessment of the parameters of a shock wave on the wall of an explosion cavity with the refraction of a detonation wave of emulsion explosives. *Applied Sciences*. 2021;11(9):3976. <https://doi.org/10.3390/app11093976>
10. Афанасьев П.И., Махмудов Х.Ф. Распространение ударных волн и волн напряжений в горной породе. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2021;8(1):27–34. <https://doi.org/10.15372/FPVGN2021080104>
11. Гладырь А.В., Курсакин Г.А., Рассказов М.И., Константинов А.В. Разработка метода выделения опасных участков в массиве горных пород по данным сейсмоакустических наблюдений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(8):21–32. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-21-32>
12. Гульельми А.В., Завьялов А.Д., Зотов О.Д., Лавров И.П. Зависимость потока афтершоков от магнитуды главного удара. *Физика Земли*. 2017;(1):12–19. <https://doi.org/10.7868/S0002333717010082>
13. Савельев В.Н., Махмудов Х.В. Исследование акустических свойств массива гетерогенных пород и бетонной обделки в природных условиях. *Журнал технической физики*. 2020;90(1):143–148. <https://doi.org/10.21883/JTF.2020.01.48676.74-19>
14. Махмудов Х.Ф. Методические аспекты изучения параметров упругих волн и контроль эталонной формы акустической эмиссии в полевых условиях. *Журнал технической физики*. 2022;92(12):1869–1874.
15. Савельев В.Н., Махмудов Х.Ф. Модель и математический аппарат для оценки и слежения за развитием процессов проявления горного давления в подземных сооружениях. В кн.: *Рубаник В.В. (ред.) Перспективные материалы и технологии: сборник материалов международного симпозиума, г. Брест, 27–31 мая 2019 г.* Брест: Витебский государственный технологический университет; 2019. С. 189–192.
16. Томилин Н.Г., Махмудов Х.Ф. Пространственные особенности формирования очаговой стадии землетрясений в зоне сочленения тектонических разломов тихоокеанской плиты. В кн.: *Козырев А.А. (ред.) X Международная школа-семинар «Физические*



основы прогнозирования разрушения горных пород» и VI Российско-китайский научно-технический форум «Проблемы нелинейной геомеханики на больших глубинах»: тезисы докладов, г. Апатиты, 13–17 июня 2016 г. Апатиты: Кольский научный центр РАН; 2016. С. 57.

17. Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф. Экспериментальное и теоретическое изучение актов трещинообразования в гетерогенных материалах. *Геология и геофизика*. 2017;58(6):915–923. <https://doi.org/10.15372/GiG20170607>
18. Томилин Н.Г., Махмудов Х.Ф. Физические основы акустико-эмиссионного мониторинга. *Актуальные научные исследования в современном мире*. 2017;(10-4):145–152.
19. Господариков А.П., Морозов К.В., Ревин И.Е. О методе обработки данных сейсмического и деформационного мониторинга при ведении подземных горных работ на примере Кукисвумчоррского месторождения АО «Апатит». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(8):157–168. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-157-168>
20. Козырев С.А., Власова Е.А., Соколов А.В., Усачев Е.А. Оценка эффективности действия взрыва простейших взрывчатых смесей с энергетическими добавками. *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2020;(4):42–49. <https://doi.org/10.37614/2307-5228.2020.12.4.005>
21. Мельниченко И.А., Кириченко Ю.В. Пространственное районирование месторождений полезных ископаемых. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(4):46–56. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_4_0_46
22. Козырев А.А., Каспарьян Э.В., Федотова Ю.В. Концепция единой системы комплексного геомеханического мониторинга при ведении горных работ в скальных массивах горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016;(4):168–191.
23. Журавлева О.Г., Жукова С.А., Аветисян И.М., Дмитриев С.В. Исследование сейсмической активности при отработке месторождения встречными фронтами. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(12-1):143–154. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_12_1_0_143
24. Козырев А.А., Онуприенко В.С., Жукова С.А., Журавлева О.Г. Развитие инструментального и методического обеспечения контроля наведенной сейсмичности на Хибинских апатит-нефелиновых месторождениях. *Горный журнал*. 2020;(9):19–26. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.02>
25. Томилин Н.Г., Куксенко В.С. Статистическая кинетика разрушения горных пород: энергетическая иерархия процесса. *Физика Земли*. 2004;(10):16–25.
26. Томилин Н.Г., Воинов К.А. Контроль состояния породного массива на основе анализа вариации временных интервалов (ВВИ) между сейсмическими событиями. В кн.: *Соболев Г.А. (ред.) Методические основы контроля состояния породного массива и прогноза динамических явлений*. М.: Национ. геофиз. комит.; 1994. С. 7–24.
27. Махутов Н.А., Иванов В.И., Соколова А.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Скворцов Д.Ф., Бубнов М.А. Мониторинг разрушения волокон композитных материалов с применением системы акустической эмиссии, виброанализатора и высокоскоростной видеосъемки. *Дефектоскопия*. 2020;(12):14–23. <https://doi.org/10.31857/S0130308220120027>
28. Gao M., Zhou X., Xie J. et al. Characteristics and mechanism of rock 3D volume fracturing in microwave field. *Journal of the China Coal Society*. 2022;47(3):1122–1137. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.XR21.1828>
29. Smirnov V.B., Ponomarev A.V., Benard P., Patonin A.V. Regularities in transient modes in the seismic process according to the laboratory and natural modeling. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2010;46(2):104–135. <https://doi.org/10.1134/S1069351310020023>
30. Baddari K., Frolov A.D., Tourchine V., Rahmoune F., Makdeche S. Effect of stress-strain conditions on physical precursors and failure stages development in rock samples. *Acta Geophysica*. 2015;63(1):62–102. <https://doi.org/10.2478/s11600-014-0206-9>

