

Санкт-Петербургский государственный университет

Кафедра системного программирования

Группа 21.M07-мм

Идентификация событий акустической
эмиссии и локация источника с
применением модифицированных методов
машинного обучения

МАКАРИХИН Павел Андреевич

Отчёт по проектно-технологической практике

Научный руководитель:
доцент кафедры информатики, к.т.н., Григорьева А.В.

Санкт-Петербург
2022

Оглавление

Введение	3
1. Постановка задачи	4
2. Обзор	5
3. Метод	6
3.1. Удаление шумов	6
3.2. Метод локации сигналов наложением сетки	6
3.3. Кластеризация данных	9
4. Эксперимент	11
5. Библиотека	14
Заключение	15
Список литературы	16

Введение

При эксплуатации объектов очень важно знать их состояние во избежание аварийных ситуаций. Такие объекты, как мостовые колонны, резервуары для перевозки жидкостей, различные конструкции в промышленности и многие другие, в процессе эксплуатации испытывают постоянные нагрузки [2, 14, 12]. Существует широкий спектр методов неразрушающего контроля, позволяющих контролировать объект без его разрушения или демонтажа. Одним из наиболее популярных подходов является метод акустической эмиссии (АЭ) благодаря его точности и экологичности. Метод АЭ основан на обнаружении упругих волн, исходящих от трещин, разрушений и других явлений. Существует три основных применения метода АЭ: определение местоположения источника волн, мониторинг состояния конструкции и оценка характеристик материалов и конструкций.

Исследования в данной области продолжаются уже более 50 лет, но до сих пор нет общих решений, так как для разных материалов и разных конструкций распространение упругих волн происходит по-разному.[22]

1. Постановка задачи

Целью работы является разработка библиотеки методов АЭ для идентификации сигналов АЭ и локации источников. Для достижения обозначенной цели были поставлены следующие задачи:

1. Очистить исходные данные от шумов;
2. Локализовать сигналы АЭ;
3. Кластеризировать полученный датасет для формирования областей;
4. Объединить разработанные ранее методы с новыми в библиотеку на языке Python;

2. Обзор

Метод АЭ находит свое применение в различных областях контроля технологических процессов. Например, метод АЭ позволяет прогнозировать структуру металла при литье [21], в [18] метод АЭ применялся в авиастроении, в [11] применялся Методы АЭ для мониторинга повреждений композитного волокна. Суть метода АЭ заключается в обнаружении акустических волн, возникающих в объекте при возникновении дефектов в процессе эксплуатации объекта. Для выполнения этого метода на исследуемый участок объекта устанавливаются датчики АЭ, после чего при непрерывном нагружении объекта в нем начинают появляться различные дефекты: трещины, сколы, выкрашивание материала и др. При возникновении и в процессе своего роста дефекты излучают распространяющиеся по объекту акустические волны, которые регистрируются датчиками. Регистрируются различные параметры акустической волны: амплитуда, энергия, время прихода на датчик и многие другие. Это похоже на сложные системы с неперiodической динамикой [13]. Оценка состояния объекта может занимать очень много времени из-за размера обследуемого объекта, поэтому крайне важно уменьшить участки, которые необходимо проверить специалисту. Анализ данных позволяет получить информацию о дефектах объекта, их размерах, ходе развития и местоположении. Однако универсальных автоматических методов анализа, дающих точный результат без участия специалиста, до сих пор не существует, поэтому это направление актуально и по сей день.

3. Метод

3.1. Удаление шумов

Данные акустической эмиссии, полученные в ходе реальных экспериментов, часто содержат большое количество различных шумов (человеческий фактор, электромагнитные колебания, космические лучи [4] и др.), которые также фиксируются датчиками, поэтому крайне важно фильтровать полезную информацию от помех перед дальнейшей работой [7, 3].

