

В. М. МУСАЛИМОВ, П. П. КОВАЛЕНКО, С. Ю. ПЕРЕПЕЛКИНА

## ПЕРЕЧИСЛИТЕЛЬНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Предложен новый метод классификации данных, полученных с помощью сканирующей зондовой микроскопии, на основе полиномов Морса и возможностей перечислительной комбинаторики.

**Ключевые слова:** классификация данных сканирующей зондовой микроскопии, полиномы Морса, перестановки.

**Введение.** Известно, что данные, получаемые с помощью сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), обрабатываются различными программами, в частности, FemtoScan Online, Gwyddion, SPIP и WSxM. Перечисленные программы применяют к получаемым данным СЗМ различные методы обработки сигналов и позволяют визуализировать их в том или ином виде. Существующие программы обработки данных направлены только на анализ сигналов и, как показали наши исследования, не позволяют решать задачу классификации технологических поверхностей. Международные системы классификации качества поверхностей, основанные на определении параметров шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_z$ , применимы только для микроизмерений и не позволяют однозначно классифицировать результаты измерений на наноуровне, так как определяются не характеристики поверхности, а некоторая потенциальная функция, описывающая межатомное взаимодействие поверхности и зонда. Целью настоящей статьи является разработка методов анализа и классификации сигналов, получаемых при использовании систем мониторинга качества технологических поверхностей, включая средства сканирующей зондовой микроскопии, на основе достижений и возможностей перечислительной комбинаторики с использованием логики паттернов [1, 2].

Настоящая работа посвящена развитию топологического метода классификации информации, поступающей со средств мониторинга качества поверхностей, основанного на использовании полиномов Морса и возможностей перечислительной комбинаторики [3, 4].

**Полиномы Морса** можно описать следующей функцией:

$$P(x) = a_0x^{n+1} + a_1x^n + a_2x^{n-1} + \dots + a_n, \quad a, x \in R.$$

Многочлен степени  $n+1$  имеет  $n$  критических точек и  $n$  критических значений. Рассмотрим многочлены вида:

$$P(x) = x^{n+1} + a_1x^n + a_2x^{n-1} + \dots + a_n,$$

где  $a_0 = 1$  — старший коэффициент.

Точка  $x_0$  называется критической для многочлена  $P(x)$ , если она является корнем его производной,  $P'(x_0) = 0$ . В критической точке касательная к графику многочлена горизонтальна. Значение многочлена в критической точке  $P(x_0)$  называется критическим. Многочлен  $P(x)$  называется морсовским, если все его:

- критические точки вещественны и различны;
- критические значения различны.

Каждому полиному Морса соответствует определенная числовая последовательность (перестановка) критических значений многочлена от наименьшего критического (номер 1) до наибольшего, номер которого зависит от количества критических точек и, следовательно, от

степени полинома. Перестановки, соответствующие полиномам Морса (пилообразные), называют типами этих полиномов [5].

Типом полинома Морса может являться только такая перестановка, последнее критическое значение которой меньше предыдущего. Таким образом, для полиномов с нечетной степенью  $n$  первый элемент перестановки должен быть меньше последующего, с четной  $n$  — больше. Исходя из вышеуказанного правила полиномы Морса можно разделить на две группы:


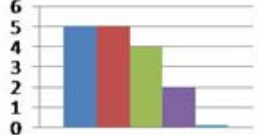

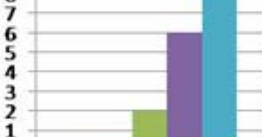

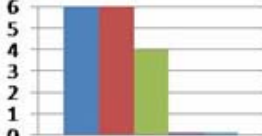
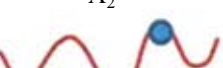
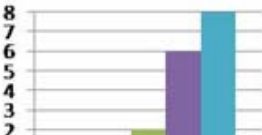
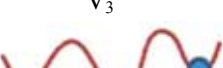
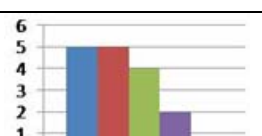
- если  $n$  нечетное ( $n = 1, 3, 5, 7 \dots$ ), то такие полиномы называются нечетными;
- если  $n$  четное ( $n = 2, 4, 6 \dots$ ), то такие полиномы называются четными.