References

1. Protosenya A.G., Katerov A.M. Substantiation of rheological model parameters for salt rock mass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(3):16–28. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_3_0_16
2. Trushko V.L., Protosenya A.G., Verbilo P.E. Predicting strength of pillars in fractured rock mass during development of apatite-nephelinic ores. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018;13(8):2864–2872. Available at: https://arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2018/jeas_0418_7007.pdf
3. Kozыrev A.A., Zhuravleva O.G., Zhukova S.A. Seismicity variations in space and time in the area of the Saamy fault, Khibiny Massif, Kola Peninsula. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(1):79–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.01.13>
4. Gogolinsky K.V., Syasko V.A. State of the art and some of the issues related to legislative regulation, metrological support and standardization in the field of non-destructive testing. *Legislative and Applied Metrology*. 2019;(4):15–21. (In Russ.)
5. Gogolinsky K.V., Kremcheev E.A., Kremcheeva D.A., Sytko I.I., Ushakov I.E., Smirnova E.E. et al. The new value of metrology in innovation processes during the Fourth Industrial Revolution. In: *Metrological Support for Innovative Technologies: an International Forum, St. Petersburg, March 4, 2020*. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; 2020, pp. 135–136. (In Russ.)
6. Potapov A.I., Polyakov V.E., Syas'ko V.A., Popov A. A., Kur'anova P.V. Erratum to: “Low-frequency broadband ultrasonic transducers for testing articles that are manufactured of large-structure and composite materials. Part 2. Excitation of low-frequency ultrasonic wide-band signals”. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015;51(9):595. <https://doi.org/10.1134/S1061830915090119>
7. Potapov A.I., Polyakov V.E., Syasko V.A., Popov A.A., Kurianova P.V. Low-frequency broadband ultrasonic transducers for testing articles manufactured of large-structure and composite materials. Part 1. Complete and partial degeneracy of vibration modes in piezoelectric elements of different geometric shapes. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015;51(6):338–351. <https://doi.org/10.1134/S1061830915060078>
8. Makhmudov Kh.F., Savel'ev V.N., Savel'ev D.V., Medvedev V.N., Kruglov S.Yu. Execution of field studies into the acoustic properties of the rock mass and concrete lining in underground structures of the GHK Rosatom Federal State Unitary Enterprise. In: *XXIII St. Petersburg Readings on Strength Issues dedicated to the 100th Anniversary of the Ioffe Physical-Technical Institute and 110th Anniversary of A.V. Stepanov, Corresponding Member of Academy of Sciences of USSR, St. Petersburg, April 10–12, 2018*, pp. 136–137. (In Russ.)
9. Afanasev P.I., Makhmudov K.F. Assessment of the parameters of a shock wave on the wall of an explosion cavity with the refraction of a detonation wave of emulsion explosives. *Applied Sciences*. 2021;11(9):3976. <https://doi.org/10.3390/app11093976>
10. Afanasyev P.I., Makhmudov Kh.F. Propagation of shock waves and stress waves in rock. *Journal of Fundamental and Applied Mining Sciences*. 2021;8(1):27–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FPVGN2021080104>
11. Gladyr A.V., Kursakin G.A., Rasskazov M.I., Konstantinov A.V. Method to detect hazardous areas in rock mass from seismoacoustic observations. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(8):21–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-21-32>