Существуют различные способы отделения сигналов от шума: [1, 16, 17, 19]. В данной работе записанные сигналы были отфильтрованы от явных шумов, амплитуда волны которых не попадает в диапазон волновых значений от источников АЭ от 40 [дБ] до 100 [дБ], аналогично [2]. Далее удалялись сигналы, зарегистрированные не более чем 4 датчиками. Учитывая погрешность аппаратуры, установить сколь угодно достоверное местонахождение источников АЭ с помощью менее 4-х датчиков невозможно. Затем из оставшихся данных были удалены гипотетические электромагнитные импульсы, которые также могут быть зафиксированы датчиками от внешних объектов и устройств в ходе эксперимента. Эти волны не несут информации о состоянии объекта и поэтому также в данном случае относятся к шуму. Такие данные отличаются тем, что их фиксация датчиками происходит практически одновременно, так как электромагнитные волны распространяются со скоростью света. В методе предполагалось, что сигналы являются электромагнитными, у которых разница в приходе на датчики составляет менее 0,2 микросекунды [мкс]. После фильтрации данных применялся метод приближенного расчета на сетке.

3.2. Метод локации сигналов наложением сетки

Когда акустическая волна распространяется через изотропный материал, ее скорость во всех направлениях одинакова. Для локализации источника предполагается, что волна регистрируется не менее чем 4

датчиками и ее скорость изменяется незначительно. Предполагается также, что скорость волны лежит в диапазоне возможных значений в исследуемом объекте. Так как расчеты происходят на развертке объекта, необходимо также учитывать возможность распространения волн через грани плоскости по форме объекта.

Метод основан на приближенном вычислении возможных координат источника волны. Пусть несколько датчиков регистрируют волну. Для первого и второго датчиков в порядке прихода волн рассчитывается максимальное расстояние, на котором потенциально может находиться источник волны относительно них.

$$d_{max} = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{2}, \quad (1)$$

где x_i, y_i - координаты i -го датчика, по порядку зафиксировавшего волну.

Далее на область, в которой в пределах этого расстояния расположены датчики, зафиксировавшие волну, накладывается сетка с определенным шагом. Для каждой сетки точек проверяется условие изменения скорости с заданной точностью:

$$|v_1 - v_2| < accuracy, \quad (2)$$

где точность предопределена,

$$\begin{cases} v_1 = \left| \frac{\sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}}{t_2 - t_1} \right| \\ v_2 = \left| \frac{\sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2}}{t_3 - t_2} \right| \end{cases} \quad (3)$$

После расчетов для всех вершин сетки формируется набор потенциальных точек источников для разных скоростей. Затем для каждой точки полученного множества проверяется, чтобы среди трех ближайших к данной точке датчиков было обнаружено не менее 2-х соответствующих

Таблица 1: Набор возможных точек источника АЭ для одного сигнала.

X	Y	SPEED	N
226.82	314.32	141.23	276
229.62	327.22	164.11	276
229.82	328.12	165.48	276
230.72	332.12	171.26	276

щих сигналов, допускающих некоторую ошибку в работе датчиков.

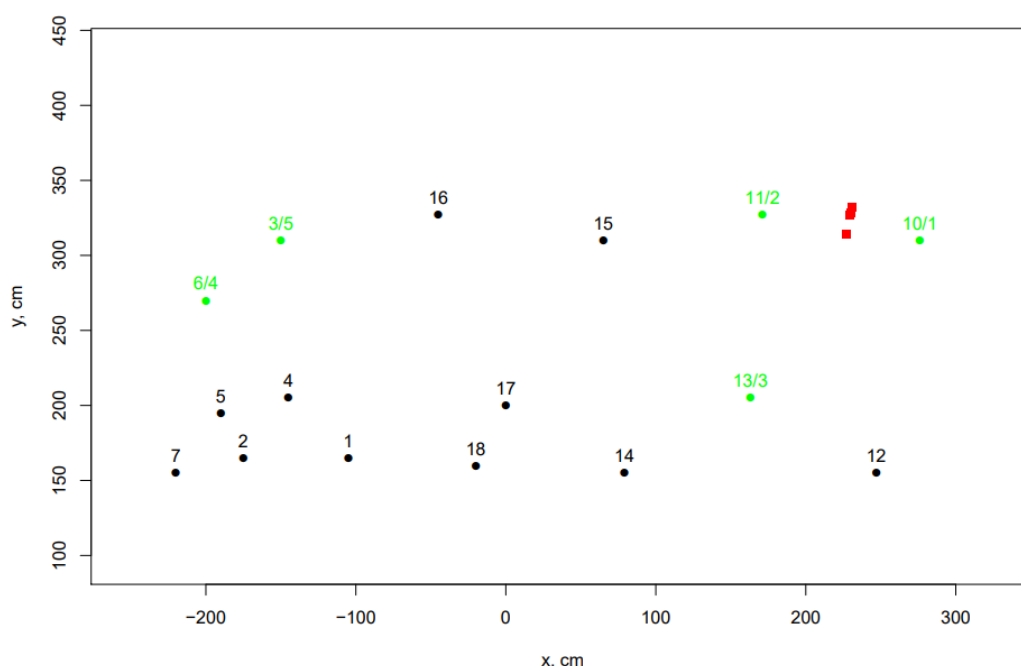


Рис. 1: Результат работы метода для одного сигнала.