**Распределения порядковых номеров критических значений в перестановках.** Рассмотрим полиномы Морса  $n = 5$ , они имеют три локальных минимума ( $V_1, V_2, V_3$ ) и два локальных максимума ( $\Lambda_1, \Lambda_2$ ), чередующихся между собой.

Известно, что данный класс полиномов включает 16 возможных перестановок номеров экстремумов, определяемых по их положению на позиции того или иного локального минимума или максимума (табл. 1).

Таблица 1

Распределение порядковых номеров критических значений

Порядковый номер экстремума	Локальный минимум или максимум	Распределения номеров критических значений	Перестановки				
I	$V_1$ 		13254 14352 15342 14253 15243	24153 23154 24351 25143 25341	34152 35241 35142 34251	45132 45231	
II	$\Lambda_1$ 				13254 23154	14253 14352 24153 24351 34152 34251	15243 15342 25143 25341 35142 35241 45132 45231
III	$V_2$ 		24153 23154 25143 34152 35142 45132	13254 14253 15243 35241 34251 45231	14352 15342 24351 25341		
IV	$\Lambda_2$ 				45132 45231	15342 15243 25143 25341 35241 35142	13254 14352 14253 23154 24153 24351 34152 34251
V	$V_3$ 		24351 25341 35241 34251 45231	34152 35142 45132 14352 15342	14253 15243 24153 25143	13254 23154	

Можно заметить, что полученные распределения несимметричны, при этом экстремумы I и V обладают одинаковыми распределениями. В свою очередь, распределения для экстре-

мумов II и IV идентичны. Отсюда можно сделать вывод, что распределения порядковых номеров в перестановках для нечетных полиномов симметричны относительно центрального экстремума.

Рассмотрим использование полиномов Морса  $n=5$  в качестве базы перечислительной классификации данных, получаемых со средств мониторинга качества поверхностей.

На рис. 1 представлена основа перечислительной классификации данных с использованием полиномов Морса с пятью критическими точками ( $n=5$ ):  $V_1$  — первый;  $V_2$  — второй;  $V_3$  — третий;  $\Lambda_1$  — четвертый;  $\Lambda_2$  — пятый подкласс. Для каждого подкласса указаны перестановки, которые могут входить в него. В рамках предлагаемой классификации эти перестановки будем называть типом. Каждый тип может принадлежать двум подклассам в зависимости от того, как он классифицируется — по положению наибольшего максимума (экстремума с порядковым номером 5) или минимума (экстремума 1). Для этого вычисляется среднее арифметическое всех значений (рис. 1, пунктир), составляющих классифицируемые данные. После этого определяются отклонения вершин и впадин от среднего значения, если отклонение впадины превышает отклонение выступа, классификация осуществляется по положению главной впадины, т.е. экстремума 1. Здесь возможны три варианта: экстремум 1 находится на позиции первой впадины  $V_1$ , тогда он относится к первому подклассу; если экстремум находится на позиции второй впадины  $V_2$ , то ко второму; в случае нахождения экстремума 1 на позиции  $V_3$  — к третьему.

