

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСПЕШНОСТИ ПУСКОВ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

Рассмотрена задача статистической классификации ракет-носителей по успешности их пусков. В пространстве основных технических характеристик ракет-носителей построено решающее правило, которое позволяет прогнозировать успешность пусков ракеты-носителя по ее основным техническим характеристикам. Проверка решающего правила на экзаменационных пусках ракет-носителей показала его удовлетворительное качество.

Розглянуто задачу статистичної класифікації ракет-носіїв по успішності їхніх пусків. У просторі основних технічних характеристик ракет-носіїв побудовано вирішальне правило, що дозволяє прогнозувати успішність пусків ракети-носія за її основними технічними характеристиками. Перевірка вирішального правила на екзаменаційних пусках ракет-носіїв показала його задовільну якість.

The problem of a statistical classification of launch vehicles is examined considering their successful launches. The governing rule for prediction of successful launches of launch vehicles from their main technical characteristics is built in space of its technical characteristics. Verification of the governing rule during examined launches of launch vehicles demonstrated its satisfactory quality.

Одной из актуальных задач в практике запусков ракет-носителей (РН) является предварительное оценивание надежности пусков. Как правило, для каждой РН приводится оценка надежности пуска, в процессе получения которой применяются методы теории надежности [1], а РН рассматривается как сложная система взаимосвязанных подсистем, функционирующая в заданных условиях внешней среды. Применение методов теории надежности требует полного описания структуры системы и априорной информации о надежности составляющих ее подсистем. Получение такой информации, зачастую, является такой же сложной задачей, как и исходная задача.

Альтернативой такому подходу могут служить методы статистической классификации и распознавания образов, в которых выводы о надежности предстоящих пусков могут формулироваться на основе так называемых "обучающих выборок" наблюдений, сформированных по результатам предыдущих пусков. В этих выборках каждая РН представлена набором своих основных технических характеристик (стартовая масса, стартовая тяга, удельный импульс у земли первой ступени, удельный импульс в пустоте верхней ступени и др.), а также показателем успешности пусков данной РН – отношением числа безаварийных пусков к общему числу ее пусков. Априорное формирование так называемых "групп" или "классов" ракет-носителей проводится в зависимости от поставленной цели классификации. Если требуется ответить на вопрос: "Ожидаемая успешность данного пуска меньше выбранного порогового значения (например, 0,98) или больше?", то формируется два класса РН. В первый (условно говоря, "аварийный" класс) входят РН, у которых успешность пусков меньше выбранного порогового значения, а во второй (условно говоря, "безаварийный" класс) – те РН, у которых успешность пусков больше или равна этому пороговому значению.

Сформированные обучающие выборки используются для разбиения исходного пространства признаков на основе того или иного метода на две непересекающиеся области так, чтобы РН первого класса, по возможности, попали в одну область пространства, а РН второго класса – в другую. Если такое разбиение удастся провести с относительно малым числом ошибочных классификаций, то на его основе можно построить так называемое "решаю-

щее правило", которое можно использовать для классификации новых объектов, не вошедших в обучающие выборки наблюдений. Если новая РН, представленная в пространстве своих технических характеристик, попадает в область первого класса, то она классифицируется как принадлежащая первому (аварийному) классу, а если в область второго класса – как принадлежащая второму (безаварийному) классу.

Исходные данные. Информация о ракетах-носителях мирового парка получена из базы данных, которая разработана и пополняется из открытых источников в отделе системного анализа и проблем управления Института технической механики НАН Украины и НКА Украины. В исходной выборке данных содержится информация о пусках $n = 92$ модификаций ракет-носителей.

Множество входных переменных (признаков) $X_0 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$ образовано такими основными техническими характеристиками РН:

x_1 – стартовая масса ракеты-носителя (т);

x_2 – широта местности расположения космодрома (град.);

x_3 – стартовая тяга – тяга у земли двигателя первой ступени (кгс);

x_4 – удельный импульс у земли первой ступени (с);

x_5 – удельный импульс в пустоте верхней ступени (с).

Успешность пусков каждой РН (y) рассчитывалась по формуле

$$y = N_1 / N_0, \quad (1)$$

где N_1 – количество успешных пусков; N_0 – количество пусков.