В Табл. 1 значения координат и скорости для каждой точки потенциального расположения источника АЭ. На Рис. 1 показан результат метода для одиночной акустической волны: зеленым цветом выделены датчики, обнаружившие волну, красным — набор потенциальных точек. На последнем этапе удалялись наборы с более чем 4 решениями (возможными точками расположения) и вычислялось среднее значение для каждого набора точек.

После усреднения значений в каждом наборе точек был получен набор данных для дальнейшей кластеризации.

3.3. Кластеризация данных

На сегодняшний день существует множество подходов к кластеризации данных, различающихся типом данных и алгоритмом кластеризации. Разные алгоритмы имеют разные преимущества и недостатки, а также разные требования к входным параметрам. В [9] использовался алгоритм К-средних с инициализацией центров кластеров случайным равномерным распределением. В [5] использовались карта Кохонена и анализ главных компонент.

Для кластеризации данных был выбран алгоритм DBSCAN [8], поскольку он не требует заранее знать количество кластеров, дает одинаковый результат для одного и того же набора данных и устойчив к выбросам.

Алгоритм кластеризации был применен к ранее полученному набору данных для определения областей кластеризации точек.

Суть разработанного метода кластеризации заключается в автоматическом вычислении диапазонов характеристик, характерных для данного конкретного объекта, для одной из опасных зон, в которой заведомо имеется дефект, и на основании этого нахождения остальных зон вероятных дефектов. Для работы метода необходимы координаты прямоугольника, в котором находится искомая зона, и количество высокоамплитудных импульсов в этом прямоугольнике. Число определяется опытным путем и варьируется от 3 до 10 в зависимости от того, насколько поврежден объект, исходя из [10]).

Так как важно учитывать не только расположение точек, но и значения амплитуды и скорости, для правильного формирования кластеров. Выбор параметров основывался на следующих статьях: [10, 20, 15].

Была разработана и применена следующая метрика:

$$f(i, j) = w_1 * l + w_2 * v + w_3 * a, \quad (4)$$

i, j – точки из набора данных; w_1, w_2, w_3 – весовые коэффициенты расстояния, скорости и амплитуды соответственно;

$$l = \sqrt{\left(\sum_{k=0}^n \frac{x_{ik}}{n} - \sum_{k=0}^m \frac{x_{jk}}{m}\right)^2 + \left(\sum_{k=0}^n \frac{y_{ik}}{n} - \sum_{k=0}^m \frac{y_{jk}}{m}\right)^2} \quad (5)$$

$$v = \left| \sum_{k=0}^n \frac{v_{ik}}{n} - \sum_{k=0}^m \frac{v_{jk}}{m} \right| \quad (6)$$

$$a = \min\left(\sum_{k=0}^n \frac{a_{ik}}{n}; \sum_{k=0}^m \frac{a_{jk}}{m}\right) \quad (7)$$

где x , y , v , a – усредненные координаты, скорость, амплитуда точек в наборах, описанных в разделе 3.2., n , m – количество точек в этих наборах. Для каждого из параметров (расстояния, скорости и амплитуды) были использованы соответствующие пороговые значения для расчета глобального эпсилон, используемого в алгоритме DBSCAN:

$$EPS = w_1 * eps_l + w_2 * eps_v + w_3 * eps_a, \quad (8)$$

После применения алгоритма из результирующего множества кластеров удаляются кластеры с большим количеством элементов, так как в реальных случаях такие кластеры, скорее всего, являются сигналами, полученными в результате трения объекта об опору, не являющуюся дефектом. в зависимости от того, как проводился эксперимент, большими считаются кластеры из 10-20 элементов.

В результате полученные кластеры отображают области на объекте, которые с наибольшей вероятностью имеют дефекты и должны быть проверены специалистом.