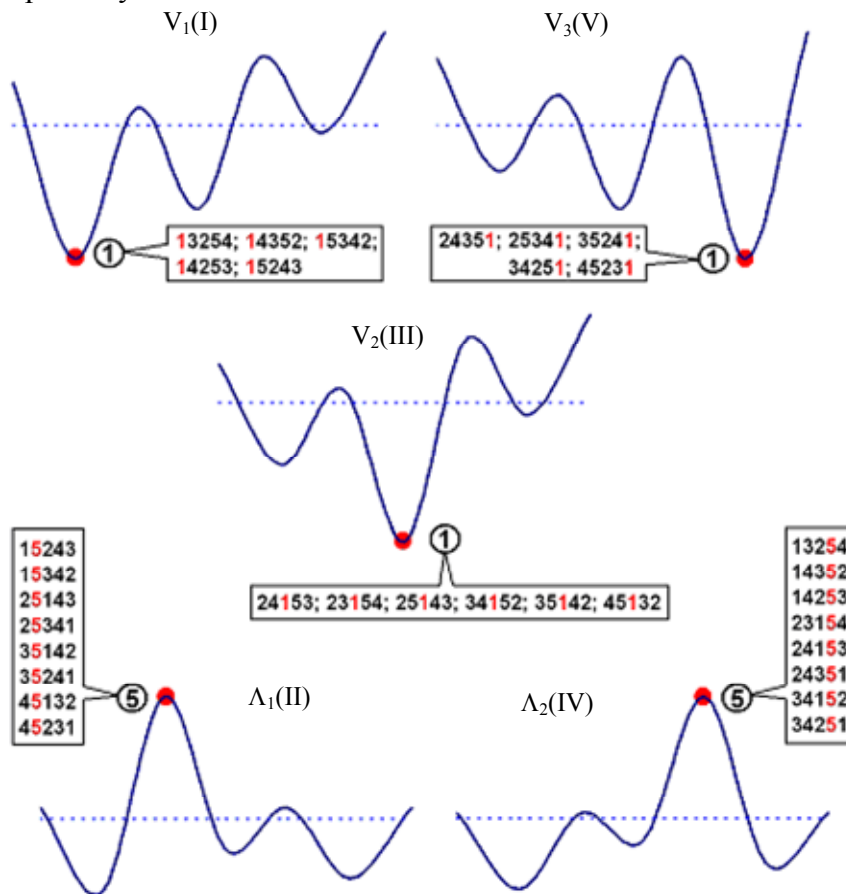


Рис. 1

Если отклонение вершины больше отклонения впадины, то выбор подкласса осуществляется по вершине, т.е. по положению экстремума 5: если он находится на позиции первого выступа  $\Lambda_1$ , имеет место четвертый подкласс, если на позиции  $\Lambda_2$  — пятый.

Аналогичным образом формируются четыре подкласса четвертого класса, в котором имеются два выступа и две впадины.

Рассмотрим полиномы Морса с шестью критическими точками ( $n=6$ ). Для данного класса имеется 61 перестановка. Каждый такой полином обладает тремя локальными минимумами  $V_1, V_2, V_3$  и тремя максимумами  $\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3$ . Аналогично полиномам пятого класса классификация производится по положению локального минимума (экстремума 1) или локального максимума (экстремума 6).

На рис. 2 представлены полиномы Морса, соответствующие полученным подклассам:  $V_1$  — первый;  $V_2$  — второй;  $V_3$  — третий;  $\Lambda_1$  — четвертый;  $\Lambda_2$  — пятый;  $\Lambda_3$  — шестой. В табл. 2 приведены подклассы с соответствующими им перестановками.

