

УДК 539.42:519.67

**КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ КЛЮЧЕВЫХ ПРИЗНАКОВ  
АКУСТОЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД.  
ЧАСТЬ 2. ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА DBSCAN**

*С.А. Имашев, Д.С. Кульков, М.Е. Чешев*

Представлены результаты кластерного анализа ключевых признаков сигналов акустической эмиссии с применением алгоритма DBSCAN. Анализ диаграмм распределения признаков для 36 образцов горных пород (габбро – 5 образцов, гранит – 12 и мрамор – 19) показал, что полезные сигналы характеризуются высокими значениями ключевых признаков ( $P_1=85-100$  и  $P_2=70-95$ ) и группируются преимущественно в правом верхнем углу диаграммы, тогда как шумовые сигналы кластеризуются ближе к центру и по периферии. Области, соответствующие полезным и шумовым сигналам, характеризуются плотным центром и схожи по форме с нормальным распределением. Данные особенности позволяют использовать методы кластерного анализа для выделения полезных сигналов, а именно, алгоритм DBSCAN, который предназначен для кластеризации пространственных данных с присутствием шума на основе плотности распределения исследуемых данных. Выделенные данным алгоритмом полезные сигналы используются в дальнейшем для расчета кривой накопления событий и активности акустической эмиссии.

*Ключевые слова:* кластерный анализ; ключевой признак; DBSCAN; сигнал акустической эмиссии; горная порода.

**ТОО ТЕКТЕРИНИН ҮЛГҮЛӨРҮНҮН АКУСТИКАЛЫК ЭМИССИЯ  
СИГНАЛДАРЫНЫН МААНИЛУУ БЕЛГИЛЕРИНЕ КЛАСТЕРДИК ТАЛДОО ЖҮРГҮЗҮҮ.  
2-БӨЛҮК. DBSCAN АЛГОРИТМИН КОЛДОНУУ**

*С.А. Имашев, Д.С. Кульков, М.Е. Чешев*

Макалада DBSCAN алгоритми аркылуу акустикалык эмиссия сигналдарынын маанилүү белгилерине кластердик талдоо жүргүзүүнүн натыйжалары көрсөтүлдү. 36 тоо тегинин үлгүлөрүнүн (габбро – 5 үлгүсү, гранит – 12 жана мрамор – 19) өзгөчөлүктөрүнүн бөлүштүрүү диаграммаларына талдоо жүргүзүү төмөнкүдөй натыйжа берди: пайдалуу сигналдардын түйүндүү өзгөчөлүктөрү жогорку маани менен мүнөздөлөт ( $P_1=85-100$  жана  $P_2=70-95$ ), жана негизинен диаграмманын жогорку оң бурчунда топтолушат, ал эми чуу сигналдары борборго жана чет жакка жакын орношот. Ошону менен бирге, пайдалуу жана чуу сигналдарына тиешелүү аймактар тыгыз борбор менен мүнөздөлүп, формасы боюнча нормалдуу бөлүштүрүүгө окшош. Бул өзгөчөлүктөр, пайдалуу сигналдарды бөлүп чыгуу үчүн, кластердик талдоо жүргүзүүнү, тактап айтканда, DBSCAN алгоритмин кодонууга өбөлгө түзөт. Ал ыкма, изилденүүчү маалыматтын тыгыздыгын колдонуп, чуу аралашкан мейкиндик маалыматтарын кластерлөө үчүн ылайыкташтырылган. Мындай ыкма менен бөлүнүп чыккан пайдалуу сигналдар, акустикалык эмиссия окуяларынын топтолуусун жана активдүүлүгүн эсептөө үчүн колдонулат.

*Түйүндүү сөздөр:* кластердик талдоо жүргүзүү; түйүндүү өзгөчөлүктөр; DBSCAN; акустикалык эмиссия сигналы; тоотектери.

**CLUSTER ANALYSIS OF KEY FEATURES OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS  
OF ROCK SPECIMENS. PART 2. APPLICATION OF DBSCAN ALGORITHM**

*S.A. Imashev, D.S. Kulkov, M.E. Cheshev*

The paper presents results of cluster analysis of key features of acoustic emission signals using DBSCAN algorithm. Analysis of key features distribution diagrams for 36 rock specimens (gabbro – 5 specimens, granite – 12 and marble – 19) showed that useful signals are characterized by high values of key features ( $P_1 = 85-100$  and  $P_2 = 70-95$ ) and are grouped mainly in the upper right corner of the diagram, while noise signals are clustered closer to the center and on the periphery. Also, the areas corresponding to the useful and noise signals are characterized by a dense center and are similar in shape to normal distribution. This information make it possible to use methods of cluster analysis to extract useful signals, namely, DBSCAN algorithm, which is used for clustering spatial data in the presence of noise on the basis of density the data under study. The useful signals selected by this algorithm are used to calculate cumulative number of events and activity of acoustic emission.