12. Gulelmi A.V., Zavyalov A.D., Zotov O.D., Lavrov I.P. Dependence of the aftershock wave on the main shock magnitude. *Fizika Zemli*. 2017;(1):12–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0002333717010082>
13. Savel'ev V.N., Makhmudov Kh.F. A study of the acoustic properties of a body of heterogeneous rocks and concrete lining under natural conditions. *Technical Physics*. 2020;65(1):133–138. <https://doi.org/10.1134/S1063784220010235>
14. Machmoudov H.F. Methodological aspects of studying the parameters of elastic waves and controlling the standard form of acoustic emission in the field. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. 2022;92(12):1869–1874. (In Russ.)
15. Saveliev V.N., Makhmudov Kh.F. Model and mathematical tools for estimation and tracking of rock pressure processes in underground constructions. In: Rubanik V.V. (ed.) *Perspective materials and technologies: Proceedings of an International Symposium, Brest, May 27–31, 2019*. Brest: Vitebsk State Technological University; 2019, pp. 189–192. (In Russ.)
16. Tomilin N.G., Makhmudov Kh.F. Spatial features of the focal stage in the earthquake formation in the Pacific plate tectonic fault junction zone. In: Kozyrev A.A. (ed.) *X International Educational Seminar "Physical Fundamentals of Fracture Prediction in Rocks" and VI Russian-Chinese Scientific and Technical Forum "Problems of Nonlinear Geomechanics at Large Depths": Abstracts, Apatity, June 13–17, 2016*. Apatity: Kola Science Center RAS; 2016, p. 57. (In Russ.)
17. Kukhsenko V.S., Makhmudov K.F. Fracture in heterogeneous materials: experimental and theoretical studies. *Russian Geology and Geophysics*. 2017;58(6):738–743. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.09.030>
18. Tomilin N.G., Makhmudov Kh.F. Physical basis of acoustic emission monitoring. *Aktualnye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire*. 2017;(10-4):145–152. (In Russ.)
19. Gospodarikov A.P., Morozov K.V., Revin I.E. A Method of data interpretation in seismicity and deformation monitoring in underground mining in terms of the Kukisvumchorr deposit of Apatit company. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(8):157–168. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-157-168>
20. Kozyrev S.A., Vlasova E.A., Sokolov A.V., Usachev E.A. Assessment of the efficiency of the explosion of the simple explosive mixtures with energy additives. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*. 2020;(4):42–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.37614/2307-5228.2020.12.4.005>
21. Melnichenko I.A., Kirichenko Yu.V. Spatial zoning of mineral deposits. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(4):46–56. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_4_0_46
22. Kozyrev A.A., Kaspar'yan E.V., Fedotova Yu.V. Concept of a unique complex geomechanical monitoring system when mining in hard rock massifs. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2016;(4):168–191. (In Russ.)
23. Zhuravleva O.G., Zhukova S.A., Avetisian I.M., Dmitriev S.V. Study of seismic activity during mining of a rockburst hazardous deposit with counter fronts. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(12-1):143–154. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_12_1_143
24. Kozyrev A.A., Onuprienko V.S., Zhukova S.A., Zhuravleva O.G. Induced seismicity of rock mass: development of instrumental and methodological support to control seismicity at the Khibiny apatite-nepheline deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(9):19–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.02>
25. Tomilin N.G., Kuksenko V.S. Statistical kinetics of rock fracture: the energy hierarchy of the process. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2004;40(10):798–806.
26. Tomilin N.G., Voinov K.A. Monitoring of rock mass condition based on the analysis of time interval variation (TIA) between the seismic events. In: Sobolev G.A. (ed.) *Methodological basis for monitoring the rock mass condition and prediction of dynamic phenomena*. Moscow: National Geophysical Committee; 1994, pp. 7–24. (In Russ.)
27. Makhutov N.A., Sokolova A.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Skvortsov D.F., Bubnov M.A., Ivanov V.I. Monitoring composite fiber failure using acoustic emission system, vibration analyzer, and high-speed video recording. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020;56(12):960–970. <https://doi.org/10.1134/S1061830920120049>
28. Gao M., Zhou X., Xie J. et al. Characteristics and mechanism of rock 3D volume fracturing in microwave field. *Journal of the China Coal Society*. 2022;47(3):1122–1137. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.XR21.1828>
29. Smirnov V.B., Ponomarev A.V., Benard P., Patonin A.V. Regularities in transient modes in the seismic process according to the laboratory and natural modeling. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2010;46(2):104–135. <https://doi.org/10.1134/S1069351310020023>
30. Baddari K., Frolov A.D., Tourtchine V., Rahmoune F., Makdeche S. Effect of stress-strain conditions on physical precursors and failure stages development in rock samples. *Acta Geophysica*. 2015;63(1):62–102. <https://doi.org/10.2478/s11600-014-0206-9>

Информация об авторах

Махмудов Хайрулло Файзуллаевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики прочности, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе; г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Афанасьев Павел Игоревич – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: afanasev_pi@pers.spmi.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 22.02.2023

Поступила после рецензирования: 13.03.2023

Принята к публикации: 13.03.2023

Information about the authors

Khairullo F. Makhmudov – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher at the Laboratory of Strength Physics, Ioffe Institute, St. Petersburg, Russian Federation; e-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Pavel I. Afanasev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation; e-mail: afanasev_pi@pers.spmi.ru

Article info

Received: 22.02.2023

Revised: 13.03.2023

Accepted: 13.03.2023