

УДК 51-74:677.03

МНОГОМЕРНАЯ КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОЦЕНКА НАЛИЧИЯ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА НА ПОЛИЭФИРНЫХ ВОЛОКНАХ ПО ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ РАМАНОВСКИМ СПЕКТРАМ

Емельянов В.М., Добровольская Т.А., Емельянов В.В., Бутов К.В.

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Курск, e-mail: dobtatiana74@mail.ru

Приведены результаты многомерной оценки наличия наночастиц серебра на полиэфирных волокнах с использованием векторно-матричного моделирования. В результате проведенного моделирования получена методика генерации большого диапазона значений с сохранением законов распределения и корреляционных многомерных зависимостей между данными. Достоверность идентификации наночастиц оценивалась по совместной вероятности нормальных распределений интенсивностей рамановских спектрограмм наночастиц серебра на волокнах полиэфира в зависимости от продольной и поперечной поляризации лазерного излучения по всему диапазону изменений волновых чисел. В результате были получены значения достоверности идентификации наночастиц коллоидного серебра на волокнах полиэфира по многомерным корреляционным составляющим рамановских спектров при контроле по поляризационным характеристикам. Предлагаемый в работе метод позволяет осуществить генерацию достаточно большого диапазона значений с сохранением законов распределений, математических ожиданий, средних квадратических отклонений и корреляционных многомерных зависимостей между данными.

Ключевые слова: полиэфирное волокно, наночастицы серебра, рамановские спектры, математическое моделирование, поляризационные характеристики рамановской спектроскопии, достоверность контроля, вероятность пересечения разбросов нормальных распределений, многомерные корреляционные составляющие рамановских спектров

MULTIDIMENSIONAL CORRELATION ASSESSMENT OF EXISTENCE OF NANOPARTICLES OF SILVER ON POLYESTER FIBRES ON POLARIZING RAMAN RANGES

Emelyanov V.M., Dobrovolskaya T.A., Emelyanov V.V., Butov K.V.

Southwest State University, Kursk, e-mail: dobtatiana74@mail.ru

Results of a multidimensional assessment of existence of nanoparticles of silver are given in polyester fibers with use of vector-matrix modeling. As a result of the carried-out modeling the received technique of generation of big range of values with saving of laws of distribution and correlation multidimensional dependences between data. Reliability of identification of nanoparticles was estimated on joint probability of normal distributions of intensiveness of the Raman spectrograms of nanoparticles of silver on polyair fibers depending on longitudinal and cross polarization of laser radiation on all range of changes of wave numbers. Values of reliability of identification of nanoparticles of colloidal silver on polyair fibers on multidimensional correlation components of the Raman ranges at control according to polarizing characteristics were as a result received. The method offered in work allows to carry out generation of rather big range of values with saving of laws of distributions, population means, average quadratic deviations and correlation multidimensional dependences between data.

Keywords: polyester fiber, silver nanoparticles, the Raman ranges, mathematical modeling, polarizing characteristics of the Raman spectroscopy, reliability of control, probability of crossing of dispersions of normal distributions, multidimensional correlation components of the Raman ranges

Многомерные корреляционные данные с учетом поляризационных характеристик комбинационного рассеивания света (КРС) или рамановской спектроскопии позволяют значительно увеличить достоверность идентификации при контроле наночастиц, находящихся на волокнах текстильных материалов. Проведенные работы [1–8] позволяют оценить наличие наночастиц на поверхности таких материалов, но определять режимы нанесения наночастиц серебра на материалы и особенно изменения их количества при эксплуатации затруднено из-за малого количества таких наночастиц.

Предлагаемые исследования позволяют с высокой достоверностью различить

текстильные волокна, покрытые наночастицами серебра или не покрытые наночастицами серебра, по поляризационным характеристикам рамановских спектров с использованием многомерных методов оценки достоверности и векторно-матричной корреляции. **Цель работы.** Проведение динамического статистического моделирования случайного процесса изменения экспериментальных параметров наночастиц серебра по времени эксплуатации совместно с автокорреляционными функциями и взаимозависимыми параметрами по заданной корреляционной матрице и многомерной автокорреляцией. Сложность такого моделирования заключается именно

в необходимости получения случайных значений при различных комбинациях параметров корреляционных матриц.