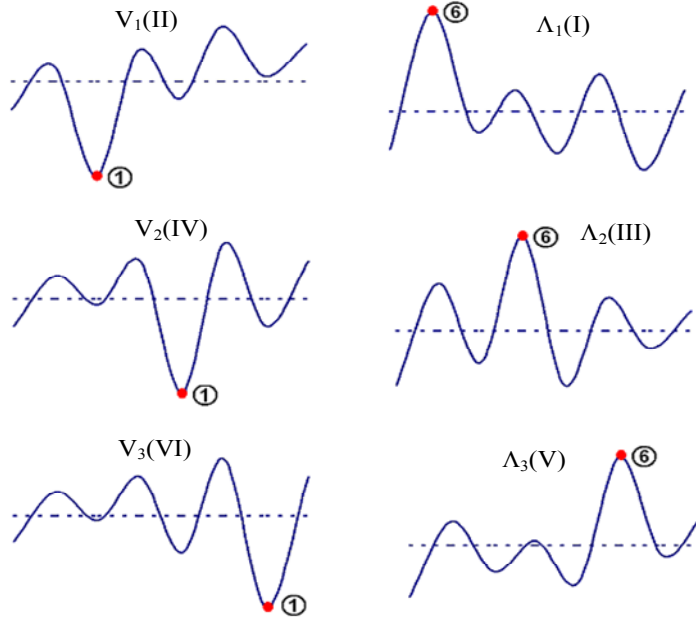


Рис. 2

Таблица 2

## Подклассы шестого класса

Первый	Второй	Третий	Четвертый	Пятый	Шестой
214365	324165	325461	613254	216354	214365
215364	325164	326451	614253	216453	215364
215463	326154	425361	614352	316254	215463
216354	423165	426351	615243	316452	314265
216453	425163	435261	615342	326154	315264
314265	426153	436251	623154	326451	315462
315264	435162	524361	624153	416253	324165
315462	436152	526341	624351	416352	325461
316254	523164	534261	625143	426153	325164
316452	524163	536241	625341	426351	413265
413265	526143	546231	634152	436152	415263
415263	534162	624351	634251	436251	415362
415362	536142	625341	635142	516243	423165
416253	546132	634251	635241	516342	425361
416352	623154	635241	645132	526341	425163
513264	624153	645231	645231	526143	435261
514263	625143			536142	435162
514362	634152			536241	513264
516243	635142			546231	514263
516342	645132			546132	514362
613254					523164
614253					524163
614352					524361
615243					534162
615342					534261

**Примеры перечислительной классификации сигналов в системах мониторинга качества поверхностей.** Для решения задачи классификации сигналов в системах мониторинга качества поверхностей предлагается осуществлять пространственные преобразования сигналов и изображений, связанные с переходами от одномерного сигнала к набору его двумерных представлений и суммированием последних в единый образ. Данные преобразования выполняются по алгоритмам, описанным в работе [2]. В качестве классификаторов для полученных образов предлагается использовать полиномы Морса.

Составим перечислительную классификацию нанотопографии, полученной при сканировании поверхности твердого тела из золота (рис. 3, а—рис. 6, а) на установке „Nanoeducator“.

Произведем кумулятивное суммирование по строкам и столбцам матрицы данных измерений. При суммировании по столбцам дальнейшая работа осуществляется с последней строкой полученной кумулятивной матрицы, а при суммировании по строкам анализируется ее последний столбец, так как эти строка и столбец содержат все строки и столбцы исходной матрицы.

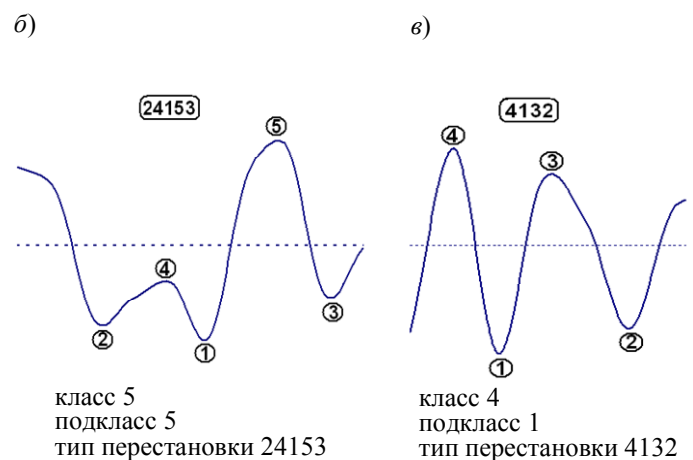
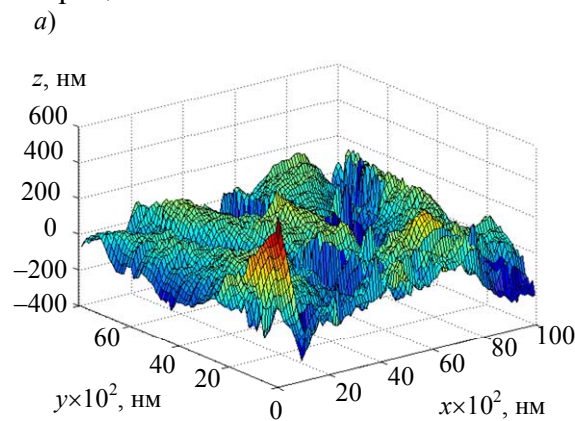


