

УДК 621.391 : 519.24

## КЛАССИФИКАЦИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ПРИЗНАКАМ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Д. О. Соколова, А. А. Спектор

*Новосибирский государственный технический университет,  
630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20  
E-mail: sokolovado@gmail.com  
spectoraa@mail.ru*

Рассматривается проблема классификации объектов в сейсмических системах охраны на основе статистического анализа спектральных моментов, используемых в качестве признаков классификации. Разработан адаптивный алгоритм, выполнено экспериментальное определение его эффективности.

*Ключевые слова:* сейсмическая система охраны, классификация объектов, принцип максимального правдоподобия, спектральные моменты.

**Введение.** В развитии современных систем охраны в настоящее время заметное место отводится сейсмическому принципу [1–3]. Основанные на нём сейсмические системы охраны (ССО) обладают значительными потенциальными возможностями автоматически обнаруживать сейсмоактивные объекты, оценивать их траектории, определять тип (решать задачу классификации). При этом их важным достоинством является практически полная скрытность, поскольку принцип действия ССО пассивен, а сейсмические датчики и соединительные провода обычно погружаются в грунт.

Решение перечисленных задач ССО требует развития математических методов, создания алгоритмов и программ, реализующих необходимые функции обработки сигналов. Если по обнаружению сейсмических сигналов и оценке траекторий имеются опубликованные исследования [4–9], то по классификации объектов с помощью ССО степень исследования проблемы недостаточна [10–12].

Целью данной работы является развитие метода классификации сейсмоактивных объектов, основанного на использовании спектрального анализа сигналов.

**Байесовская классификация сейсмических сигналов на базе моментных характеристик спектров.** Известно, что сигналы, регистрируемые сейсмическими датчиками, образуются в результате суперпозиции сейсмических волн, распространяющихся в грунте по многолучевым траекториям. Поэтому они подчиняются гауссову распределению, а спектрально-корреляционные свойства позволяют использовать марковские модели, основанные на рекуррентных линейных механизмах предсказания [4, 6]. Сейсмический фоновый сигнал на ограниченном промежутке времени представляет собой стационарный случайный процесс. Наличие сейсмоактивных объектов проявляется как в характере сигналов, так и в их спектрально-корреляционных характеристиках. Например, сейсмический сигнал идущего человека является импульсным случайным процессом, который, как и фон, на интервале длительности импульса может быть описан марковской моделью линейного предсказания, но с иными значениями параметров. Это означает, что на участках присутствия импульсов спектрально-корреляционные характеристики отличаются от аналогичных характеристик фона — участков, не содержащих импульсов.

Спектрально-корреляционные характеристики сигналов большей протяжённости, включающей один или несколько периодов шагов, занимают промежуточное положение, поскольку сейсмические сигналы в этом случае представляют собой смесь полезного импульсного и фонового непрерывного случайных процессов. Наличие группы идущих людей в среднем увеличивает заполнение интервала наблюдения участками со свойствами импульсного сигнала. Это дополнительно удаляет спектрально-корреляционные характеристики от характеристик фонового сигнала. Таким образом, присутствие человека (или нескольких человек) вносит изменение в спектрально-корреляционные свойства получаемых сейсмических сигналов. У разных типов сейсмоактивных объектов существенно различаются конкретные многолучевые механизмы образования сигналов, а, следовательно, и их спектральные характеристики. Этим определяется их потенциальная различимость.

При обнаружении сейсмоактивных объектов, оценивании параметров и траекторий их движения в качестве первичной обработки предлагается осуществлять адаптивную декорреляцию (выбеливание) фонового сигнала [4–7]. Обучение, выполняемое на участках, где присутствует только фоновый сигнал, сводится к измерению его корреляционной функции. С её помощью затем определяются коэффициенты предсказания, описывающие линейный рекуррентный механизм порождения фона из белого шума. Эти же коэффициенты задают и механизм выбеливания, при выполнении которого на участках фона образуется белый гауссов шум. На участках же, где имеется смесь полезного сигнала и фона, составляющая полезного сигнала, также подвергнутая выбеливанию (но по параметрам модели фона), остаётся окрашенным гауссовым процессом, сохраняющим индивидуальные особенности спектрально-корреляционных характеристик, свойственные тому или иному типу сейсмоактивного объекта. Мера спектральных различий сейсмических сигналов, вызванных действием разных объектов, видна из рис. 1. Отметим, что представленные на рисунке спектральные плотности мощности (СПМ) являются случайными реализациями, которые от наблюдения к наблюдению претерпевают случайные изменения.