Материалы и методы исследования

При проведении эксперимента выбраны полиэфирные (ПЭ) волокна, на которые были нанесены наночастицы серебра из коллоидного раствора наночастиц серебра AgБион (ТУ 2499-003-44471019-2006, концерн «Наноиндустрия»). Измерения были проведены в лаборатории нанотехнологий ЮЗГУ на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) при различной поляризации луча, в результате чего были получены цифровые и графические показатели рамановских спектров.

Математическая обработка осуществлялась с применением математической программы Matchad. При этом были выявлены параметры распределений и получены корреляционные матрицы с учетом поляризации излучения по X и по Y, которые выборочно представлены на рис. 1.

Предлагаемый в работе метод многомерной корреляционной оценки наличия наночастиц серебра на полиэфирных волокнах с использованием векторно-матричного моделирования состоит из нескольких этапов. Вначале формируется общая корреляционная матрица для полной генерации данных на основе исходных матриц, полученных на предыдущем этапе:

$$RX1_1 := \text{augment}(rXAg9_0_8, rXYAg9_0_8, rY0_8XAg9_0_8, rY1); \quad (1)$$

$$RX1_2 := \text{augment}(rXYAg9_0_8^T, rYAg9_0_8, rX1, rX0_8YAg9_0_8); \quad (2)$$

$$RX1_3 := \text{augment}(rY0_8XAg9_0_8^T, rX1^T, rX0_8, rXY1); \quad (3)$$

$$RX1_4 := \text{augment}(rY1^T, rX0_8YAg9_0_8^T, rXY1^T, rY0_8); \quad (4)$$

$$RX1_4 := \text{stack}(RX1_1, RX1_2, RX1_3, RX1_4). \quad (5)$$

$$rX0_8 := \begin{pmatrix} 1 & 0.886022 & 0.968864 & 0.97509 & 0.960482 & 0.963001 & 0.98478 & 0.782321 & 0.91965 \\ 0.886022 & 1 & 0.782066 & 0.771716 & 0.739736 & 0.824868 & 0.79248 & 0.431931 & 0.64673 \\ 0.968864 & 0.782066 & 1 & 0.995048 & 0.945092 & 0.991438 & 0.98241 & 0.879222 & 0.969771 \\ 0.97509 & 0.771716 & 0.995048 & 1 & 0.972429 & 0.976566 & 0.994032 & 0.884185 & 0.981372 \\ 0.960482 & 0.739736 & 0.945092 & 0.972429 & 1 & 0.905128 & 0.986626 & 0.857221 & 0.960756 \\ 0.963001 & 0.824868 & 0.991438 & 0.976566 & 0.905128 & 1 & 0.958258 & 0.823284 & 0.937203 \\ 0.98478 & 0.79248 & 0.98241 & 0.994032 & 0.986626 & 0.958258 & 1 & 0.871867 & 0.965984 \\ 0.782321 & 0.431931 & 0.879222 & 0.884185 & 0.857221 & 0.823284 & 0.871867 & 1 & 0.915695 \\ 0.91965 & 0.64673 & 0.969771 & 0.981372 & 0.960756 & 0.937203 & 0.965984 & 0.915695 & 1 \end{pmatrix} \quad a$$