Рис. 3

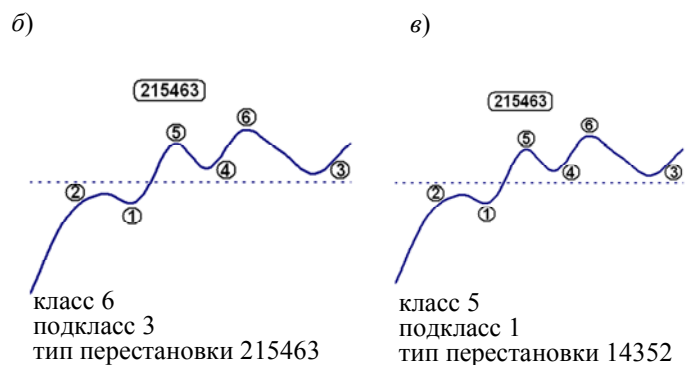
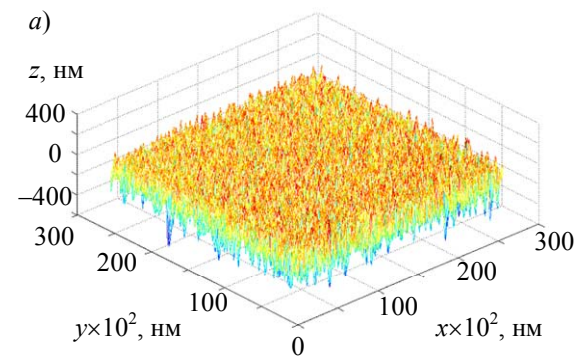