На предварительном этапе решения задачи исходные данные были объединены и цензурированы. Во-первых, по ряду модификаций РН было проведено очень мало (менее четырех) пусков, и, по возможности, "родственные" модификации таких РН были объединены в подгруппы, а если этого не удавалось сделать, то они не использовались. Во-вторых, из рассмотрения были исключены объекты как с малыми, так и с очень большими стартовыми массами, а также объекты с очень большими стартовыми тягами (тягами у Земли первой ступени). В результате такого объединения и цензурирования данных, расчета успешности пусков в соответствии с (1), а также выбора порогового значения успешности пусков $y_{\text{пор}} = 0,98$, получены два класса: первый класс (см. табл. 1) – РН с показателями успешности пусков $y_i < y_{\text{пор}}$, и второй класс (см. табл. 2) – РН с $y_i \geq y_{\text{пор}}$. Эти классы объектов использовались для решения задачи статистической классификации РН по успешности пусков на основе нелинейного дискриминантного анализа и разработанного в [2, 3] критерия качества нелинейных дискриминантных функций.

Решение задачи статистической классификации. Поставленная задача классификации имеет две особенности. Первая из них – неопределенность по количеству и составу признаков, которые необходимо включить в решающее правило. Имеется лишь множество исходных признаков X_0 , а каким образом признаки должны участвовать в решающем правиле и все ли они должны в него включаться – это априорно неизвестно. Вторая особенность – различие ковариационных матриц первого и второго классов, что следует из сравнения оценок ковариационных матриц двух классов объектов.

Таблица 1 – Исходные данные к задаче и результаты классификации объектов первого класса (ракет-носителей с успешностью пусков менее 0,98)

Ном. носителя	Носитель	Масса РН, т (X ₁)	Ширина космодрома, град. (X ₂)	Стартовая тяга (тяга 1-й ст. у Земли), кгс (X ₃)	Удельный импульс у Земли 1-й ст., с (X ₄)	Удельный импульс в пустоте верхней ст., с (X ₅)	Количество пусков (N ₀)	Количество успешных пусков (N ₁)	Успешность пусков (N ₁ / N ₀)	Классификационное число	Результат классификации
1	Агiae-42P	339	5,23	67800	248,50	444,20	15	14	0,93	-220,22	1
2	Агiae-44L	470	5,23	67800	248,50	444,20	38	37	0,97	-170,59	1
3	Агiae-44LP	420	5,23	67800	248,50	444,20	28	27	0,96	-191,07	1
4	Athea-2	120,15	34,62	141345	280,00	295,70	3	2	0,67	-15,09	1
5	Atlas-1	163,9	28,45	26900	220,40	444,40	12	9	0,75	-156,03	1
6	Atlas-E (63 FD)	121	34,62	26700	214,00	235,40	23	21	0,91	-7,26	1
7	CZ-2E, CZ-2F	462	28,20	296140	259,00	298,00	13	12	0,92	-40,16	1
8	CZ-3	204	28,20	278800	259,00	425,00	14	13	0,93	-198,72	1
9	CZ-3B	425	28,20	296140	259,00	442,00	6	5	0,83	-166,42	1
10	H-2	260	30,40	84300	404,50	452,00	7	6	0,86	-213,36	1
11	H-2A/2024	347	30,40	100000	400,00	447,00	4	3	0,75	-172,64	1
12	M-5	137,5	31,25	343636	250,90	298,00	5	4	0,80	+2,53	2
13	PSLV	294	13,78	358700	240,00	308,00	9	8	0,89	-8,73	1
14	Tita-401A	868,64	28,45	438182	274,50	444,00	11	10	0,91	-1749,40	1
15	Tita-401B	939,3	28,45	438182	274,50	444,00	6	5	0,83	-2891,51	1
16	Tita-(402A-405A)	910,00	28,45	438182	274,50	311,00	22	20	0,91	-4465,77	1
17	Космос-3М	109	63,25	148560	248,00	303,00	433	416	0,96	-4,49	1
18	Молния	305	63,25	74500	248,00	340,00	321	288	0,90	-38,42	1
19	Рокот/Бриз К, КМ	107	63,25	188000	285,00	318,00	8	7	0,88	-37,50	1
20	Циклон-3	189	45,98	298800	267,80	344,40	121	116	0,96	-44,36	1

Таблица 2 – Исходные данные к задаче и результаты классификации объектов второго класса (РН с успешностью пусков более или равной 0,98)