$$rXAg9_0_8 := \begin{pmatrix} 1 & 0.861832 & 0.92908 & 0.985726 & 0.66513 & 0.993208 & 0.606403 & 0.340509 & 0.742034 \\ 0.861832 & 1 & 0.963644 & 0.912255 & 0.879922 & 0.870785 & 0.857365 & 0.659794 & 0.952317 \\ 0.92908 & 0.963644 & 1 & 0.969992 & 0.844649 & 0.932289 & 0.799518 & 0.645174 & 0.902515 \\ 0.985726 & 0.912255 & 0.969992 & 1 & 0.777514 & 0.992018 & 0.724763 & 0.44264 & 0.834806 \\ 0.66513 & 0.879922 & 0.844649 & 0.777514 & 1 & 0.723544 & 0.995453 & 0.640695 & 0.981014 \\ 0.993208 & 0.870785 & 0.932289 & 0.992018 & 0.723544 & 1 & 0.669356 & 0.327108 & 0.783181 \\ 0.606403 & 0.857365 & 0.799518 & 0.724763 & 0.995453 & 0.669356 & 1 & 0.630062 & 0.973512 \\ 0.340509 & 0.659794 & 0.645174 & 0.44264 & 0.640695 & 0.327108 & 0.630062 & 1 & 0.669043 \\ 0.742034 & 0.952317 & 0.902515 & 0.834806 & 0.981014 & 0.783181 & 0.973512 & 0.669043 & 1 \end{pmatrix} \quad б$$

Рис. 1. Корреляционные матрицы рамановских поляризационных спектрограмм полиэфирных волокон после сушки в естественных условиях:

а – поляризация лазера поперек волокон с наночастицами серебра;
б – поляризация лазера поперек волокон без наночастиц серебра

Тогда тестовая общая размером 38×38 корреляционная матрица примет вид

	0	1	2	3	4	5
0	1	0.861832	0.92908	0.985726	0.66513	0.993208
1	0.861832	1	0.963644	0.912255	0.879922	0.870785
2	0.92908	0.963644	1	0.969992	0.844649	0.932289
3	0.985726	0.912255	0.969992	1	0.777514	0.992018
4	0.66513	0.879922	0.844649	0.777514	1	0.723544
5	0.993208	0.870785	0.932289	0.992018	0.723544	1
6	0.606403	0.857365	0.799518	0.724763	0.995453	0.669356

(6)

Генерация случайных значений проводится по нормальному закону и матрице RXY1, для чего используется встроенная функция MathCad Edition 11:

$$\text{GEN1}^{<k>} := \text{norm}(n, M, \lambda X_k^{0.5}), \quad (7)$$

где λX_k – вектор собственных чисел корреляционной матрицы; n – количество случайных данных в одном векторе; M – математическое ожидание.

При этом вектор собственных чисел общей корреляционной матрицы определяется по выражению

$$\lambda X := \text{eigenvals}(RXY1). \quad (8)$$

Так как сгенерированные по (7) случайные значения обладают некоторой корреляцией, негативно сказывающейся на точности моделирования, то необходимо привести их к некоррелированному виду, для чего используется специальная программа, разработанная в рамках данного научного исследования в среде MathCad Enterprise Edition:

$$\begin{aligned} i &:= 0 \dots 35; & j &:= 0 \dots 35; \\ \text{RGEN1}_{ij} &:= \text{corr}(\text{GEN1}^{<i>}, \text{GEN1}^{<j>}); \\ \text{UR} &:= \text{eigenvecs}(\text{RGEN1}) & \lambda 1 &:= \text{eigenvals}(\text{RGEN1}); \\ \text{GEN2} &:= \text{GEN1} & \text{NZ2} &:= \text{GEN2} \cdot \text{UR}^T; \\ \text{RNZ2}_{ij} &:= \text{cvar}(\text{NZ2}^{<i>}, \text{NZ2}^{<j>}) & \text{FUND} &:= \text{eigenvecs}(\text{RNZ2}); \\ \text{NEZ} &:= \text{NZ2} \cdot \text{FUND} & \text{RNEZ2}_{ij} &:= \text{corr}(\text{NEZ}^{<i>}, \text{NEZ}^{<j>}). \end{aligned} \quad (9)$$

Полученные таким преобразованием (9) значения данных моделирования обладают корреляцией, стремящейся к нулю (10).