Предлагаемый в данной работе подход основан на использовании для классификации объектов моментных характеристик спектра сигнала, выбеленного по параметрам модели

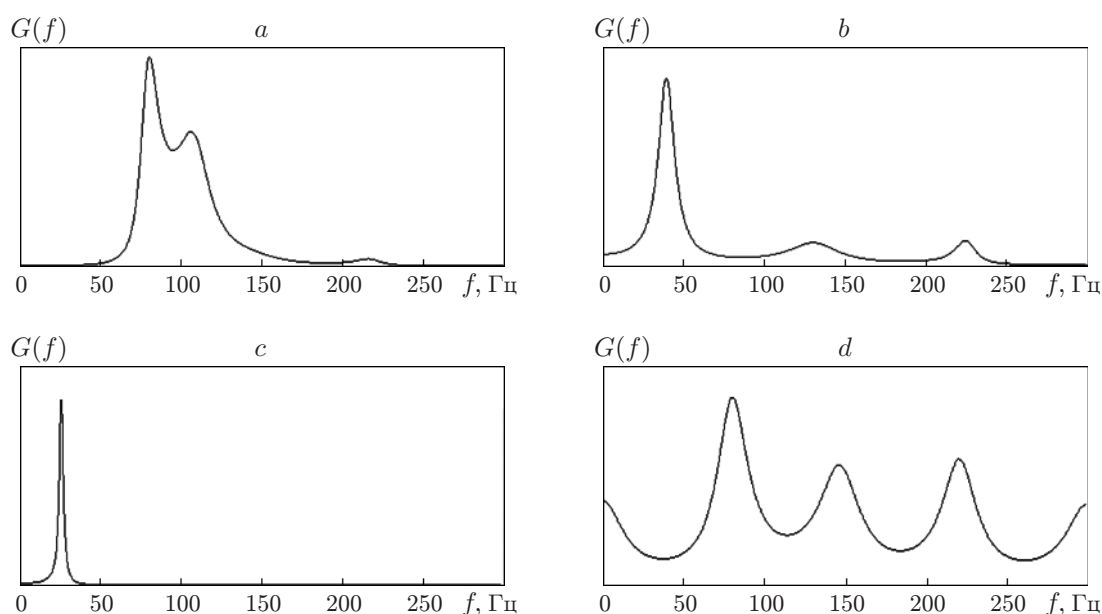


Рис. 1. СПМ выбеленных (по параметрам фона) сейсмических сигналов: самолёта (а), автомобиля (b), человека (c) и фона (d)

фона (далее для краткости будем говорить о преобразованном сигнале). Пусть  $G_i(f)$  — СПМ преобразованного сейсмического сигнала, соответствующая сейсмоактивному объекту  $i$ -го класса. Полагаем, что СПМ  $G_i(f)$  нормирована по полной мощности, т. е. имеет место равенство

$$\int_0^{\infty} G_i(f) df = 1, \quad \forall i.$$

Поскольку, кроме того, плотности мощности  $G_i(f) \geq 0$ , их точное представление может быть основано на использовании множества начальных моментов

$$x_k = \int_0^{\infty} f^k G_i(f) df, \quad k = 1, 2, \dots,$$

либо комбинации начальных и центральных моментов [13]

$$\widehat{x}_k = \int_0^{\infty} (f - x_1)^k G_i(f) df.$$

При конечном наборе моментов

$$\mathbf{X} = \|x_1, x_2, \dots, x_K\|^T, \quad k = \overline{1, K},$$

вектор которых может служить в качестве признака для классификации сейсмоактивных объектов, получается приближённое представление СПМ.

Далее рассматривается классификация на основе четырёхмерного вектора признаков  $\mathbf{Y} = \|y_1, y_2, y_3, y_4\|^T$ , элементами которого являются:  $y_1 = x_1$  — начальный момент первого порядка СПМ  $G_i(f)$ ;  $y_2 = x_2 - x_1^2 = \widehat{x}_2$  — центральный момент второго порядка;  $y_3 = \widehat{x}_3 / \sqrt{\widehat{x}_2^3}$  — коэффициент асимметрии функции  $G_i(f)$ ;  $y_4 = \widehat{x}_4 / \widehat{x}_2^2 - 3$  — коэффициент эксцесса.