Ном. носителя	Носитель	Масса РН, т (X ₁)	Широта космодрома, град. (X ₂)	Стартовая тяга (тяга 1-й ст. у Земли), кгс (X ₃)	Удельный импульс у Земли 1-й ст., с (X ₄)	Удельный импульс в пустоте верхней ст., с (X ₅)	Количество пусков (N ₀)	Количество успешн. пусков (N ₁)	Успешность пусков (N ₁ / N ₀)	Классификационное число	Результат классификации
1	Агiae-40	315	5,23	67800	248,50	444,20	7	7	1,0	+11,80	2
2	Агiae-42L	400	5,23	67800	248,50	444,20	14	14	1,0	+10,78	2
3	Агiae-44P	358	5,23	67800	248,50	444,20	14	14	1,0	+12,40	2
4	Atlas-2	187,6	28,45	26900	220,40	442,40	10	10	1,0	+9,56	2
5	Atlas-2A	187,7	28,45	26900	220,40	450,50	23	23	1,0	+9,84	2
6	Atlas-2AS	233,75	28,45	26900	220,40	450,50	30	30	1,0	+11,96	2
7	Atlas-3, 5	310	28,45	382700	311,30	450,50	12	12	1,0	+7,25	2
8	CZ-2C	191	41,22	30189	259,00	296,00	18	18	1,0	+6,85	2
9	CZ-2C/SD	213	38,50	30189	259,00	288,00	9	9	1,0	+6,70	2
10	CZ-2D	231,67	41,22	30189	259,00	287,70	6	6	1,0	+6,40	2
11	CZ-3A	238,5	28,20	296100	259,00	442,00	9	9	1,0	+6,29	2
12	CZ-4A, 4B	252	38,50	294400	259,00	295,00	10	10	1,0	+7,29	2
13	Delta-2(6920, 25)	218	28,45	91100	263,20	305,00	17	17	1,0	+6,68	2
14	Delta-2(7320, 7420)	152	34,62	88400	255,60	319,40	16	16	1,0	+6,82	2
15	Delta-2(7425, 7426)	165	28,45	88400	255,60	305,00	5	5	1,0	+6,93	2
16	Delta-2(7920)	230	34,62	88400	255,60	319,40	23	23	1,0	+7,75	2
17	Delta-2(7925)	232	28,45	88400	255,60	292,60	59	58	0,98	+6,84	2
18	H-1	140	30,40	75600	253,00	320,00	9	9	1,0	+6,95	2
19	Tita-2-SLV	155	34,62	380000	269,10	316,00	13	13	1,0	+11,84	2
20	Днепр-1	210,84	45,98	419236	269,90	309,00	5	5	1,0	+23,40	2
21	Союз	310	45,98	74500	248,00	330,00	1008	1002	0,99	+9,27	2
22	Союз-2, Икар, Фрег	305	45,98	79200	269,00	338,00	14	14	1,0	+9,89	2
23	Циклон-2	176	45,98	264900	269,90	318,00	105	105	1,0	+5,51	2

Отмеченные особенности определили выбор трехшагового алгоритма решения задачи. На первом шаге применялся итерационный алгоритм [4] решения задачи линейного дискриминантного анализа, построенный по принципам метода группового учета аргументов (МГУА) [5, 6, 7, 8]. Определено первое множество наилучших шести признаков в оптимальной по сложности линейной дискриминантной функции (линейной по параметрам, т. е. по коэффициентам, но нелинейной по признакам):

$$X_1 = \{x_1^2 x_4^2; x_2 x_3^2 x_4; x_1 x_2 x_3; x_3; x_3^2; x_2 x_3\}. \quad (2)$$

На втором шаге из исходного множества пяти признаков было генерировано множество, состоящее из двадцати признаков: первые пять – сами исходные признаки, следующие пять признаков – квадраты исходных признаков, и еще десять – ковариации (произведения) всевозможных пар исходных признаков. Эти двадцать сгенерированных признаков были ранжированы по значению разработанного критерия $D_{BA}(X)$ [2, 3], и из них было выделено шесть лучших (отдельно взятых) признаков, которые образовали второе множество из шести признаков:

$$X_2 = \{x_1 x_5; x_1^2; x_4 x_5; x_1 x_4; x_1; x_1 x_3\}. \quad (3)$$

На третьем шаге из первого и второго сформированных множеств было взято по три лучших признака:

$$X_3 = \{x_1^2 x_4^2; x_2 x_3^2 x_4; x_1 x_2 x_3; x_1 x_5; x_1^2; x_4 x_5\} \quad (4)$$

и в пространстве этих шести признаков были построены нелинейные дискриминантные функции. Попытки улучшить полученное качество классификации за счет добавления в дискриминантные функции других признаков из множеств X_1 в (2) и X_2 в (3) оказались безуспешными.