	0	1	2
0	1	0.00000000144852	0.00000000087908
1	0.00000000144852	1	0.00000000090941
2	0.00000000087908	0.00000000090941	1
3	0.00000000037884	-0.00000000140245	-0.0000000018545
4	0.00000000063759	-0.00000000038014	0.00000000093131
5	0.00000000058189	0.0000000000676	0.00000000025208
6	-0.00000000071127	0.00000000104604	-0.0000000002003

Из (10) видно, что полученные статистическим моделированием некоррелированные случайные данные обладают точностью до 10^{-10} , что значительно превосходит заданную точность исходной общей корреляционной матрицы 10^{-6} (6).

На следующем этапе проводится коррекция полученных некоррелированных данных моделирования по среднему квадратическому отклонению и собственным числам:

$$\begin{aligned} \sigma \text{NEZ}_i &:= \text{stdev}(\text{NEZ}^{<i>}) & \text{NEZ}^{<k>} &:= \text{NEN}^{<k>} \cdot \lambda X_k^{0.5} / \sigma \text{NEZ}_k; \\ \sigma \text{NEZ}_i &:= \text{stdev}(\text{NEZ}^{<i>}) & \text{NEZ}^{<k>} &:= \text{NEN}^{<k>} \cdot \lambda X_k^{0.5} / \sigma \text{NEZ}_k; \\ \sigma \text{NEZ}_i &:= \text{stdev}(\text{NEZ}^{<i>}). \end{aligned} \quad (11)$$

Далее преобразуем некоррелированные значения по (12) через фундаментальную матрицу UR корреляционной матрицы RXY1 в коррелированные:

$$\begin{aligned} \text{UR} &:= \text{eigenvecs}(RXY1) & \text{ZAV} &:= \text{NEZ} \cdot \text{UR}^T; \\ \text{RZ}_{ij} &:= \text{corr}(\text{ZAV}^{<i>}, \text{ZAV}^{<j>}). \end{aligned} \quad (12)$$

Вычислим корреляционную матрицу для коррелированных данных RZ для оценки достоверности полученного результата

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	1	0.86183	0.92908	0.98573	0.66513	0.99321	0.6064	0.34051	0.74203
1	0.86183	1	0.96364	0.91225	0.87992	0.87078	0.85736	0.65979	0.95232
2	0.92908	0.96364	1	0.96999	0.84465	0.93229	0.79952	0.64517	0.90251
3	0.98573	0.91225	0.96999	1	0.77751	0.99202	0.72476	0.44264	0.83481
4	0.66513	0.87992	0.84465	0.77751	1	0.72354	0.99545	0.64069	0.98101
5	0.99321	0.87078	0.93229	0.99202	0.72354	1	0.66936	0.32711	0.78318
6	0.6064	0.85736	0.79952	0.72476	0.99545	0.66936	1	0.63006	0.97351
7	0.34051	0.65979	0.64517	0.44264	0.64069	0.32711	0.63006	1	0.66904
8	0.74203	0.95232	0.90251	0.83481	0.98101	0.78318	0.97351	0.66904	1

Из (13) видно, что полученные статистическим моделированием коррелированные случайные данные обладают корреляцией, равной исходной общей корреляционной матрицы (6), с точностью до 10^{-6} . Однако значения матрицы RZ из-за особенностей вычисления нормированы по 1 относительно среднего квадратического отклонения.

Приведем в соответствие значения реальных измерений по матрице RZ, по средним квадратическим отклонениям и по математическим ожиданиям:

$$Dr^{(n)} := ZAV^{(n)} \cdot \sigma \Delta X_n + MENX_n;$$

$$RDr_{n,m} := \text{corr}(Dr^{(n)}, Dr^{(m)});$$

$$Tr^{(n)} := ZAV^{(n+18)} \cdot \sigma \Delta X_n + MENX_n; \quad (14)$$

$$Dry^{(n)} := ZAV^{(n+9)} \cdot \sigma \Delta Y_n + MENY_n;$$

$$Try^{(n)} := ZAV^{(n+27)} \cdot \sigma \Delta Y_n + MENY_n. \quad (15)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Вычислим для подтверждения корреляционные матрицы RDr, RTr и среднее квадратическое отклонение между столбцами этих матриц σDr , σTr :