*Keywords:* cluster analysis; key feature; DBSCAN; acoustic emission signal; rock.

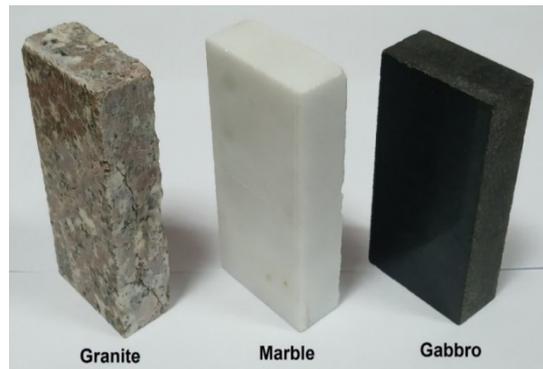


Рисунок 1 – Слева – рычажная установка; справа – образцы геоматериалов (гранит, мрамор, габбро)

**Введение.** В первой части был проведен обзор основных алгоритмов кластерного анализа, и проверка их работы на различных модельных кластерах. Оценка применимости этих алгоритмов для задачи отделения полезных сигналов акустической эмиссии от шумовых на основе диаграммы распределения ключевых признаков [1] показала, что наиболее подходящим алгоритмом является DBSCAN (Density-based spatial clustering of applications with noise). При этом учитывается то, что распределение внутри кластера, соответствующего полезным сигналам, не является равномерным, а имеет место уплотнение в центральной области [2]. В данной статье описывается применение алгоритма DBSCAN для выделения полезных сигналов акустической эмиссии при одноосном сжатии образцов гранита, габбро и мрамора.

**Аппаратура и методика.** Одноосное сжатие образцов горных пород осуществляли рычажной установкой с максимальной нагрузкой на образец до 250 кН [3]. В качестве образцов для проведения эксперимента использовали различные геоматериалы (габбро, мрамор, гранит) в форме прямоугольного параллелепипеда, с размерами 40×20×80 мм (Д×Ш×В). На рисунке 1 показана рычажная установка, а также образцы геоматериалов, используемых в экспериментах.

Сигналы акустической эмиссии регистрировали датчиком SE-2MEG-P (DECI, США), устанавливаемом непосредственно на испытуемом образце, с рабочим диапазоном от 200 кГц до

2 МГц. После усиления и синхронизации, сигналы оцифровывались 8-канальным блоком АЦП USB-3000 с разрядностью 14 бит и максимальной частотой дискретизации 3 МГц [4] и передавались на ПК.

Эксперименты показали, что сигналы акустической эмиссии можно разделить на две основные группы: полезные сигналы и шумы [1]. Анализ волновых форм этих сигналов позволил выявить два ключевых признака:  $P_1$  и  $P_2$ , характеризующих вид волновой формы и ее амплитудно-частотный спектр. Диаграмма распределения параметров ( $P_1$ ,  $P_2$ ) позволила разделить полезные и шумовые акустоэмиссионные сигналы на основе их группирования в отдельные кластеры (рисунок 2).

На диаграмме видно, что полезные сигналы в основном группируются в верхнем правом углу, а шумовые – ближе к центру и по краям. Эти области группирования характеризуются большой плотностью в центре и меньшей – по периферии.

Данная особенность расположения кластеров, содержащих полезные акустоэмиссионные сигналы, проявляется и для других геоматериалов, в частности, в случае образцов мрамора и гранита. На рисунке 3 показаны гистограммы распределения параметров  $P_1$  и  $P_2$  для 36 различных образцов геоматериалов, из которых видно, что полезные сигналы в основном группируются в областях  $P_1 = 85-100$  и  $P_2 = 70-95$ , что необходимо учитывать при отделении областей, содержащих полезные

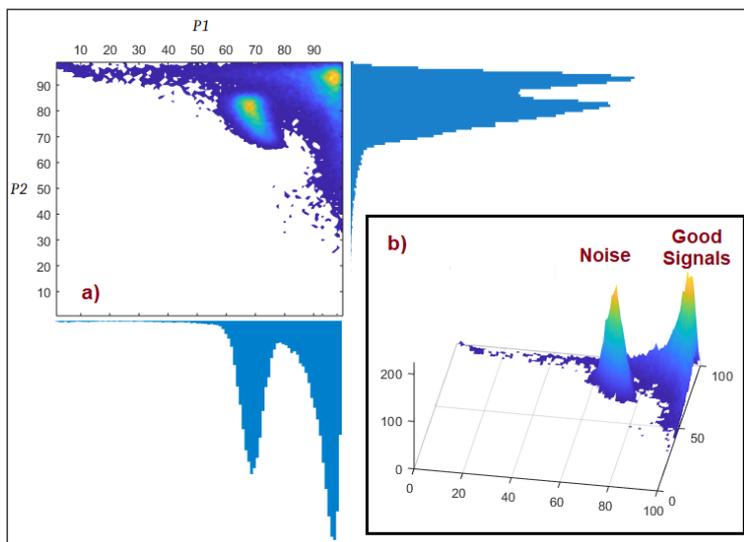


Рисунок 2 – Диаграмма плотности распределения ключевых параметров  $P_1$  и  $P_2$  на примере образца габбро: а – вид сверху; б – объемное представление (пики указывают на кластеры полезных сигналов и шумов)