4. Эксперимент

Для проверки методов использовались данные нескольких реальных экспериментов. Образование и развитие дефектов в процессе нагружения объекта контролировали путем регистрации сигналов акустической эмиссии в режиме реального времени с помощью системы Amsy-5 Vallen (Германия) по методике [6].

В первом эксперименте объектом исследования был цилиндрический сосуд высокого давления: сепаратор из стали 09Г2С-17+08Х13 высотой 3200 [мм], внутренним диаметром 2000 [мм] и толщиной стенки 12 [мм]. Было проведено гидравлическое испытание: сосуд был заполнен водой и находился под возрастающим давлением в течение 50 минут. В процессе загрузки в объекте появилось несколько трещин, которые зафиксировали специалисты. Исходные данные содержали 24579 строк данных датчиков, из которых после первичной обработки данных осталось 4856 строк, что составляет 1061 сигнал.

Во втором эксперименте объектом исследования служил сепаратор низкого давления из стали 09Г2С-12+08Х13 высотой 6674 [мм], внутренним диаметром 2400 [мм] и толщиной стенки 14 [мм]. Вместимость аппарата - 31,0 мЗ. Проведено то же гидравлическое испытание, что и в первом эксперименте.

После применения метода локации к данным первого эксперимента были рассчитаны наборы возможных координат источников АЭ для 206 сигналов из набора данных. Для каждого из результирующих сигналов были получены наборы, как на Рис. 1, и отображены на одной диаграмме местоположения на Рис. 2. В результате кластеризации было получено 17 кластеров.

Сигналы с 1 решением показаны зеленым, сигналы с 2 или 3 решениями – синим, сигналы с 4 решениями – красным. Важно отметить, что скорость рассчитывается для каждого сигнала и для каждого решения в отдельности. Таким образом, на Рис. 2 показаны все точки расположения источников АЭ, полученные данным методом для исследуемого объекта. При этом скорости различных сигналов АЭ различны. Они