$$\sigma Dr_n := \text{stdev}(Dr^{(n)}).$$

$$\sigma Dr = \begin{pmatrix} 60.7217456 \\ 35.1073694 \\ 27.7427627 \\ 40.7437713 \\ 55.4477206 \\ 46.8360478 \\ 65.4230739 \\ 24.6410719 \\ 50.471054 \end{pmatrix};$$

$$RDr = \begin{pmatrix} 1 & 0.86183 & 0.92908 & 0.98573 & 0.66513 & 0.99321 & 0.6064 & 0.34051 & 0.74203 \\ 0.86183 & 1 & 0.96364 & 0.91225 & 0.87992 & 0.87078 & 0.85736 & 0.65979 & 0.95232 \\ 0.92908 & 0.96364 & 1 & 0.96999 & 0.84465 & 0.93229 & 0.79952 & 0.64517 & 0.90251 \\ 0.98573 & 0.91225 & 0.96999 & 1 & 0.77751 & 0.99202 & 0.72476 & 0.44264 & 0.83481 \\ 0.66513 & 0.87992 & 0.84465 & 0.77751 & 1 & 0.72354 & 0.99545 & 0.64069 & 0.98101 \\ 0.99321 & 0.87078 & 0.93229 & 0.99202 & 0.72354 & 1 & 0.66936 & 0.32711 & 0.78318 \\ 0.6064 & 0.85736 & 0.79952 & 0.72476 & 0.99545 & 0.66936 & 1 & 0.63006 & 0.97351 \\ 0.34051 & 0.65979 & 0.64517 & 0.44264 & 0.64069 & 0.32711 & 0.63006 & 1 & 0.66904 \\ 0.74203 & 0.95232 & 0.90251 & 0.83481 & 0.98101 & 0.78318 & 0.97351 & 0.66904 & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$RTr_{n,m} := \text{corr}(Tr^{(n)}, Tr^{(m)}); \quad \sigma Tr_n := \text{stdev}(Tr^{(n)}).$$

$$\sigma Tr = \begin{pmatrix} 84.486564 \\ 50.5268102 \\ 47.1744573 \\ 73.6925904 \\ 77.8908433 \\ 89.6236848 \\ 87.3427452 \\ 19.6790823 \\ 31.7116175 \end{pmatrix};$$

$$RDr = \begin{pmatrix} 1 & 0.88\ 602 & 0.96\ 886 & 0.97\ 509 & 0.96\ 048 & 0.963 & 0.98\ 478 & 0.78232 & 0.91965 \\ 0.88\ 602 & 1 & 0.78\ 207 & 0.77\ 172 & 0.77\ 172 & 0.73\ 974 & 0.82\ 487 & 0.79248 & 0.43193 \\ 0.96\ 886 & 0.78\ 207 & 1 & 0.99\ 505 & 0.94\ 509 & 0.99\ 144 & 0.98\ 241 & 0.87922 & 0.96977 \\ 0.97\ 509 & 0.77\ 172 & 0.99\ 505 & 1 & 0.97\ 243 & 0.97657 & 0.99403 & 0.88418 & 0.98137 \\ 0.96\ 048 & 0.73\ 974 & 0.94\ 509 & 0.97\ 243 & 1 & 0.90\ 513 & 0.98\ 663 & 0.85722 & 0.96076 \\ 0.963 & 0.82\ 487 & 0.99\ 144 & 0.97\ 657 & 0.90\ 513 & 1 & 0.95\ 826 & 0.82328 & 0.9372 \\ 0.98478 & 0.79248 & 0.98241 & 0.99403 & 0.98663 & 0.95826 & 1 & 0.87187 & 0.96\ 598 \\ 0.78232 & 0.43193 & 0.87922 & 0.88418 & 0.85722 & 0.82328 & 0.87187 & 1 & 0.91\ 569 \\ 0.91965 & 0.64673 & 0.96977 & 0.98137 & 0.96076 & 0.9372 & 0.96\ 598 & 0.91\ 569 & 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

Из (16) и (17) видно, что корреляция смоделированных случайных значений соответствует корреляции исходных данных (рис. 1 а, б). Среднеквадратические отклонения смоделированных значений также совпадают с исходными данными.