При построении нелинейных дискриминантных функций шесть признаков, образующих множество X_3 , предварительно нормировались:

$$x_{j,норм} = (x_j - a_j) / b_j, \quad j = 1, 2, \dots, 6, \quad (5)$$

где a_j и b_j – соответственно среднее и среднеквадратичное отклонение признака с номером j из множества X_3 , которые рассчитаны по всем наблюдениям обучающих выборок (приведены в табл. 3).

В задаче нелинейного дискриминантного анализа для двух классов $P(I)$ и $P(II)$ классификационное правило в пространстве m признаков, образующих множество X , для наблюдения $\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*)^T$ имеет вид:

$$\text{если } h(\mathbf{x}^*) < 0, \text{ то } \mathbf{x}^* \in P(I); \quad (6)$$

$$\text{если } h(\mathbf{x}^*) \geq 0, \text{ то } \mathbf{x}^* \in P(II), \quad (7)$$

где $h(\mathbf{x}^*)$ – классификационное число наблюдения \mathbf{x}^* :

$$h(\mathbf{x}^*) = -\frac{1}{2}(\mathbf{x}^*)^T \hat{\mathbf{d}}(I) + \frac{1}{2}(\mathbf{x}^*)^T \hat{\mathbf{d}}(II) + d_0(\mathbf{x}^*). \quad (8)$$

Таблица 3 – Значения нормировочных коэффициентов для признаков из множества X_3

Номера признаков из множества X_3 (j)	Наименование коэффициентов	
	коэффициент центрирования (a_j)	коэффициент нормирования (b_j)
1	8,9834e+09	1,5307e+10
2	4,7695e+14	5,8811e+14
3	1,1166e+05	8,4965e+04
4	1,9943e+09	2,9123e+09
5	1,2306e+05	2,0147e+05
6	8,2437e+04	2,9770e+04

В (8) коэффициенты первой $R(I, \mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{d}(I)$ и второй дискриминантных функций $R(II, \mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{d}(II)$ определяются по формулам

$$\hat{\mathbf{d}}(I) = \mathbf{S}^{-1}(I)(\bar{\mathbf{x}}(I) - \bar{\mathbf{x}}(II)), \quad (9)$$

$$\hat{\mathbf{d}}(II) = \mathbf{S}^{-1}(II)(\bar{\mathbf{x}}(II) - \bar{\mathbf{x}}(I)), \quad (10)$$

где $\mathbf{S}(k)$ – оценка ковариационной матрицы класса k ; $\bar{\mathbf{x}}(k)$ – оценка математического ожидания класса k ; $k = I, II$ – номер класса.

Первую и вторую линейные дискриминантные функции с коэффициентами соответственно (9) и (10) можно было бы использовать для решения задачи классификации при условии, что ковариационные матрицы первого и второго класса одинаковы: $R(I, \mathbf{x})$, если они равны ковариационной матрице первого класса, и $R(II, \mathbf{x})$, если они равны ковариационной матрице второго класса.

В (8) коэффициент $d_0(\mathbf{x}^*)$ определяется по формуле

$$\begin{aligned} d_0(\mathbf{x}^*) = & \frac{1}{2}(\bar{\mathbf{x}}(I))^T \hat{\mathbf{d}}(I) - \frac{1}{2}(\bar{\mathbf{x}}(II))^T \hat{\mathbf{d}}(II) + \\ & + \frac{1}{2}(\mathbf{x}^* - \bar{\mathbf{x}}(I))^T [\mathbf{S}^{-1}(I) - \mathbf{S}^{-1}(II)] (\mathbf{x}^* - \bar{\mathbf{x}}(II)) + \\ & + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\det[\mathbf{S}(I)]}{\det[\mathbf{S}(II)]} \right) - \ln \frac{c(II/I)\pi(I)}{c(I/II)\pi(II)}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\pi(I)$ и $\pi(II)$ – априорные вероятности появления наблюдений из совокупностей $P(I)$ и $P(II)$ соответственно; $c(I/II)$ – цена ошибочной классификации по правилу (6) – (11) наблюдения из совокупности $P(II)$ в качестве наблюдения из $P(I)$; $c(II/I)$ – цена ошибочной классификации по правилу

(6) – (11) наблюдения из совокупности $P(I)$ в качестве наблюдения из $P(II)$, правильная классификация не оценивается.

Цены ошибочных классификаций и априорные вероятности появления наблюдений из первого и второго класса были приняты одинаковыми: $c(II/I) = c(I/II)$ и $\pi(I) = \pi(II) = 0,5$.

Полученные нелинейные дискриминантные функции имеют вид:

$$R(I, x) = -23,9831 x_1^2 x_4^2 - 1,6492 x_2 x_3^2 x_4 - 8,3156 x_1 x_2 x_3 + \\ + 1,7688 x_1 x_5 + 29,7696 x_1^2 + 6,3927 x_4 x_5; \quad (12)$$

$$R(II, x) = -184,7408 x_1^2 x_4^2 - 1,6358 x_2 x_3^2 x_4 + 50,3724 x_1 x_2 x_3 + \\ + 9,2473 x_1 x_5 + 16,4617 x_1^2 + 15,7211 x_4 x_5. \quad (13)$$

Коэффициент $d_0(x)$ в (8) вычисляется для наблюдения x в соответствии с формулой (11), а входящие в нее величины – оценки векторов математических ожиданий, ковариационных матриц и обратных ковариационных матриц двух классов для шести признаков из множества X_3 – имеют вид:

$$\bar{x}(I) = \begin{pmatrix} 0,3804 \\ 0,0646 \\ 0,3458 \\ 0,2618 \\ 0,3606 \\ 0,6668 \end{pmatrix}, \quad S(I) = \begin{bmatrix} 1,8957 & 0,9099 & 1,6892 & 1,7089 & 1,8876 & 0,3922 \\ 0,9099 & 0,8256 & 0,6985 & 1,0603 & 0,9311 & -0,0753 \\ 1,6892 & 0,6985 & 1,7508 & 1,4409 & 1,7077 & 0,5452 \\ 1,7089 & 1,0603 & 1,4409 & 1,7306 & 1,7318 & 0,0923 \\ 1,8876 & 0,9311 & 1,7077 & 1,7318 & 1,9174 & 0,2405 \\ 0,3922 & -0,0753 & 0,5452 & 0,0923 & 0,2405 & 1,2106 \end{bmatrix},$$

$$\bar{x}(II) = \begin{pmatrix} -0,3308 \\ -0,0562 \\ -0,3007 \\ -0,2277 \\ -0,3136 \\ -0,5799 \end{pmatrix}, \quad S(II) = \begin{bmatrix} 0,0259 & 0,0295 & 0,0632 & 0,0233 & 0,0275 & 0,0171 \\ 0,0295 & 1,1890 & -0,0139 & 0,5478 & 0,0095 & 0,1756 \\ 0,0632 & -0,0139 & 0,1939 & 0,0107 & 0,0734 & -0,0043 \\ 0,0233 & 0,5478 & 0,0107 & 0,2980 & 0,0165 & 0,0725 \\ 0,0275 & 0,0095 & 0,0734 & 0,0165 & 0,0321 & 0,0030 \\ 0,0171 & 0,1756 & -0,0043 & 0,0725 & 0,0030 & 0,1078 \end{bmatrix},$$

$$S^{-1}(I) = \begin{bmatrix} 137,7171 & 9,6008 & 32,9804 & -16,5934 & -151,1672 & -27,5728 \\ 9,6008 & 12,7068 & 1,2631 & -17,2283 & -1,0151 & -1,3727 \\ 32,9804 & 1,2631 & 17,2200 & 1,4092 & -48,5845 & -8,8164 \\ -16,5934 & -17,2283 & 1,4092 & 31,7119 & -5,4877 & 2,3402 \\ -151,1672 & -1,0151 & -48,5845 & -5,4877 & 193,9604 & 32,6746 \\ -27,5728 & -1,3727 & -8,8164 & 2,3402 & 32,6746 & 6,9738 \end{bmatrix},$$

$$S^{-1}(II) = 1.0e + 03 \times \begin{bmatrix} 6,3115 & 0,1256 & -0,5717 & -0,2556 & -3,9205 & -0,9478 \\ 0,1256 & 0,0098 & -0,0167 & -0,0184 & -0,0608 & -0,0225 \\ -0,5717 & -0,0167 & 0,0983 & 0,0363 & 0,2433 & 0,0906 \\ -0,2556 & -0,0184 & 0,0363 & 0,0391 & 0,1176 & 0,0425 \\ -3,9205 & -0,0608 & 0,2433 & 0,1176 & 2,7395 & 0,5756 \\ -0,9478 & -0,0225 & 0,0906 & 0,0425 & 0,5756 & 0,1553 \end{bmatrix}.$$

Значения классификационных чисел (8) для объектов первого и второго классов приведены в предпоследних столбцах табл. 1 и 2. По знаку этих значений объект относится к тому или иному классу (их номера приведены в последних столбцах таблиц).

Анализ результатов статистической классификации. Анализ результатов классификации показывает, что в первом классе ошибочно классифицирован один объект – ракета-носитель М-5. Но следует отметить, что, судя по классификационному числу этого объекта (+2,53), эта РН находится рядом с объектами своего второго класса. Относительно классификации ракеты-носителя Atlas-E (63FD) (классификационное число -7,26) следует заметить, что из 23 пусков аварийными были первые два (!) пуска, и, если их не учитывать, то эта РН вообще войдет во второй класс. Учитывая сказанное, эту ракету-носитель, по-видимому, следует признать надежной. Такое же замечание справедливо для ракеты-носителя PSLV (классификационное число -8,73), у которой неудачным был первый (!) пуск из девяти пусков. Относительно классификации ракеты-носителя Космос-3М (классификационное число -4,49) следует отметить, что на аварийность пусков этой РН несомненно повлиял исследовательский, в основном, характер ее пусков. По другим ракетам-носителям первого класса, а также по ракетам-носителям второго класса, следует отметить уверенную правильную классификацию.

Оценим работоспособность построенного решающего правила на экзаменационной выборке наблюдений, т. е. на тех объектах, которые не использовались при построении дискриминантных функций (12) – (13). Информация о пусках ракет-носителей, не вошедших в обучающие выборки, приведена в табл. 4 (по состоянию на 30.06.2010).

Для проверки решающего правила на новых пусках ракет-носителей необходимо выполнить следующие действия:

а) по пяти основным техническим характеристикам X_0 исследуемой ракеты-носителя сформировать значения шести новых признаков из множества X_3 в соответствии с (4);

б) нормировать эти значения шести признаков по правилу (5), воспользовавшись табл. 3;

в) подставить эти нормированные значения шести признаков в дискриминантные функции (12) – (13);

г) вычислить коэффициент $d_0(x)$ по формуле (11);

д) вычислить классификационное число h по формуле (8);

е) по знаку классификационного числа h отнести исследуемую ракету-носитель к первому или второму классу.

Результаты проверки построенного решающего правила на экзаменационных пусках представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Исходные данные и результаты проверки построенного решающего правила на экзаменационной выборке

Номер носителя	Носитель	Масса РН, т (X ₁)	Ширина космодрома, град. (X ₂)	Стартовая тяга (тяга 1-й ст. у Земли), кгс (X ₃)	Удельный импульс у Земли 1-й ст., с (X ₄)	Удельный импульс в пустоте верхней ст., с (X ₅)	Количество пусков (N ₀)	Количество успешных пусков (N ₁)	Номер класса по результатам пусков	Классификационное число	Результат классификации
1	GSLV MK2	412,0	13,78	427180	240,0	451,0	1	0	1	-273,57	1
2	KSLV-1	140,0	34,44	196000	310,0	280,0	2	0	1	-10,78	1
3	Atlas-5 (411)	335	28,45	382700	311,3	451,0	2	2	2	-1,08	1
4	Atlas-5 (421)	335	28,45	382700	311,3	451,0	3	3	2	-1,08	1
5	Atlas-5 (551)	540	28,45	382700	311,3	451,0	1	1	2	-825,45	1
6	Atlas-5 (501)	335	28,45	382700	311,3	451,0	1	1	2	-1,08	1
7	CZ-3C	345	28,2	296160	260,7	440,0	4	4	2	+11,13	2
8	CZ-4C	249,2	41,22	294400	259,00	295,0	4	4	2	+7,58	2
9	Delta-4 (5.4)	345,0	28,45	299000	351,0	462,4	1	1	2	-73,12	1
10	Falcon-9	333,4	28,45	416700	255,0	342,0	1	1	2	+8,22	2
11	H-2B	567,6	30,4	200000	400,0	447,0	1	1	2	-8172,15	1
12	Союз-2-1А	313	45,98	507530	262,0	326,0	1	1	2	+32,58	2
13	Союз-2-1А/Фрегат	313	45,98	507530	262,0	332,0	2	2	2	+33,60	2
14	Союз-2-1Б	313	63,25	507530	262,0	359,0	1	1	2	+66,50	2
15	Союз-2-1Б/Фрегат	313	45,98	507530	262,0	332,0	2	2	2	+33,60	2

Отметим, что решающее правило не может применяться для РН с малой стартовой массой, а также для РН с очень большой стартовой массой, в силу указанного выше цензурирования данных. По аналогичной причине оно не может применяться для РН с большой стартовой тягой.

Анализ результатов в табл. 4 показывает, что две РН из первого (аварийного) класса классифицированы правильно, а из тринадцати РН второго (безаварийного) класса правильно классифицированы семь. Три РН – Atlas-5 (411), Atlas-5 (421), Atlas-5 (501) – классифицированы как "слабо-аварийные" (классификационные числа равны -1,08). Две РН – Atlas-5 (551) и Н-2В – классифицированы как аварийные (классификационные числа равны -825,45 и -8172,15), по-видимому, из-за их большой стартовой массы по сравнению с аналогами. Ошибка в классификации РН Delta-4 (5.4) вызвана, по-видимому, тем обстоятельством, что аналоги этой РН – (Delta-4Н, Delta-4М, Delta-4М+(4,2)) не попали в обучающую выборку из-за малого числа пусков.

Заключение. Решена задача статистической классификации ракет-носителей по их успешности пусков на основе критерия качества дискриминантных функций в нелинейном дискриминантном анализе [2, 3] и итерационного алгоритма [4], построенных по принципам метода группового учета аргументов [5 – 8]. Получено решающее правило, построенное в пространстве основных технических характеристик, которое позволяет прогнозировать успешность пусков ракеты-носителя по ее основным техническим характеристикам. Проверка решающего правила на новых пусках ракет-носителей, не входящих в обучающие выборки, позволяет сделать вывод об удовлетворительном качестве предсказания успешности пусков ракет-носителей на основе построенного правила классификации.

Отметим, что по мере увеличения числа пусков при пополнении базы данных достигнутое качество классификации будет улучшаться. Отметим также, что если необходимо улучшить качество предсказания успешности пусков, то следует, кроме основных технических характеристик, привлечь дополнительную информацию о ракетах-носителях и условиях их пусков.

1. Надежность технических систем / Е. Переверзев, А. Аллатов, Ю. Даниев, П. Новак. – Днепропетровск : Пороги, 2002. – 396 с.
2. Sarychev A. P. GMDH-Based Criterion for Optimal Set Features Determination in Nonlinear Discriminant Analysis / A. P. Sarychev, L. V. Sarycheva // III International Conference on Inductive Modelling (ICIM-2010), May, 2010, Yevpatoria, Ukraine : Proceedings of Conf. – Kyiv : IRTC ITS, 2010. – P. 40 – 43.
3. Сарычев А. П. Определение оптимального множества признаков в задаче нелинейного дискриминантного анализа на основе метода группового учета аргументов / А. П. Сарычев, Л. В. Сарычева // Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы. ИИ-2010 : Международная научно-техническая конференция, сентябрь, 2010 г., Кацивели, Украина : материалы конференции. – Том 1. – Донецк : ИПИИ "Наука і освіта", 2010. – С. 345 – 351.
4. Сарычев А. П. Итерационный алгоритм МГУА для синтеза разделяющей функции в задаче дискриминантного анализа / А. П. Сарычев // Автоматика. – 1988. – № 2. – С. 20 – 24.
5. Ивахненко А. Г. Помехоустойчивость моделирования / А. Г. Ивахненко, В. С. Степанко. – Киев : Наукова думка, 1985. – 216 с.
6. Ивахненко А. Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным / А. Г. Ивахненко, Ю. П. Юрачковский. – М. : Радио и связь, 1987. – 120 с.
7. Сарычев А. П. Идентификация состояний структурно-неопределенных систем / А. П. Сарычев. – Днепропетровск : Институт технической механики НАНУ и НКАУ, 2008. – 268 с.
8. Сарычев А. П. Решение задачи дискриминантного анализа в условиях структурной неопределенности на основе метода группового учета аргументов / А. П. Сарычев // Проблемы управления и информатики. – 2008. – № 3. – С. 100 – 112.