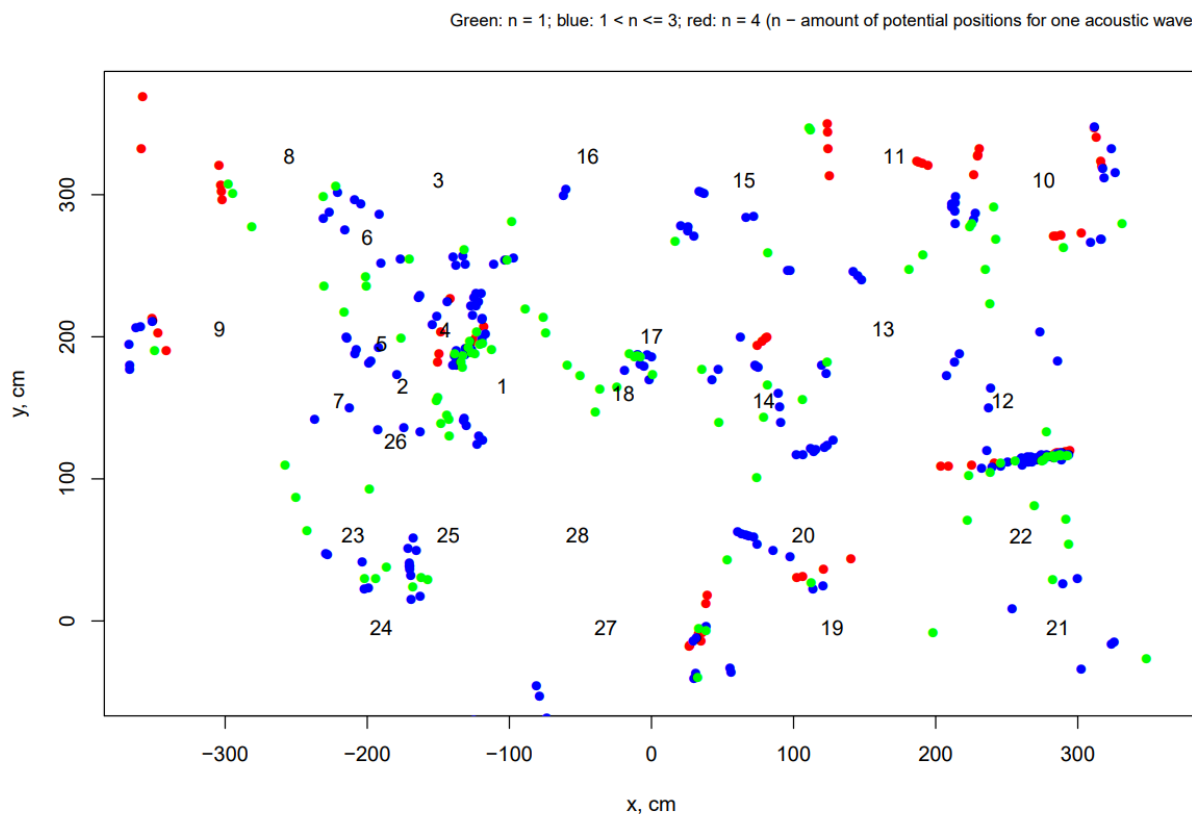


Рис. 2: Множество потенциальных позиций источников сигналов.

могут быть разными даже для каждого из четырех решений одного сигнала.

Области скопления точек совпадают с участками, указанными специалистами для дополнительного контроля, в связи с возможным наличием в этих участках дефектов. Показана правильность применения этого метода при обследовании объектов данного типа.

Во втором эксперименте после применения метода локации был получен набор данных из 534 точек. В результате кластеризации было получено 5 кластеров.

На Рис. 3 и Рис. 4 красными прямоугольниками отмечены области, в которых действительно были обнаружены дефекты. Точки с амплитудой от 40 [дБ] до 55 [дБ] окрашены в зеленый цвет, с амплитудой от 55 [дБ] до 60 [дБ] — в желтый, а с амплитудой более 60 [дБ] — в красный. Точки, не попавшие ни в один кластер, окрашены в черный цвет. На Рис. 3 видно, что кластеры образовались рядом с каждой проблем-

ной зоной, а несколько кластеров образовались вблизи области опор конструкции, где часто возникает много сигналов АЭ.