Возможно моделирование параметров измерений для различных значений элементов спектральных составляющих многомерных поляризационных корреляционных матриц типа (16) и (17) с учетом различных значений параметров многомерных законов распределения. Однако следует учесть, что для нормальных законов распределения значений параметров спектральных составляющих получают самую высокую точность моделирования.

Для оценки достоверности была предложена методика определения взаимного перекрытия данных. На рис. 2 выборочно представлены смоделированные корреляционные зависимости.

При оценке достоверности по экспериментальным одномерным векторам получены следующие значения:

$$pX12^T = (0.98153\ 0.92831\ 0.98894\ 0.99789\ 0.99125\ 0.99689\ 0.98682\ 0.99932\ 0.99910). \quad (18)$$

Проверка по смоделированным одномерным данным показала следующую достоверность при генерации 576 значений (рис. 2, в):

$$\begin{aligned} pDr^{(5)} &= 1 - 3/576 = 0.99479; \\ pTr^{(5)} &= 1 - 2/576 = 0.99653; \\ pDr^{(0)} &= 1 - 8/576 = 0.98611; \\ pTr^{(0)} &= 1 - 8/576 = 0.98611. \end{aligned} \quad (19)$$

По рис. 2, г, с использованием смоделированных одномерных данных проверка показала следующую достоверность при генерации 576 значений:

$$\begin{aligned} pDr^{(5)} &= 1 - 3/576 = 0.99479; \\ pTr^{(5)} &= 1 - 3/576 = 0.99479; \\ pDr^{(1)} &= 1 - 47/576 = 0.91840; \\ pTr^{(1)} &= 1 - 48/576 = 0.91667. \end{aligned} \quad (20)$$

При рассмотрении двумерной зависимости с корреляцией по рис. 2, в оценить достоверность для первого пика при учете шестого не представилась возможность из-за малого количества сгенерированных значений – необходимо сгенерировать не 576, а 20000 значений.

При генерации 576 значений (рис. 2, г) проверка по смоделированным двумерным данным показала следующую достоверность:

$$\begin{aligned} pTr^{(5)} Tr^{(1)} &= 1 - 2/576 = 0.99653; \\ pDr^{(5)} Dr^{(1)} &= 1 - 2/576 = 0.99653. \end{aligned} \quad (21)$$

Проверка по смоделированным двумерным данным показала следующую достоверность при генерации 20000 значений (рис. 2, д):

$$\begin{aligned} pTr^{(5)} Tr^{(0)} &= 1 - 2/20000 = 0.9999; \\ pDr^{(5)} Dr^{(0)} &= 1 - 2/20000 = 0.9999. \end{aligned} \quad (22)$$

Здесь видно, что предложенный метод дает существенный выигрыш в оценке достоверности определения режимов нанесения наночастиц серебра на волокна.