Подчеркнём, что в силу случайности СПМ, образцы которых приведены на рис. 1, случайными являются элементы вектора признаков. Так, например, при сравнительно узкой СПМ выделенного сигнала человека (рис. 1, *с*) значение средней частоты (признак  $y_1$ ) может изменяться в достаточно широких пределах. Многофакторный характер сейсмической среды приводит к тому, что при построении статистических эталонов объектов целесообразно использовать как можно больше обучающих наборов сигналов, полученных в доступных разнообразных условиях наблюдения. Одним из таких существенных факторов является расстояние от точки сейсмического воздействия до сейсмического датчика, при увеличении которого происходит ослабление верхних частот спектра, что, конечно, изменяет и спектр выделенных сигналов. Отметим, однако, что влияние последнего фактора не следует переоценивать: поскольку дальность сейсмического наблюдения в охранных системах обычно сравнительно невелика (15–30 м), сигналы поддаются эффективному анализу на этих расстояниях. В таких пределах спектральные различия сигналов, хотя и проявляются, но не оказывают радикального влияния на статистическое поведение признаков.

Пусть имеется множество  $I$  эталонных плотностей распределения вероятностей (ПРВ)  $P(\mathbf{Y} | A_i)$ ,  $i = \overline{1, I}$ , векторного признака  $\mathbf{Y}$  для  $I$  классов  $A_i$  объектов, подлежащих класси-

фикации. Статистический классификатор, работающий по принципу максимального правдоподобия, выносит решение по правилу

$$A^* = \arg \max_{A_i} P(\mathbf{Y} | A_i). \quad (1)$$

Максимальная эффективность классификации достигается, если решение принимать по окончании сигнала, содержащего сейсмическое воздействие объекта. Однако ССО принадлежат к числу систем реального времени, где задержки в принятии решения обычно недопустимы. В том числе и классификация объектов должна происходить во время поступления сигналов на вычислительное устройство, осуществляющее принятие решения. Приемлемой представляется стратегия поэтапного уточнения решения, которая может быть реализована путём разбиения всего времени анализа на относительно небольшие интервалы наблюдения и принятия решения в моменты окончания каждого такого интервала. Каждое новое решение в отличие от предыдущих опирается на более полный объём данных, статистически более точное и поэтому нейтрализует все ранние решения системы. Вместе с тем для оператора ССО информативной является вся совокупность более ранних решений, поскольку отражает не только факт его возникновения, но и динамику содержания, которое статистически сходится к правильному решению.

Пусть  $m = 1, 2, \dots, M$  — номер локального интервала анализа;  $M$  — полное число интервалов;  $P(\mathbf{Y}_m | A_i)$ ,  $m = \overline{1, M}$ ,  $i = \overline{1, I}$ , — ПРВ вектора признаков  $\mathbf{Y}_m$  для  $m$ -го интервала наблюдения в присутствии объекта типа  $A_i$ . Поскольку длительности отдельных интервалов наблюдения существенно превышают интервал корреляции сигналов, локальные значения векторов  $\mathbf{Y}_m$  можно считать независимыми и совместное распределение вероятностей для текущего числа  $M_T$  интервалов определить выражением

$$P(\mathbf{Y}_T | A_i) = \prod_{m=1}^{M_T} P(\mathbf{Y}_m | A_i), \quad i = \overline{1, I}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{Y}'_T = \|\mathbf{Y}'_1, \mathbf{Y}'_2, \dots, \mathbf{Y}'_{M_T}\|$  — полный для текущего множества интервалов вектор признаков, составленный из локальных векторов. Далее, учитывая накопительный характер образования оценок моментов, примем гауссово распределение четырёхмерного вектора  $\mathbf{Y}_m$ :

$$P(\mathbf{Y}_m | A_i) = (2\pi)^{-2} |\mathbf{K}_i|^{-1/2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\mathbf{Y}_m - \bar{\mathbf{Y}}_i)' \mathbf{K}_i^{-1} (\mathbf{Y}_m - \bar{\mathbf{Y}}_i) \right\}, \quad m = \overline{1, M}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (3)$$

где  $\bar{\mathbf{Y}}_i$ ,  $\mathbf{K}_i$ ,  $|\mathbf{K}_i|$  — математическое ожидание, ковариационная матрица и её детерминант вектора признаков объектов  $i$ -го класса  $A_i$ . Использование ПРВ признаков (3) приводит к простым процедурам адаптации и классификации, что представляет существенным достоинством развиваемого метода при условии достаточно высокой для практического применения эффективности синтезируемых алгоритмов классификации. Более строгий подход может быть основан на негауссовых моделях, адаптация которых, однако, потребует в процессе обучения образовывать оценки четырёхмерных негауссовых распределений вектора признаков [14], что существенно усложнит процедуры обработки. Решение этих задач может послужить предметом отдельного исследования.

При использовании выражения (3) обучение сводится к получению оценок векторов  $\bar{\mathbf{Y}}_i$  средних значений признаков для всех классов объектов  $A_i$  и их матриц ковариаций  $\mathbf{K}_i$ . Сама же процедура классификации, выполняемая на основе соотношений (1)–(3), легко реализуется вычислительными устройствами ССО.

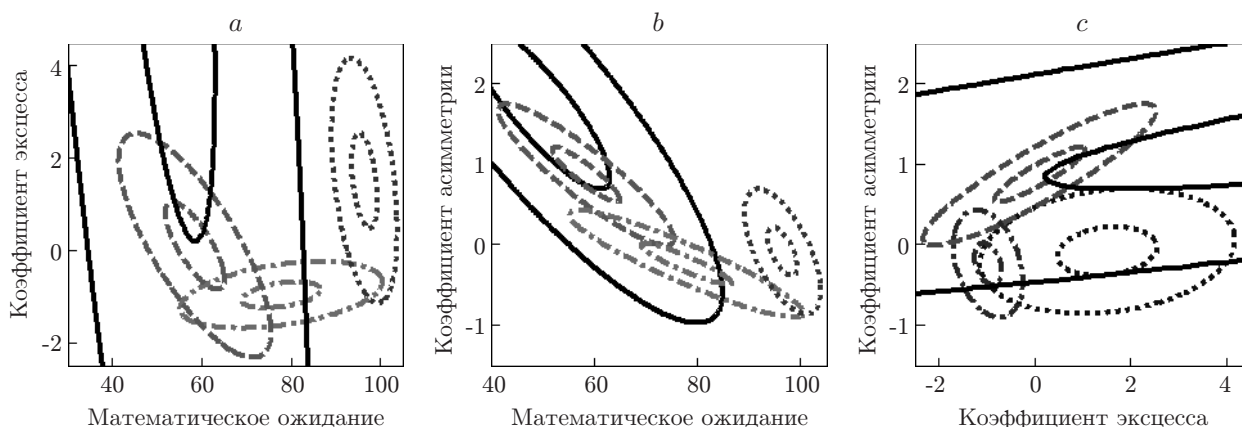


Рис. 2. Эллипсы равных вероятностей для различных парных комбинаций признаков (сплошная линия — человек, пунктирная — самолёт, штриховая — автомобиль, штрихпунктирная — фон)

**Результаты анализа характеристик байесовского классификатора на основе спектральных моментов.** Обучение выполняется по классифицированному наблюдению, когда известен тип объекта, вызвавшего появление наблюдаемого сейсмического сигнала. После адаптивного выбеливания (по параметрам математической модели фонового сигнала) используемый для обучения сигнал разбивается на интервалы той же длины, что и интервалы в рабочем режиме ССО при классификации объектов. Для каждого из них определяется нормированный спектр  $G_i^{(r)}(f)$ , где, как и ранее, индекс  $i$  обозначает номер класса объекта, которому соответствует СПМ, а индекс  $r$  является номером интервала в сигнале, используемом для обучения. Далее по приведённым формулам вычисляются необходимые спектральные моменты и компоненты вектора признаков  $\mathbf{Y}_i^{(r)}$ ,  $r = \overline{1, R}$ , для всех  $R$  обучающих интервалов. Оценки математического ожидания и ковариационной матрицы находятся обычным образом:

$$\bar{\mathbf{Y}}_i = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \mathbf{Y}_i^{(r)}, \quad K_i = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R (\mathbf{Y}_i^{(r)} - \bar{\mathbf{Y}}_i)(\mathbf{Y}_i^{(r)} - \bar{\mathbf{Y}}_i)'$$

Оценка эффективности классификации выполнена экспериментально с учётом записей сейсмических сигналов, полученных с помощью сейсмических приёмных устройств с полосой частот 120 Гц и оцифрованных с частотой дискретизации 600 Гц. Длительность локального интервала анализа составляла 1000 отсчётов, что соответствует 1,67 с реального времени. Объём обучающей выборки при проведении экспериментов  $R = 50$ .

На рис. 2 в качестве примеров приведены эллипсы равных вероятностей на уровнях 0,5 и 0,1\* для двумерных распределений различных парных комбинаций элементов вектора признаков и различных классов объектов. Видно, что многомерные распределения характеризуются слабо выраженными различиями типа «сдвиг», что приводит к пересечению эллиптических областей, в некоторых случаях достаточно сильному. Вместе с тем имеются существенные различия в значениях корреляционных матриц, которые проявляются в размерах эллиптических областей и положении их осей. Статистические критерии гарантируют использование различий всех типов, и их эффективность возрастает, если

\* Под эллипсом равных вероятностей понимается эллиптическая область, в которую с фиксированной вероятностью могут попасть точки со случайными координатами, распределёнными по нормальному закону [13].

Таблица 1

## Результаты классификации при фактическом объекте «человек»

Тип альтернативного объекта	Полное число локальных циклов $M$			
	1	5	10	15
<b>Человек</b>	<b>0,367</b>	<b>0,721</b>	<b>0,735</b>	<b>0,824</b>
Группа из двух человек	0,015	0	0,088	0,073
Группа из трёх человек	0	0	0	0
Крупное животное	0,030	0,029	0,030	0,030
Мелкое животное	0,411	0,176	0,147	0,073
Автомобиль	0,147	0,059	0	0
Самолёт	0	0	0	0
Фон	0,030	0,015	0	0

удаётся применить многократные наблюдения с накоплением локальных результатов. В предлагаемом методе накопление реализуется за счёт разбиения общего времени анализа и получения локальных результатов на отдельных интервалах.

Основные результаты экспериментов представлены в табл. 1–5. Каждая таблица соответствует фактическому присутствию объекта одного из классов (указан в заголовках). В таблицах (в процентах к общему числу экспериментов) приведены данные о решениях в пользу различных классов объектов, обозначенных в левом столбце. Полное число циклов  $M$ , используемых для принятия решения, изменялось от 1 до 15, что соответствует реальному времени анализа от 1,67 до 25,05 с.

Если при решении задачи классификации не стоит задача определения количества человек в группе, то данные по двум классам объектов (группа из двух человек и группа из трёх человек) объединяются, что отражено в последней строке табл. 2.

Из таблиц видно, что при увеличении времени анализа точность выносимого решения возрастает. Так, например, в присутствии человека при увеличении числа используемых для анализа локальных циклов наблюдения от 5 до 15 происходит увеличение числа правильных решений от 73 до 84 %. В целом полученные результаты свидетельствуют о

Таблица 2

## Результаты классификации при фактическом объекте «группа из трёх человек»

Тип альтернативного объекта	Полное число локальных циклов $M$			
	1	5	10	15
Человек	0,014	0,056	0,092	0,083
Группа из двух человек	0,097	0,111	0,092	0,069
<b>Группа из трёх человек</b>	<b>0,194</b>	<b>0,264</b>	<b>0,403</b>	<b>0,500</b>
Крупное животное	0,056	0	1	0,014
Мелкое животное	0,347	0,361	0,264	0,208
Автомобиль	0,181	0,139	0,083	0,069
Самолёт	0	0	0	0,028
Фон	0,111	0,069	0,065	0,028
Группа людей	0,291	0,375	0,495	0,569

Таблица 3

## Результаты классификации при фактическом объекте «крупное животное»

Тип альтернативного объекта	Полное число локальных циклов $M$			
	1	5	10	15
Человек	0,056	0,083	0,082	0,028
Группа из двух человек	0,250	0,361	0,250	0,278
Группа из трёх человек	0,139	0,222	0,139	0,110
<b>Крупное животное</b>	<b>0,139</b>	<b>0,167</b>	<b>0,418</b>	<b>0,528</b>
Мелкое животное	0,305	0,139	0,111	0,056
Автомобиль	0,083	0,028	0	0
Самолёт	0	0	0	0
Фон	0,028	0	0	0

Таблица 4

## Результаты классификации при фактическом объекте «мелкое животное»

Тип альтернативного объекта	Полное число локальных циклов $M$			
	1	5	10	15
Человек	0	0,059	0	0
Группа из двух человек	0	0	0	0
Группа из трёх человек	0	0	0	0
Крупное животное	0	0	0	0
<b>Мелкое животное</b>	<b>0,588</b>	<b>0,824</b>	<b>0,882</b>	<b>0,823</b>
Автомобиль	0,059	0	0	0
Самолёт	0	0	0,059	0,059
Фон	0,353	0,117	0,059	0,118

Таблица 5

## Результаты классификации при фактическом объекте «автомобиль»

Тип альтернативного объекта	Полное число локальных циклов $M$			
	1	5	10	15
Человек	0,267	0,133	0,102	0
Группа из двух человек	0,067	0	0	0
Группа из трёх человек	0,200	0,067	0,067	0
Крупное животное	0	0	0	0
Мелкое животное	0,133	0,200	0,147	0,133
<b>Автомобиль</b>	<b>0,200</b>	<b>0,533</b>	<b>0,617</b>	<b>0,867</b>
Самолёт	0	0	0	0
Фон	0,133	0,067	0,067	0

возможности применения предложенного метода в ССО, поскольку доля правильных решений отвечает требованиям, реально предъявляемым к этим системам.

**Заключение.** При относительно небольшом числе публикаций, относящихся к исследованиям сейсмического принципа охраны, наименьшее внимание уделено задаче классификации объектов. Предлагаемая работа представляет собой один из подходов, дающих возможность решения задачи при анализе сейсмической обстановки в реальном масштабе времени. Полученные результаты показывают, что использование спектральных моментов в качестве признаков позволяет рассчитать характеристики классификации, приемлемые для практического использования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Магауенов Р. Г.** Системы охранной сигнализации: основы теории и принципы построения: Учеб. пособие. М.: Горячая линия—Телеком, 2008. 496 с.
2. **Чистова Г. К.** Модели и методы обработки сейсмических сигналов в системах распознавания. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. 196 с.
3. **Курочкин Ю. Н., Иванов В. Э., Прыщак А. В. и др.** Вибросейсмическое средство обнаружения для использования в интегрированных средствах физической защиты // Сб. науч. тр. «Проблемы объектовой охраны». Пенза: Издательство ПГУ, 2000. Вып. 1. С. 61–68.
4. **Райфельд М. А., Спектор А. А.** Непараметрический метод обнаружения сигналов от сейсмически активных объектов // Автометрия. 2005. **41**, № 6. С. 88–97.
5. **Мархакшинов А. Л., Спектор А. А.** Оценивание локальных характеристик движения объекта в сейсмической системе охраны // Автометрия. 2009. **45**, № 5 С. 48–53.
6. **Спектор А. А., Филатова С. Г.** Оценка временного положения импульсов в сейсмических системах наблюдения на основе марковской фильтрации // Автометрия. 2008. **44**, № 4. С. 68–74.
7. **Спектор А. А., Тонконогов Е. А.** Рекуррентное оценивание меняющихся параметров динамических систем // Науч. вестн. НГТУ. 2009. № 1. С. 87–93.
8. **Succi G., Prado G., Gampert R. et al.** Problems in seismic detection and tracking // Proc. SPIE. 2000. **4040**. P. 165–173.
9. **Gramann R. A., Bennett M. B., O'Brien T. D.** Vehicle and personnel detection using seismic sensors // Proc. SPIE. 1999. **3577**. P. 74–85.
10. **Двойрис Л. И., Геращенко В. А.** Формирование признакового пространства сейсмических сигналов в частотной области // Радиотехника. 2010. № 2. С. 90–92.
11. **Митрохин М. А., Чистова Г. К.** Алгоритм классификации техники по сейсмическому сигналу // Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов: Матер. VII Всеросс. науч.-техн. конф. Пенза: Изд-во ПГУ, 2008. С. 151–153.
12. **Liang Z., Wei J., Zhao J. et al.** The statistical meaning of kurtosis and its new application to identification of persons based on seismic signals // Sensors. 2008. N 8. P. 5106–5119.
13. **Левин Б. Р.** Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1969. Т. 1. 752 с.
14. **Фомин Я. А., Тарловский Г. Р.** Статистическая теория распознавания образов. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.