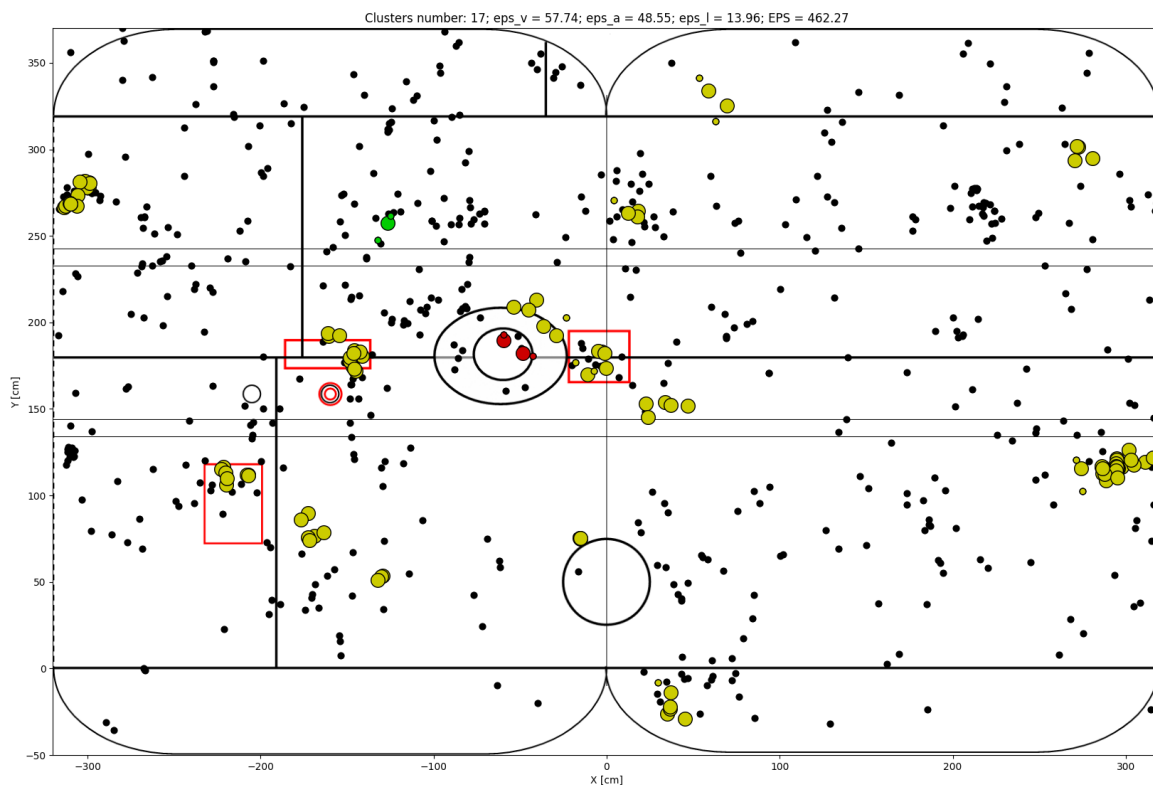


Рис. 3: Результат работы метода для первого эксперимента.

В третьем эксперименте проводилась калибровка датчиков, в ходе которой имитировались события АЭ с помощью специального прибора в разных местах объекта. После применения метода локации были корректно выделены 5 групп источников АЭ, соответствующие имитированным сигналам Рис. 5.

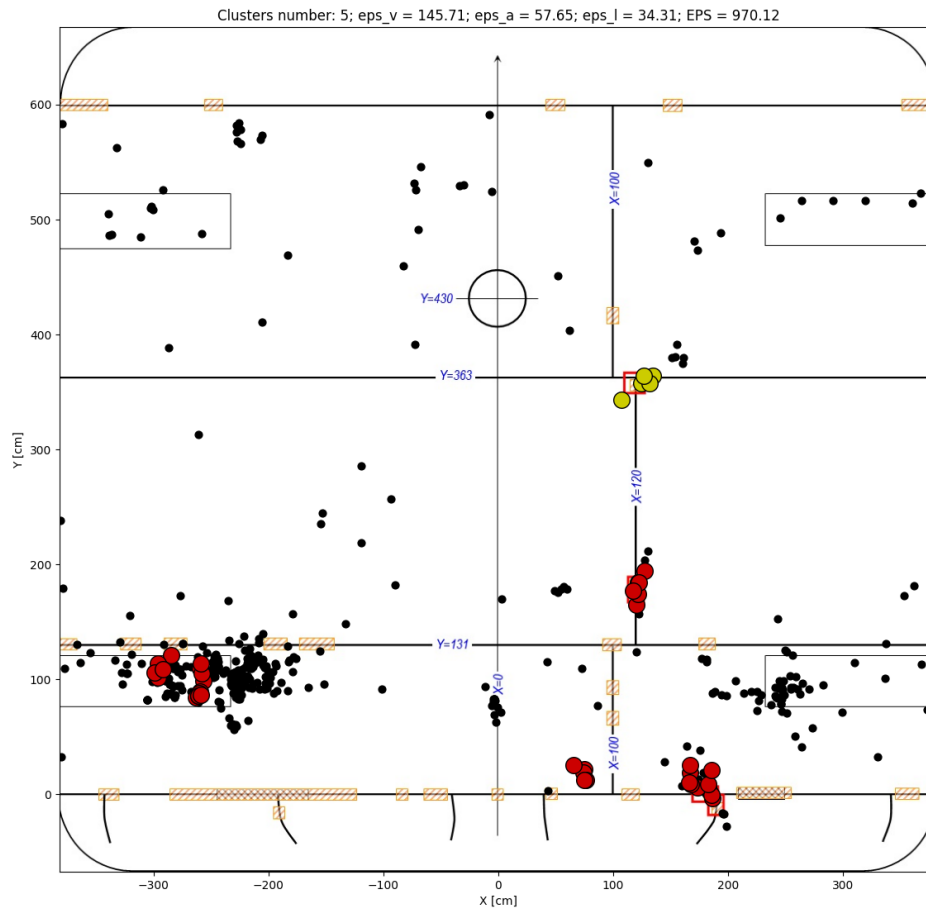


Рис. 4: Результат работы метода для второго эксперимента.

5. Библиотека

В ходе разработки различных методов для работы с данными АЭ было решено скомпоновать все результаты в единую библиотеку. Для разработки библиотеки был выбран язык программирования Python в виду удобства работы с данными, а также наличия различных пакетов с функционалом для применения методов машинного обучения и математики. На данный момент решается проблема совмещения всех разработанных методов в виду того, что они были написаны на разных языках программирования, а следовательно требуется провести рефакторинг кода, написанного за несколько лет

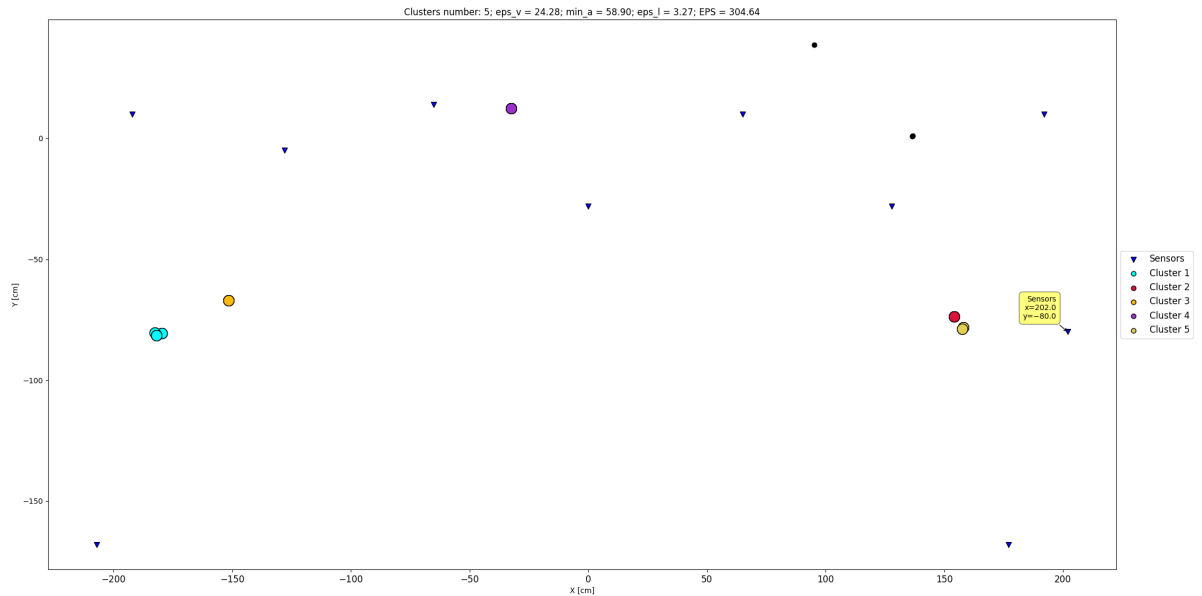


Рис. 5: Результат работы метода для третьего эксперимента.

Заключение

Полученные результаты демонстрируют правильность разработанного метода. Метод был опробован на реальных экспериментах. Применение разработанного метода значительно сокращает площади объекта, подлежащие проверке специалистом.

Были выполнены следующие задачи:

- Из исходных данных были удалены шумы;
- Сигналы АЭ были локализованы разработанным методом;
- Была применена кластеризация с разработанной метрикой;
- Метод был проверен на нескольких экспериментах;

В дальнейшем планируется объединить все разработанные методы в единую библиотеку.

Список литературы

- [1] Agletdinov E. Merson D. Vinogradov A. New method of low amplitude signal detection and its application in acoustic emission // Applied Sciences. — 2020. — Vol. 10, no. 1. — P. 73.
- [2] Balagurin P. Makarikhin P. Grigorieva A. Assessment of the integrity of the object based on the correlation of super-signals // Springer Nature, Lecture Notes in Mechanical Engineering. — 2020. — P. 73–80.
- [3] Barat V. Borodin Y. Kuzmin A. Intelligent ae signal filtering methods // Journal of Acoustic Emission. — 2010. — Vol. 28. — P. 109–119.
- [4] Bonvech E.A. Chernov D.V. Finger M. Finger M. Galkin V. Podgrudkov D. Roganova T. Vaiman I. EAS Observation Conditions in the SPHERE-2 Balloon Experiment // Universe. — 2022. — Vol. 8, no. 1. — P. 46–66.
- [5] Calabrese L. Campanella G. Proverbio E. Use of cluster analysis of acoustic emission signals in evaluating damage severity in concrete structures // Journal of Acoustic Emission. — 2010. — Vol. 28.
- [6] Damaskinskaya E. E. Hilarov V. L. Panteleev I. A. Korost D. V. Damaskinskii K. A. In-situ estimation of defect volume from parameters of acoustic emission signals // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2103, no. 1.
- [7] Davydova D. G. Kuz'min A. N. Rizvanov R. G. Aksel'rod E. G. Identification of acoustic-emission sources during testing of technological equipment with a high noise level // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2015. — Vol. 51, no. 5. — P. 292–302.
- [8] Ester M. Kriegel H. P. Sander J. Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // KDD. — 1996. — Vol. 96, no. 34. — P. 226–231.

- [9] Feifei L. Haifeng X. Validity identification and classification technique of tank acoustic emission testing signals based on clustering analysis // Eighth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD). — 2011. — Vol. 3. — P. 2000–2003.
- [10] Gomera V.P. Smirnov A.D. Nefedyev E. Yu.X. Increase of AE Testing Reliability of Equipment Containing Internal Devices // NDT world review. — 2014. — Vol. 3, no. 65. — P. 20–24.
- [11] Makhutov N. A. Ivanov V. I. Sokolova A. G. Vasil'ev I. E. Chernov D. V. Skvortsov D. F. Bubnov M. A. Monitoring Composite Fiber Failure Using Acoustic Emission System, Vibration Analyzer, and High-Speed Video Recording // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2020. — Vol. 56, no. 12. — P. 960–970.
- [12] Nosov V.V. Zelenskii N.A. Estimating the Strength of Welded Hull Elements of a Submersible Based on the Micromechanical Model of Temporal Dependences of Acoustic-Emission Parameters // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2017. — Vol. 53, no. 2. — P. 89–95.
- [13] Pyko N.S. Pyko S.A. Markelov O.A. Karimov A.I. Butusov D.N. Zolotukhin Y.V. Uljanitski Y.D. Bogachev M.I. Assessment of cooperativity in complex systems with non-periodical dynamics: Comparison of five mutual information metrics // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Elsevier. — 2018. — Vol. 503, no. C. — P. 1054–1072.
- [14] Rastegaev I.A. Gomera V.P. Tyupin S.A. Smirnov A.D. Grigorieva A.V. Estimating the Probability of Detecting a Delamination in the Wall of Equipment Depending on the Set of Used Methods of Nondestructive Testing and Ways of Its Improvement // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2018. — Vol. 54, no. 9. — P. 619–629.
- [15] Rastegaev I.A. Yasnikov I.S. Rastegaeva I.I. Agletdinov E.A. Merson D.L. Estimation of detection probability of acoustic-emission sig-

nals by the method of amplitude discrimination at a low signal-to-noise ratio // Defectoscopy. — 2022. — Vol. 3. — P. 3–12.

- [16] Rastegaev I.A. Merson D.L. Rastegaeva I.I. Vinogradov A.Yu. A time-frequency based approach for acoustic emission assessment of sliding wear // Lubricants. — 2020. — Vol. 8, no. 5. — P. 52.
- [17] Sedlak P. Hirose Y. Khan S.A. Enoki M. Sikula J. New automatic localization technique of acoustic emission signals in thin metal plates // Ultrasonics. — 2009. — Vol. 49. — P. 254–262.
- [18] Ser'eznov A. N. Stepanova L. N. Laznenko A. S. Kabanov S. I. Kozhemyakin V. L. Chernova V. V. Static Tests of Wing Box of Composite Aircraft Wing Using Acoustic Emission and Strain Gaging // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2020. — Vol. 56, no. 8. — P. 611–619.
- [19] Van der Baan M. Vaezi Y. Comparison of the STA/LTA and power spectral density methods for microseismic event detection // Geophysical Journal International. — 2015. — Vol. 203. — P. 1896–1908.
- [20] Yaroslavkina E. Investigation of methods for determining the integral characteristics of periodic signals separated in time // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). — 2018. — P. 1–4.
- [21] Yaroslavkina E. Kuzkin V. Yaroslavkin A. Turin E. The investigation of aluminum crystallization process using acoustic emission method // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). — 2020. — P. 1–6.
- [22] Иванов В.И. Бигус Г.А. Власов И.Э. Акустическая эмиссия. 2-е изд. — М.:Издательский дом "Спектр", 2015. — P. 192.