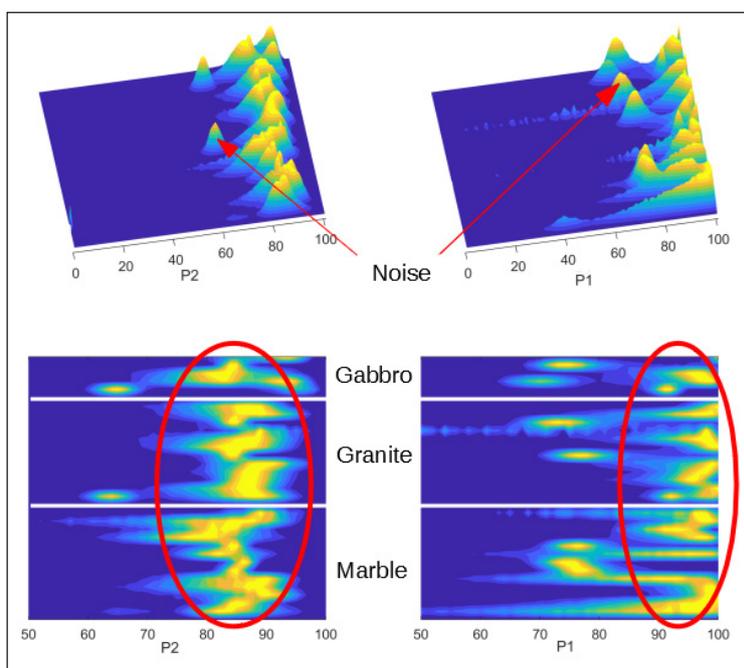


Рисунок 3 – Гистограмма распределения признаков  $P_1$  и  $P_2$  для 36 образцов горных пород: габбро – 5, гранит – 12, мрамор – 19. Сверху – объемный вид, с указанием шумовых областей; снизу – контурный вид (овалами выделены области полезных сигналов)

сигналы от шумовых, алгоритмом кластерного анализа DBSCAN путем настройки соответствующих параметров, а именно, радиуса  $\epsilon$ -окрестности и количества соседей [2].

**Результаты и обсуждение.** На рисунке 4 представлены результаты применения алгоритма кластеризации DBSCAN для выделения полезных и шумовых сигналов акустической эмиссии для образцов мрамора, габбро и гранита.

Из рисунка 4 видно, что полезные сигналы преимущественно группируются в верхнем пра-

вом углу, независимо от материала горной породы, в то время как шумы – ближе к центру и по краям диаграммы рассеивания.

Для полезных сигналов, выделенных таким методом, были построены кривые накопления событий  $N(t)$  и активности  $dN/dt$  акустической эмиссии для этих же образцов гранита, габбро и мрамора (рисунок 5).

На рисунке 5 видно, что рост числа событий и, соответственно, пики активности акустической эмиссии указывают на периоды трещино-

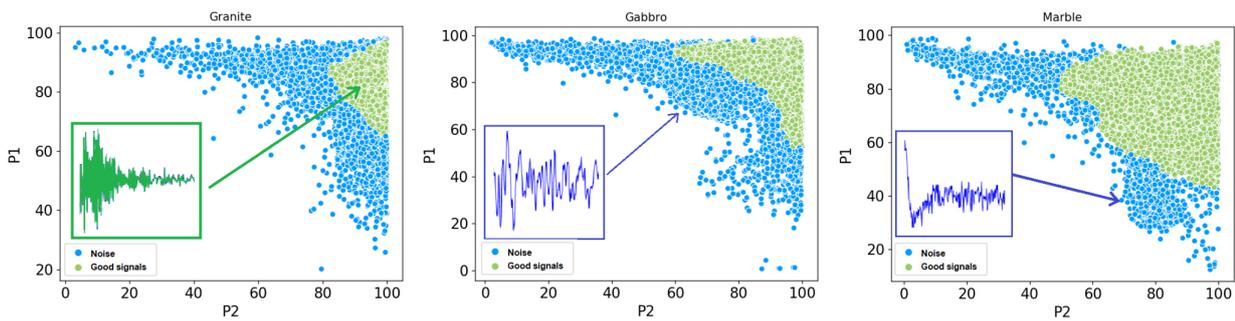


Рисунок 4 – Выделение полезных сигналов методом кластерного анализа DBSCAN для образцов гранита, габбро и мрамора (зеленым выделены полезные сигналы, синим – шумы)