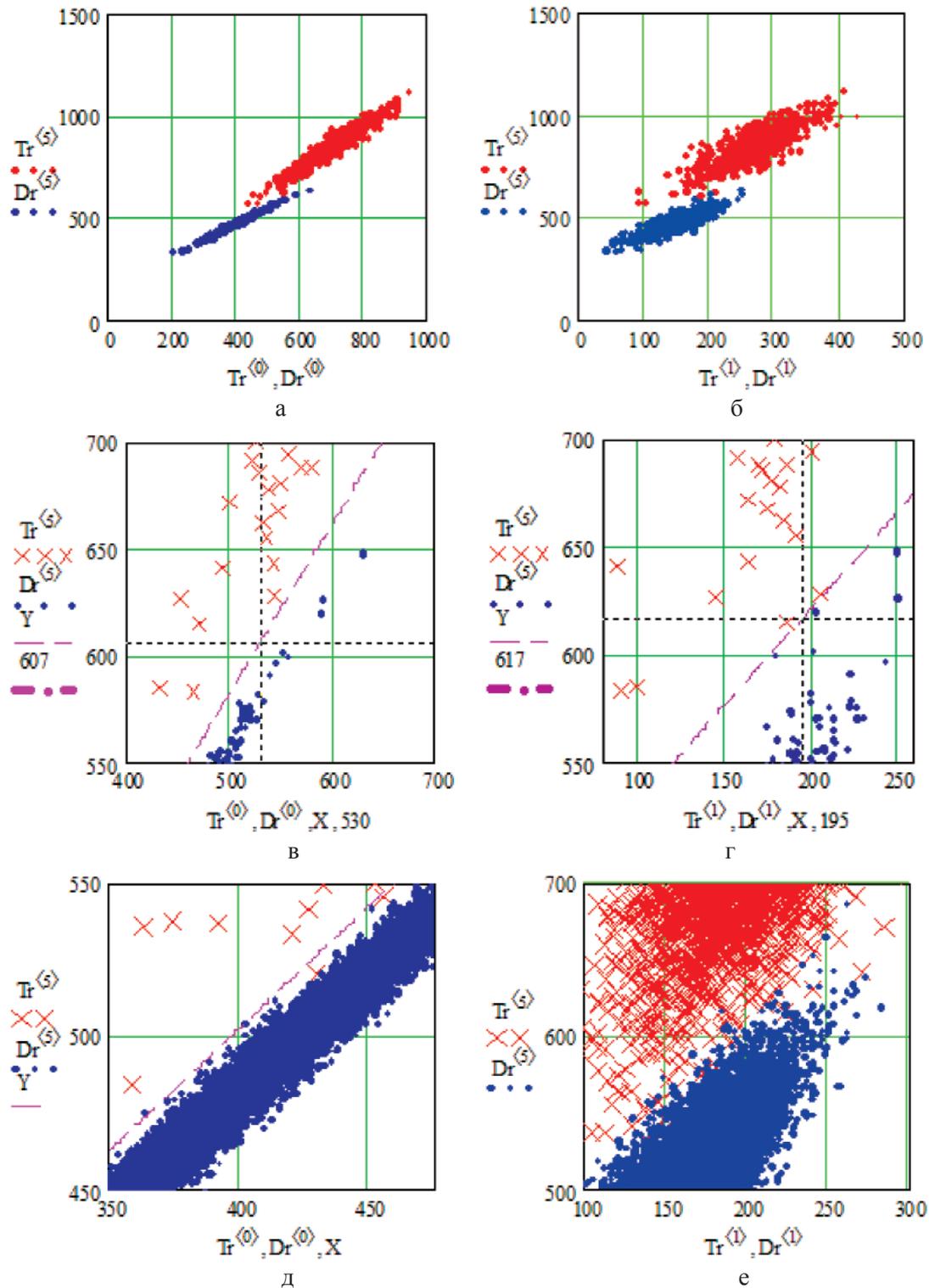


Рис. 2. Двумерные смоделированные корреляционные зависимости рамановских поляризационных спектрограмм наночастиц серебра на полиэфирных волокнах с поляризацией поперек волокон:
 а, б – общий вид при генерации $n = 576$ данных;
 в, г – фрагмент для определения взаимного перекрытия данных для определения достоверности $p5_1 = 0.9965$ при пересечении 2 данных с генерацией $n = 576$;
 д, е – фрагмент для определения взаимного перекрытия данных для определения достоверности $p5_0 = 0.9990$ при пересечении 2 данных с генерацией $n = 20000$

Выводы

Таким образом, на основании проведенных исследований был предложен метод многомерной оценки наличия наночастиц серебра на волокнах с использованием векторно-матричного моделирования при генерации достаточно большого диапазона значений с сохранением законов распределений и корреляционных многомерных зависимостей между данными; проведена оценка достоверности при определении количества пересечений многомерных распределений рамановских спектров волокна, установлено, что одномерная оценка достоверности дает диапазон 0,92831–0,99932, а многомерная – до 0,9999.