Рис. 4

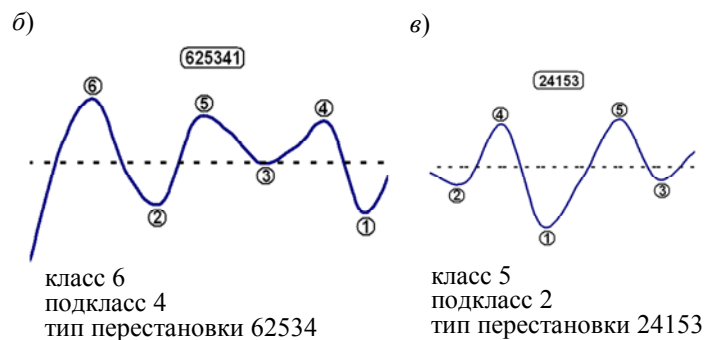
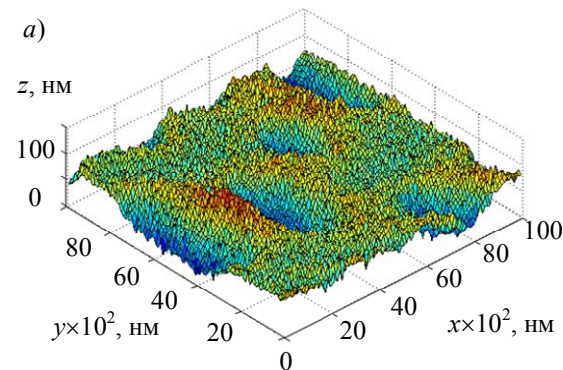
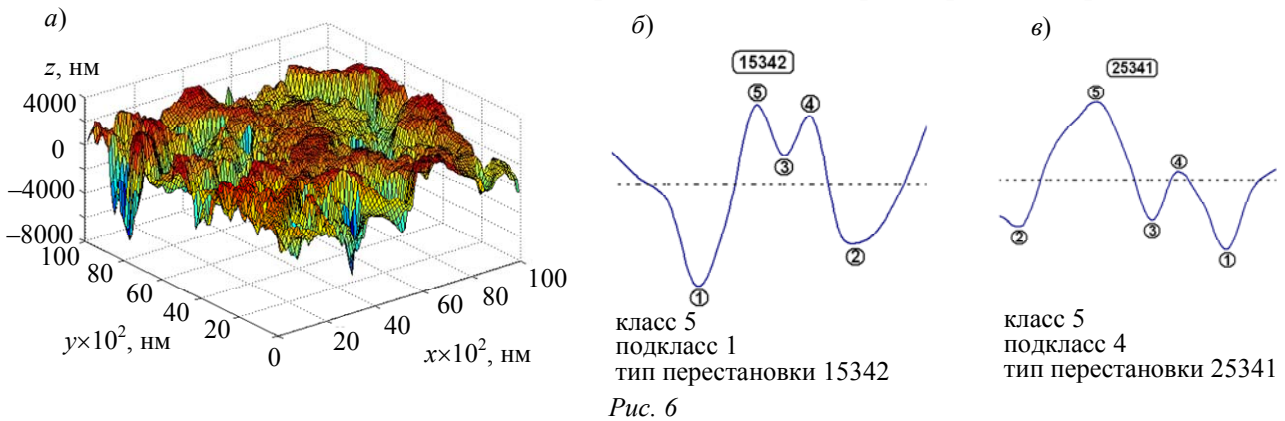


Рис. 5

На рис. 3, б—рис. 6, б представлена аппроксимированная кумулятивная сумма элементов в столбцах матрицы исходных данных. Экстремумы полученной функции пронумерованы в порядке возрастания критических значений, определен тип перестановки. Такая же операция осуществлена в отношении кумулятивной суммы по строкам исходной матрицы (рис. 3, в—рис. 6, в).



Аналогичным образом классифицируются другие имеющиеся нанотопографии, полученные при сканировании поверхностей твердых тел из различных материалов с использованием СЗМ.

**Заключение.** В работе предложен метод перечислительной классификации информации, получаемой при сканировании поверхностей твердых тел с использованием средств сканирующей зондовой микроскопии. Исследованы перечислительные особенности полиномов Морса, на которых базируется предлагаемый метод. Приведены примеры классификации данных СЗМ с использованием разработанного метода. На основе перечислительного метода могут быть написаны подпрограммы к существующим программам обработки данных СЗМ, допускающим использование пользовательских модулей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко П. П. Перечислительные методы и цифровые технологии классификации сигналов в системах мониторинга качества поверхностей. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2011.
2. Коваленко П. П., Мусалимов В. М. Прямая и обратная задачи паттернизации сигналов и изображений // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. № 1. С. 38—45.
3. Мусалимов В. М., Хамидуллина Л. Т., Коваленко П. П. Прикладные задачи перечислительной комбинаторики: Учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. 69 с.
4. Гульден Я., Джексон Д. Перечислительная комбинаторика / Пер. с англ.; под ред. В. Е. Тараканова. М.: Наука, 1990. 504 с.
5. Ландо С. К. Лекции о производящих функциях. М.: МЦМНО, 2004. 144 с.

#### Сведения об авторах

- Виктор Михайлович Мусалимов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: musvm@yandex.ru
- Павел Павлович Коваленко** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: kovalenko\_p.p@mail.ru
- Светлана Юрьевна Перепелкина** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; старший преподаватель; E-mail: sker@pochtamtu.ru

Рекомендована кафедрой  
мехатроники

Поступила в редакцию  
29.02.12 г.