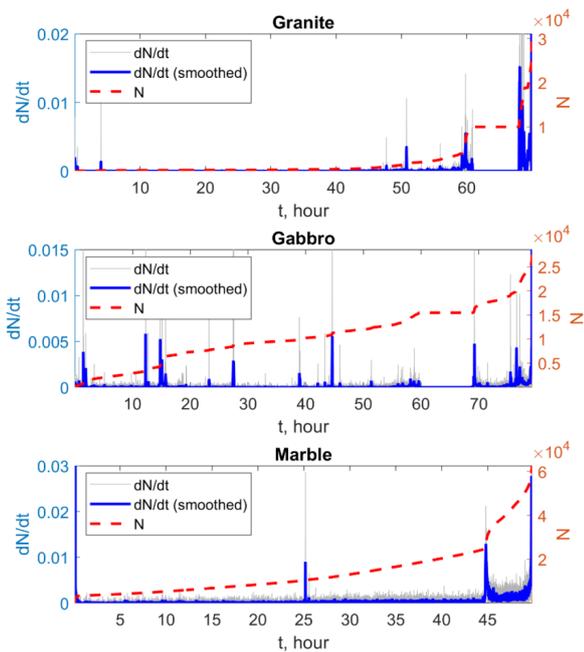


Рисунок 5 – Кривые накопления событий  $N(t)$  (красная пунктирная) и активности  $dN/dt$  (серая, сглаженная – синяя) акустической эмиссии

образования и развитие процесса перехода материала от стадии упрочнения к процессу разрушения [5, 6].

**Выводы.** Диаграммы распределения ключевых признаков  $P_1$  и  $P_2$ , характеризующие особенности волновых форм и амплитудно-частотного спектра сигналов акустической эмиссии для различных геоматериалов показали:

- полезные сигналы характеризуются высокими значениями  $P_1 = 85-100$  и  $P_2 = 70-95$ , и группируются в правом верхнем углу диаграммы;

- шумовые сигналы кластеризуются ближе к центру диаграммы и по периферии;
- области, соответствующие полезным и шумовым сигналам, характеризуются плотным центром и схожи по форме с нормальным распределением.

Данные особенности позволяют использовать методы кластерного анализа для выделения полезных сигналов, а именно, алгоритм DBSCAN, который предназначен для кластеризации пространственных данных с присутствием шума на основе плотности распределения исследуемых данных. Выделенные данным методом полезные сигналы используются в дальнейшем для расчета кривой накопления событий и активности акустической эмиссии.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научной станции Российской академии наук в г. Бишкек (тема № АААА-А19-119020190064-9).*

#### Литература

1. Кульков Д.С. Методика предварительной обработки сигналов акустической эмиссии при одноосном сжатии образцов горных пород / Д.С. Кульков, М.Е. Чешев // В кн.: Современные техника и технологии в научных исследованиях: сб. матер. XI межд. конф. (Бишкек, 24–26 апреля 2019). Бишкек: НС РАН, 2019. С. 100–103.
2. Schubert E. DBSCAN Revisited, Revisited: Why and How You Should (Still) Use DBSCAN / E. Schubert, J. Sander, M. Ester, H.-P. Kriegel, X. Xu // ACM Transactions on Database Systems (TODS). 2017. Vol. 42. P. 1–21.
3. Закупин А.С. Рычажная установка для статических и динамических испытаний материалов

- в условиях одноосного сжатия / А.С. Закупин, Б.В. Боровский // Пат. 2012148683/28 РФ // БИ. 2015. №5.
4. Мубассарова В.А Влияние электромагнитных полей на скорость деформации и дефектообразование в нагруженных образцах горных пород: дис. ... канд. физ.-мат. наук / В.А. Мубассарова // ФГБУН Институт динамики геосфер РАН. М., 2019. 202 с.
  5. Сычев В.Н. Корреляция электрического сопротивления и деформации в образцах горных пород / В.Н. Сычев, С.А. Имашев // Вестник КРСУ. 2017. Т. 17. № 12. С. 201–204.
  6. Niccolini G. Correlated Fracture Precursors in Rocks and Cement-Based Materials Under Stress / G. Niccolini, O. Borla, G. Lacidogna, A. Carpinteri // In Acoustic, Electromagnetic, Neutron Emissions from Fracture and Earthquakes. Springer. 2015. P. 237–248. doi 10.1007/978-3-319-16955-2\_16.