Список литературы

1. Емельянов В.М., Добровольская Т.А., Емельянов В.В., Орлов Е.Ю. Достоверность контроля наночастиц серебра на полиэфирных волокнах по составляющим рамановских спектрограмм с учетом информационной неопределенности // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 10. – С. 3310–3315.
2. Емельянов В.М., Добровольская Т.А., Данилова С.А., Емельянов В.В. Математическое моделирование рамановских спектрограмм при осуществлении контроля наночастиц серебра на полиэфирных волокнах // *Естественные и технические науки*. – 2013. – № 6. – С. 415–417.
3. Емельянов В.М., Добровольская Т.А., Емельянов В.В., Орлов Е.Ю. Математическое моделирование составляющих рамановских спектрограмм при контроле процесса нанесения наночастиц золота 10 нм Au // *Нанотехника*. – 2013. – № 2. – С. 81–87.
4. Емельянов В.М., Добровольская Т.А., Емельянов В.В., Орлов Е.Ю., Бутов К.В. Применение методов рамановской спектроскопии для выявления наночастиц золота на полиэфирных волокнах // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Физика и химия*. – 2013. – № 2. – С. 37–43.

5. Emelyanov V.M., Dobrovolskaya T.A., Avilova I.A., Danilova S.A., Emelyanov V.V., Butov K.V., Orlov E.J., Eskov A.S., Eskova N.Y. Evaluation of silver and gold nanoparticles on polyester fibers by fluorescent polarization Raman spectra // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. – 2014 – Vol. 6. – № 3. – P. 03068-1 – 03068-5.

References

1. Emeljanov V.M., Dobrovolskaja T.A., Emeljanov V.V., Orlov E.Ju. Dostovernost kontrolja nanochastic serebra na polijefirnyh voloknah po sostavljajushhim ramanovskih spektrogramm s uchetom informacionnoj neopredelennosti // *Fundamentalnye issledovanija*. 2013. no. 10. pp. 3310–3315.
2. Emeljanov V.M., Dobrovolskaja T.A., Danilova S.A., Emeljanov V.V. Matematicheskoe modelirovanie ramanovskih spektrogramm pri osushhestvlenii kontrolja nanochastic serebra na polijefirnyh voloknah // *Estestvennye i tehnicheckie nauki*. 2013. no. 6. pp. 415–417.
3. Emeljanov V.M., Dobrovolskaja T.A., Emeljanov V.V., Orlov E.Ju. Matematicheskoe modelirovanie sostavljajushhih ramanovskih spektrogramm pri kontrole processa nanesenija nanochastic zolota 10 nm Au // *Nanotehnika*. 2013. no. 2. pp. 81–87.
4. Emeljanov V.M., Dobrovolskaja T.A., Emeljanov V.V., Orlov E.Ju., Butov K.V. Primenenie metodov ramanovskoj spektroskopii dlja vyjavlenija nanochastic zolota na polijefirnyh voloknah // *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija Fizika i himija*. 2013. no. 2. pp. 37–43.
5. Emelyanov V.M., Dobrovolskaya T.A., Avilova I.A., Danilova S.A., Emelyanov V.V., Butov K.V., Orlov E.J., Eskov A.S., Eskova N.Y. Evaluation of silver and gold nanoparticles on polyester fibers by fluorescent polarization Raman spectra // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2014 Vol. 6. no. 3. pp. 03068-1 03068-5.

Рецензенты:

Сотников В.В., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Электроснабжение», Юго-Западный государственный университет, г. Курск;
Кузьменко А.П., д.ф.-м.н., профессор, директор регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск.