ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 32 за 2020 г.

ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Гавриков Б.М., Гавриков М.Б., Пестрякова Н.В.

Об устойчивости статистического классификатора состояний систем организма человека к искажениям

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Гавриков Б.М., Гавриков М.Б., Пестрякова Н.В. Об устойчивости статистического классификатора состояний систем организма человека к искажениям // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2020. № 32. 40 с. http://doi.org/10.20948/prepr-2020-32
URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2020-32

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Р о с с и й с к о й а к а д е м и и н а у к

Б.М. Гавриков, М.Б. Гавриков, Н.В. Пестрякова

Об устойчивости статистического классификатора состояний систем организма человека к искажениям

Москва — 2020

Б.М. Гавриков, М.Б. Гавриков, Н.В. Пестрякова

Об устойчивости статистического классификатора состояний систем организма человека к искажениям

Описывается методика и результаты анализа свойств разработанного авторами классификатора, предназначенного для оценивания состояния здоровья человека по результатам лабораторного анализа периферической крови. В основе лежит нелинейный метод статистической классификации, использующий полиномиально-регрессионный подход и имеющий вероятностные оценки. Проводится исследование устойчивости метода к искажениям и его экстраполяционных возможностей.

Ключевые слова: состояние здоровья человека, система организма, периферическая кровь, классификация, полиномиальная регрессия

Boris Mikhailovich Gavrikov, Mikhail Borisovich Gavrikov, Nadejda Vladimirovna Pestryakova

On the stability of the statistical classifier of states of human body systems to distortions

The methodology and the results of the analysis of the properties of the classifier developed by the authors are described, which are intended for assessing the state of human health according to the results of laboratory analysis of peripheral blood. It is based on the non-linear method of statistical classification, using the polynomial-regression approach and having probabilistic estimates. A study is made of the stability of the method to distortion and of its extrapolation capabilities.

Key words: human health, body system, peripheral blood, classification, polynomial regression

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 18-29-26008.

Оглавление

Введение 3
Метод классификации 4
Численное моделирование искажений 6
Эритроциты RBC[L^{-1}] 8
Тромбоциты PLT[L^{-1}] 12
Лейкоциты WBC[L^{-1}] 16
Гемоглобин HGB[gL^{-1}] 19
Лимфоциты LIMPH [%] 23
Заключение 27
Библиографический список 40

Введение

Одним из аспектов развития современной цифровой доказательной медицины является разработка численных методов решения проблемы оценивания состояния здоровья человека (СЗЧ), а также связанного с ним гомеостаза, который характеризует относительное динамическое постоянство внутренней среды (крови, лимфы, тканевой жидкости) и устойчивости основных физиологических функций организма. К последним относится кровообращение, дыхание, терморегулирование, обмен веществ. В рамках этой концепции организм рассматривается не в виде разнородных, не связанных между собой органов, а как совокупность их систем. Актуальность данной проблематики возрастает, поскольку с использованием новых технологических возможностей в медицине необходимо тщательно следить за состоянием систем организма (СО) в процессе лечения.

В монографии [1] при оценке гомеостаза и его динамики предлагается использовать не менее пяти показателей периферической крови (из пальца). В настоящей работе описан статистический классификатор, основанный на полиномиальной регрессии и генерирующий вероятностные оценки. По восьми параметрам периферической крови производится деление на четыре класса, соответствующие стадиям поражения СО: здоровые (К1), начальные (К2), выраженные (К3) отклонения состояния здоровья, тяжелое заболевание (К4), отдельно для мужчин и женщин [2,3].

Контроль изменения точности распознавания обучающего множества является неотъемлемой частью итерационной процедуры обучения классификатора. Нарастание этой величины и достижение приемлемых значений говорит об успешности данного процесса.

Высокая точность классификации на обучающем множестве является необходимым, но не достаточным условием построения качественного классификатора. При решении вопроса о возможности его практического использования необходимо провести проверку на элементах, не используемых для обучения.

Одним из способов такой проверки является анализ качества классификации объектов, полученных на основе элементов обучающего множества. При небольших изменениях исходных данных можно судить об устойчивости метода к искажениям. Более существенные модификации позволяют провести исследование способности метода к экстраполяции.

На основе этого подхода уже решалась аналогичная проблема в задаче распознавания символов [4,5]. Модифицированные объекты являлись результатом постепенного затемнения или засветления использовавшихся при обучении печатных и рукопечатных символов, что имеет место для вполне реальных ситуаций с более темными и светлыми текстами.

Однако перенести полностью такой подход на исследуемые несимвольные объекты не представляется возможным. Во-первых, рассмотрение обучающего множества в виде совокупности всех классов было вполне обосновано для символов: как показал численный эксперимент, выявленные закономерности одинаковы для каждого из элементов алфавита. Во-вторых, искажения производились синхронно по всем пикселам растра – в представленном здесь классификаторе элементы пространства первичных признаков имеют разную размерность и диапазоны изменения, в отличие от яркости пикселов. В-третьих, ограничения в интервале искажений, определяемых диапазоном яркости пикселов, здесь отсутствуют.

Имеется ряд трудностей с разработкой методики подобного анализа. В перечень свойств метода распознавания входят его экстраполяционные свойства – точного определения этой характеристики нет. Также проблематично, как описывать поведение генерируемых методом оценок распознавания на объектах, не входящих в обучающее множество, что может служить признаком ухудшения используемого способа оценивания, насколько правомочно использование самой функции оценки.

В последнее время появилось большое количество публикаций с описанием результатов, относящихся к распознаванию элементов, полученных при некоторой заданной модификации или иначе искажении исходных. К сожалению, систематический подход в этих работах отсутствует.

В настоящем исследовании сделана попытка заполнить имеющийся пробел. Предлагается математическая модель, предназначенная для численного исследования динамики характеристик распознавания множеств, первоначально использовавшихся для обучения метода классификации, при двух способах их постепенно нарастающего изменения. Небольшая размерность исходного признакового пространства (восемь параметров крови) позволила рассмотреть раздельно каждый признак.

Метод классификации

Используются восемь показателей крови. Их общепринятые обозначения и размерность: RBC [L^{-1}] – эритроциты, HGB [gL^{-1}] – гемоглобин, PLT [L^{-1}] – тромбоциты, WBC [L^{-1}] – лейкоциты, LIMPH [L^{-1}], [%] – лимфоциты, GRAN [L^{-1}], [%] – гранулоциты (GRAN=NEUT+EOS+BASO, где NEUT[L^{-1}],[%] – нейтрофилы, EOS[L^{-1}],[%] – эозинофилы, BASO[L^{-1}],[%] – базофилы).

Вводим вектор $\mathbf{v}\in\mathbf{R}^N$, i-я компонента которого – отнормированная на отрезок [0,1] величина i-го показателя крови, причем N=8. Отождествляем k-й элемент множества градаций СЗЧ с базисным вектором $\mathbf{e}_k$=(0…1…0) (здесь 1 находится на k-м месте, $1\le k\le K$, причем K=4) из $\mathbf{R}^K$. Обозначаем $Y=\{\mathbf{e}_1,\ldots,\mathbf{e}_K\}$.

Пусть $p_k(\mathbf{v})$ – вероятность того, что набор отнормированных показателей крови соответствует k–му элементу СЗЧ, где $1\le k\le K$. Искомый элемент СЗЧ будет иметь порядковый номер r, получивший максимальное значение вероятности:

$$p_r(\mathbf{v}) = \max_k \{p_k(\mathbf{v})\},\ 1 \le k \le K. \tag{1}$$

Приближенные значения $p_1(\mathbf{v}),\ldots,p_K(\mathbf{v})$ представляются в виде конечных многочленов от координат $\mathbf{v}=(v_1,\ldots,v_N)$ и определяются выбором базисных мономов:

$$p_k(\mathbf{v}) \cong c_0^{(k)} + \sum_{i=1}^{N} c_i^{(k)} v_i + \sum_{i,j=1}^{N} c_{i,j}^{(k)} v_i v_j + \ldots,\ 1 \le k \le K. \tag{2}$$

Представим упорядоченные базисные мономы из (2) в виде вектора размерности L:

$$\mathbf{x}(\mathbf{v})=(1, v_1, \ldots, v_N, \ldots)^{\mathrm{T}}.$$

Тогда (2) можно записать в векторном виде:

$$\mathbf{p}(\mathbf{v}) = (p_1(\mathbf{v}),\ldots,p_K(\mathbf{v}))^{\mathrm{T}} \cong A^{\mathrm{T}}\mathbf{x}(\mathbf{v}), \tag{3}$$

где A – матрица размера $L \times K$, столбцами которой являются векторы $\mathbf{a}^{(1)},\ldots, \mathbf{a}^{(K)}$. Каждый такой вектор составлен из коэффициентов при мономах соответствующей строки (2) (с совпадающим верхним индексом), упорядоченных так же, как в векторе $\mathbf{x}(\mathbf{v})$.

Значение A вычисляется приближенно в процессе обучения с использованием базы данных: $[\mathbf{v}^{(1)},\mathbf{y}^{(1)}]$, …, $[\mathbf{v}^{(J)},\mathbf{y}^{(J)}]$. Здесь $\mathbf{v}^{(j)}$ – набор параметров крови, соответствующий элементу СЗЧ с номером k ($1 \le k \le K$), $\mathbf{y}^{(j)}=(0\ldots1\ldots0)$ – его базисный вектор, где 1 стоит на k-м месте, $1 \le j \le J$):

$$A \cong \left(\frac{1}{J}\sum_{j=1}^{J}\mathbf{x}^{(j)}(\mathbf{x}^{(j)})^{\mathrm{T}}\right)^{-1}\left(\frac{1}{J}\sum_{j=1}^{J}\mathbf{x}^{(j)}(\mathbf{y}^{(j)})^{\mathrm{T}}\right). \tag{4}$$

Проблема обращения заполненной матрицы большой размерности до сих пор не решена [6]. Правую часть (4) получаем посредством рекуррентной процедуры [7].

Использовались модификации вектора $\mathbf{x}(\mathbf{v})$ следующего вида:

$$\begin{gathered}\mathbf{x}=(1,\{v_i\},\{v_i v_j\},\{v_i v_j v_k\},\{v_i v_j v_k v_l\},\{v_i v_j v_k v_l v_m\}),\\ 1 \le i \le 8,\ i \le j \le 8,\ j \le k \le 8,\ k \le l \le 8,\ l \le m \le 8.\end{gathered} \tag{5}$$

В (5) выражения в фигурных скобках соответствуют цепочкам элементов вектора, вычисляемым по всем показателям крови из имеющегося набора.

Были разработаны и обучены классификаторы для семи СО мужского пола и девяти – женского [2,3]. В (5) представлен классификатор максимальной рассмотренной сложности. При разработке классификаторов определяли необходимую сложность полиномов (в частности их степень), основываясь на

точности классификации обучающего множества. Если использование многочлена не давало 100% точности, переходили к более сложному.

Для ряда СО была получена 100% классификация на обучающем множестве уже на полиноме длиной 61, с мономами степенного вида первого, второго, третьего и четвертого порядка. Перекрестные произведения использовались в качестве мономов второго порядка, а для более высоких порядков отсутствовали. В четырех СО даже полином пятой степени (5) максимальной длины 1287 обеспечил лишь 95-99,2% правильной классификации. Однако использование полиномов шестого порядка привело к фатальному замедлению процесса обучения.

Численное моделирование искажений

Рассмотрим пищеварительную систему для мужчин. Обучающее множество имеет 109 элементов: классы здоровья К1 и К4 содержат по 33 набора крови, а классы К2 и К3 включают соответственно 17 и 26 элементов.

Далее при нумерации классов К1, К2, К3, К4 используется символ $c, 1 \le c \le 4$, а число элементов обозначено |К1|, |К2|, |К3|, |К4|. Признаки П1, …, П8 перенумерованы посредством символа $b, 1 \le b \le 8$.

В таблице 1 для К1, К2, К3, К4, приведены диапазоны, которым принадлежат используемые первичные признаки П1,…,П8 ($D_b^c \equiv [l_b^c, r_b^c], 1 \le c \le 4, 1 \le b \le 8$). Также для каждого признака указан соответствующий отрезок по совокупности четырех классов ($D_b \equiv \bigcup_{1 \le c \le 4} D_b^c \equiv [l_b, r_b]$). Особенность К1 заключается в том, что пятый, седьмой и восьмой признаки являются константами (вырожденные случаи).

Таблица 1

Интервалы признаков по классам здоровья системы организма

N признака	*Класс «1»*	*Класс «2»*	*Класс «3»*	*Класс «4»*	*Классы «1-2-3-4»*
1	[437,548]	[369,574]	[330,573]	[304,586]	[304,586]
2	[170,336]	[102,217]	[61,517]	[134,504]	[61,517]
3	[439,900]	[390,1750]	[220,1380]	[467,2167]	[220,2167]
4	[1310,1630]	[1080,1770]	[860,1680]	[910,1690]	[860,1770]
5	186	[110,450]	[80,310]	[50,380]	[50,450]
6	[208,393]	[171,887]	[184,963]	[51,403]	[51,963]
7	2900	[2300,11700]	[1300,10500]	[2840,19640]	[1300,19640]
8	658	[492,763]	[437,766]	[480,906]	[437,906]

Рассмотрим один из четырех классов (c_0). Будем исследовать объекты, полученные из элементов этого класса, входящих в обучающее множество, при модификации признака с номером b_0. На *t*-м шаге

$$v_{b0} \to v_{b0} + h_{b0} \cdot t, h_{b0} = (r_{b0} - l_{b0})/10, t = 1,...,9.$$

На рисунках с литерой «а» для каждого из рассматриваемых классов по отдельности показано, как нарастает число модифицированных элементов, у которых значение фиксированного признака П1, …, П8 вышло за границы отрезка, определяемого этими номерами класса и признака ($D_b^c, 1 \le c \le 4, 1 \le b \le 8$), а именно, за правый его конец (число элементов N_{b+}^c) при увеличении признака (Ряд1) или за левый (N_{b-}^c) при его уменьшении (Ряд3). Также показано, как при этом изменяется количество ошибок распознавания *N*e (Ряд2 и Ряд4 соответственно).

Будем оценивать *экстраполяционные свойства* метода следующим образом. Если на каком-то интервале изменения *t* имеем: *N*e< N_{b+}^c (*N*e< N_{b-}^c), то считаем это признаком *хорошей экстраполяции*, напротив, при выполнении *N*e> N_{b+}^c (*N*e> N_{b-}^c) *экстраполяция плохая*. Равенство соответствующих величин означает среднее качество.

Это деление условное, но оно является информативным и позволяет внести ясность при исследовании динамики искажений. На основе предложенных к рассмотрению величин нетрудно ввести числовые характеристики экстраполяционных свойств метода.

Пусть при распознавании модифицированных элементов данного класса (c_0) на шаге *t* некоторое их количество отнесено классификатором к рассматриваемому классу (правильное распознавание), тогда E_w суть среднее арифметическое их оценок; если ряд таких объектов отошел к другим классам (неправильное распознавание), то E_e вычисляется как среднее арифметическое оценок альтернативы, соответствующей классу c_0. Если вычисление средней оценки не зависит от правильности распознавания, то получаем E_m; как нетрудно догадаться, эта величина является оценкой центра масс рассматриваемого класса с учетом его искажения.

Рисунки с литерой «б» демонстрируют динамику оценки центра масс E_m (Ряд1), а также средних оценок: правильного распознавания E_w (Ряд2) и неправильного E_e (Ряд3) при росте значения признака П1, …, П8, а с литерой «в» – аналогичные величины при его падении.

При анализе поведения оценок будут рассмотрены следующие аспекты. Выполнение условий E_e=255 или E_e<≈255 соответствует фатальному нарушению оценок. Если на некотором отрезке изменения *t* выполняется $\min_{[t_0,t_1]} E_w \le \max_{[t_0,t_1]} E_e$, то разделение оценок по диапазонам отсутствует. Уменьшение величины (E_w-E_e) говорит об ухудшении разделения оценок.

Во избежание путаницы используемое в литературе свойство монотонности оценок (уменьшение количества ошибок при повышении оценки, представляющее интерес в области высоких оценок) обозначим *e-monotony*.

Ограничимся рассмотрением признаков П1, П2, П3, П4, П6, чтобы пока исключить вырожденные случаи.

Эритроциты RBC[L^{-1}]

Класс 1

При неискаженном К1 количество ошибок распознавания нулевое (Ne=0), как и на двух начальных шагах изменения П1 (рис.1а) в обоих направлениях (*устойчивость к небольшим искажениям*). Далее Ne растет, но остается ниже числа модифицированных объектов, у которых П1 вышел за пределы D_1^1 (признак *хорошей экстраполяции*): Ne< N_{1+}^1, Ne< N_{1-}^1. Также внутри отрезка [0,4] по оси абсцисс имеет место неравенство: $N_{1-}^1 > N_{1+}^1$, однако различие этих стремительно нарастающих величин незначительное. С середины интервала искажения (пятый шаг для обоих направлений) все значения П1 оказываются за нижней и верхней границами D_1^1 ($N_{1-}^1 = N_{1+}^1$=|К1|=33); здесь же при нарастании этого признака Ne в два раза меньше, чем при его убывании. Дальнейшее повышение П1 приводит к тому, что скорость роста Ne падает до нуля, Ne лишь приближается к числу элементов |К1| (на двух последних шагах Ne≡29); при понижении этого признака с шестого шага Ne≡|К1|.

При увеличении П1 изначально высокие оценки (252) правильного распознавания E_w и центра масс E_m нарастают, а с пятого шага выходят на верхний предел 255; оценка неправильного распознавания постоянна: E_e≡255, что говорит о нарушении *e-monotony* (рис.1б). Столь высокий уровень и равенство E_w и E_e делает невозможным использование функции оценки согласно исходной постановке и требует ее переработки.

При уменьшении П1 (рис.1в) все оценки понижаются – в этом нет противоречий с методикой распознавания. Однако заметим, что на отрезке [3,5] по оси абсцисс выполняется: E_e>E_w, причем начало этого отрезка соответствует высокому уровню оценки E_e, что соответствует нарушению *e-monotony* метода.

Итак, для класса К1 на начальных шагах обоих способов модификации П1 наблюдается устойчивое безошибочное распознавание – в этой зоне нет проблем ни с экстраполяцией, ни с оценками. Далее число ошибок Ne нарастает, но остается ниже, чем N_{1-}^1 и N_{1+}^1, которые на середине интервала искажения достигают |К1|=33 (*хорошая экстраполяция*). На следующем шаге Ne=|К1| при уменьшении П1, а при увеличении этого признака на последнем отрезке происходит стабилизация количества ошибок (Ne≡29). Понижение П1 приводит к максимальному нарастанию Ne и сопровождается падением E_m, однако поскольку появляются ошибки при высоком уровне E_e, то происходит нарушение *e-monotony* оценок (причем выполняется E_e>E_w). В результате повышения П1 значение Ne увеличивается и устанавливается, не достигая |К1|,

при этом E_m, растет и выходит на уровень 255; оценки неадекватны, также не выполняется свойство *e-monotony* (E_w=E_e=255).

Класс 2

Немодифицированный класс К2 распознается с одной ошибкой (Ne=1). В первой половине интервала искажений (рис.2а) наблюдается значительный рост Ne в обоих направлениях изменения П1: $N\text{e} > N_{1+}^2$, $N\text{e} \geq N_{1-}^2$ (противоположные неравенства по сравнению с К1, что является признаком *плохой экстраполяции*). На середине диапазона увеличения П1 имеем: Ne=|К2|=17 (с пятого шага). Ne лишь приближается к числу элементов |К2| при максимальном уменьшении данного признака (Ne=15). Внутри отрезка [0,8] по оси абсцисс выполняется соотношение $N_{1-}^2 > N_{1+}^2$, что сходно с К1, но имеется и отличие: с одной стороны, разница между этими величинами в целом существенная, а с другой стороны, темпы их роста значительно уступают имевшимся в К1 (с пятого по седьмой шаг $N_{1-}^2 \equiv 15$). Лишь на предпоследнем шаге обоих типов изменения П1 все значения этого параметра уходят за нижнюю и верхнюю границы ($N_{1-}^2 = N_{1+}^2$=|К2|).

Рассмотренные способы модификации К2 сопровождаются уменьшением двух оценок: E_e – в среднем, а E_m – монотонным, с небольшим нарушением на седьмом шаге понижения П1 (рис.2б,в). Напротив, оценка E_w растет (с незначительными отклонениями) в обоих направлениях искажения; при понижении П1 с пятого шага E_w выходит на верхний предел 255. Однако количество правильных ответов классификатора при увеличении этого признака быстро падает до нуля, а при его уменьшении становится малым (рис.2а). Для обоих видов искажения E_w существенно превышает E_e, выполняется условие разделения диапазона оценок, а именно, при росте П1 $\max\limits_{[0,9]} E_e < \min\limits_{[0,4]} E_w$, причем на наибольшем искажении E_e уменьшается до нулевого уровня, а при падении этого признака $\max\limits_{[0,9]} E_e < \min\limits_{[0,9]} E_w$. Указанные здесь [0,4] и [0,9] – отрезки по оси абсцисс (рис.2б,в), на которых существуют соответствующие оценки (аналогичные обозначения используются и далее по тексту). Противоречий с методикой оценивания нет.

Обратим внимание на следующие закономерности. При понижении П1 вначале Ne нарастает с большой скоростью, при этом выполняется соотношение: $N\text{e} \geq N_{1-}^2$, а начиная с пятого шага $N\text{e} < N_{1-}^2$, причем наблюдается стабилизация числа ошибок практически на одном значении: Ne<|К2| (рис.2а). До этого постепенно увеличивавшаяся E_w именно здесь устанавливается на верхнем пределе 255 (рис.2в), далее происходит отмеченное ранее нарушение монотонности E_m, а быстро падавшая функция неправильного распознавания E_e начиная с четвертого шага, где $N\text{e} = N_{1-}^2$, совершает небольшие колебания на довольно низком уровне (25-31). Отметим также, что локальный максимум E_e

на первом шаге соответствует резкому повышению Ne на соответствующем интервале.

Итак, немодифицированный К2 распознается с одной ошибкой. На первой половине интервала искажения П1 величина Ne нарастает быстрее, чем N^2_{1-} и N^2_{1+} (*плохая экстраполяция*); две последние величины достигают максимума |К2|=17 только на предпоследнем шаге. Уже с середины этого диапазона Ne=|К2| при увеличении П1, а при его уменьшении Ne почти стабилизируется на 14. Заметим, что повышение П1 приводит к максимальному нарастанию Ne и сопровождается монотонным падением E_m до нулевой отметки. Когда П1 понижается, сначала быстрый рост Ne сопровождается падением E_m, но затем Ne устанавливается, не достигая |К2|; при этом E_m очень незначительно падает, к тому же с небольшим нарушением монотонности. Оценки адекватны в обоих направлениях изменения П1, причем выполняется условие разделения диапазона оценок.

Класс 3

В исходном классе К3 имеется одна ошибка распознавания (Ne=1). Для первой половины интервала изменения П1 в обоих направлениях, аналогично К2, наблюдается существенный рост Ne: $N\text{e} \geq N^3_{1+}$, $N\text{e} > N^3_{1-}$, что говорит о *плохой экстраполяции* (рис.3а). Исключением является первый отрезок увеличения П1, где Ne≡1 (*устойчивость к искажению*). Выполняется соотношение $N^3_{1-} > N^3_{1+}$, причем аналогично К2 разница между этими величинами в общем значительная (после первого шага, где $N^3_{1-} = N^3_{1+}$), а скорости роста существенно уступают имевшимся в К1. На последнем шаге изменения П1 в обоих направлениях все значения этого признака уходят за нижнюю и верхнюю границы ($N^3_{1-} = N^3_{1+}$=|К3|=26). Начиная с шестого шага уменьшения П1 имеем: Ne≡|К3|. Однако при увеличении этого параметра и здесь, и далее Ne<<|К3| (при максимальном искажении Ne =16).

Два рассмотренных способа искажения К3 сопровождаются немонотонным поведением оценки неправильного распознавания E_e (рис.3б,в) (повышение сменяется понижением). Увеличению П1 соответствует также локальный минимум E_e на первом шаге. Однако уже со второго шага нарастания данного признака уровень E_e значительно выше, чем в случае его убывания. Достижение значения E_e=172 на четвертом шаге при увеличении П1 свидетельствует об ухудшении *e-monotony*. При повышении П1 оценка E_w почти монотонно увеличивается и выходит на верхний предел 255 с шестого шага; также наблюдается разделение диапазонов оценок: $\max\limits_{[0,9]} E_e < \min\limits_{[0,9]} E_w$ (рис.3б). При понижении П1 E_w падает, причем на каждом шаге $E_e < E_w$ (рис.3в), однако диапазоны оценок для всего интервала искажения не разделены. Оба способа модификации К3 вызывают уменьшение оценки E_m – при понижении П1 монотонное, а при повышении данного признака с небольшим нарушением монотонности на первом и втором шагах (заметим, что на первом шаге

увеличения П1 новые ошибки не появляются, а на следующем шаге изменение E_m незначительное).

Увеличение П1 приводит к быстрому нарастанию *N*e после второго шага, при этом выполняется соотношение *N*e> N^3_{1+}, а начиная с шестого шага имеем *N*e< N^3_{1+}, здесь также формируются следующие соотношения величин: *N*e почти стабилизируется (рис.3а); начинает падать до этого возраставшая оценка неправильного распознавания E_e, динамика (E_w-E_e) полностью противоположная, а постепенно увеличивавшаяся оценка правильного распознавания E_w устанавливается на верхнем пределе 255 (рис.3б). Заметим, что локальный минимум E_e на первом шаге увеличения П1 соответствует падению оценки единственной ошибки неискаженного К3 (первый интервал), а затем ее повышению при появлении новых ошибок (второй интервал). Природа локального максимума на первом шаге уменьшения П1 аналогична описанному последнему этапу.

Итак, немодифицированный К3 распознается с одной ошибкой. При увеличении П1 на начальном шаге новые ошибки не появляются (*устойчивость к искажению*), а на втором шаге *N*e= N^3_{1+}. За исключением данного участка, в первой половине интервала искажения *N*e нарастает быстрее, чем N^3_{1-} и N^3_{1+} (*плохая экстраполяция*); две последние величины достигают максимума |К3|=26 только на последнем шаге. С середины этого интервала *N*e=|К3| при уменьшении П1, а при его увеличении *N*e почти стабилизируется на уровне 15-16. Следует отметить, что понижение П1 приводит к максимальному нарастанию *N*e и сопровождается монотонным падением E_m до очень низкого уровня. В результате повышения П1 на первом шаге *N*e сохраняет свое значение, а на втором меняется незначительно – при этом E_m немного увеличивается. Дальнейший рост П1 приводит к подъему *N*e, затухающему в конце интервала искажения (*N*e<<|К3)|, – при этом E_m медленно уменьшается. При повышении П1 выполняется условие разделения диапазона оценок, однако высокий уровень E_e требует дополнительного анализа относительно *e-monotony*. При понижении П1 на каждом шаге E_e<E_w, но отсутствует разделение оценок по диапазонам.

Класс 4

Исходный К4 распознается без ошибок (*N*e=0). На всем интервале изменения П1 в обоих направлениях N^4_{1-} и N^4_{1+} нарастают, но не все значения этого признака уходят за нижнюю и верхнюю границы (на последнем шаге $N^4_{1-} = N^4_{1+}$=31), причем, в отличие от К2 и К3, выполняется соотношение $N^4_{1+} > N^4_{1-}$, и разница между этими величинами в целом существенная, исключая второй шаг, где N^4_{1-} - N^4_{1+}=1. При увеличении П1 до третьего шага *N*e нарастает, затем стабилизируется на одном отрезке; на указанных участках *N*e> N^4_{1+} (*плохая экстраполяция*); начиная с пятого шага *N*e< N^4_{1+}, причем здесь и далее *N*e падает (рис.4а). При уменьшении П1 наблюдается небольшой рост *N*e:

Ne> N^4_{1-} на втором шаге (*локальная проблема с экстраполяцией*). С третьего шага Ne< N^4_{1-}, начинается монотонное падение Ne до значения 1. При каждом способе изменения П1 имеем: Ne<<|К4|=33.

Увеличение П1 приводит к тому, что исходная оценка E_w (224) сначала за один шаг падает до 204 (появление ошибок), а затем нарастает и колеблется вблизи верхнего предела 255 (рис.4б). При этом E_e от значения 102 на первом шаге постепенно понижается и совершает колебания около 56. E_m вначале монотонно падает (с уменьшением Ne) и на третьем шаге достигает минимума, а далее постепенно повышается, замедляя темп к концу интервала искажения (сопутствует увеличению Ne).

При уменьшении П1 (рис.4в) E_w почти монотонно нарастает до значения 255, а E_e от 151 на первом шаге сначала монотонно падает, а затем совершает колебания (с ощутимым размахом), что объясняется изменением Ne при низком уровне этой величины. Оценка E_m имеет незначительный локальный минимум на втором шаге (совпадает с максимумом Ne), а далее очень медленно увеличивается (сопутствует уменьшению Ne).

В каждом из двух указанных способов изменения П1 выполняется неравенство: $\max\limits_{[1,9]} E_e < \min\limits_{[0,9]} E_w$. Оценки адекватные.

Итак, немодифицированный К4 распознается без ошибок. В начале интервала искажения Ne нарастает быстрее, чем N^4_{1-} и N^4_{1+} (*проблемная экстраполяция*). N^4_{1-} и N^4_{1+} на последнем шаге достигают значения 31 (при |К4|=33). Повышение П1 приводит к росту Ne до 18, при этом E_m уменьшается, а затем происходит падение Ne до 12, сопровождающееся увеличением E_m. Понижение П1 приводит к росту Ne до 4, причем локальный максимум Ne совпадает с локальным минимумом E_m; затем происходит падение Ne до 1, при этом E_m увеличивается. Для обоих направлений модификации генерируются адекватные оценки, причем диапазоны оценок разделены.

Тромбоциты PLT[L^{-1}]

Класс 1

В классе К1 динамика величин N^1_{2-}, N^1_{2+} и Ne при модификации П2 схожа с имевшейся для соответствующих величин при изменении П1 (рис.1а, 5а). Лишь различие между быстро нарастающими N^1_{2-} и N^1_{2+} значительно больше, а ошибок с увеличением П2 появляется меньше (25 против 29 на максимальном изменении соответствующего признака при |К1|=33, однако темп роста Ne остается высоким.

Увеличение П2 приводит к тому, что изначально высокая оценка правильного распознавания E_w (252) сначала совершает незначительные колебания (увеличиваясь, а затем уменьшаясь) и наконец нарастает и выходит на верхний предел 255 (рис.5б). Напротив, оценка неправильного распознавания E_e почти монотонно падает от 255 до 236. Оценка E_m на всем

диапазоне искажения убывает, за исключением незначительного локального максимума на втором шаге, где Ne=0. Поскольку E_e имеет максимальную оценку 255 на третьем шаге (причем здесь E_e>E_w), то нарушено свойство *e-monotony*.

При уменьшении П2 (рис.5в) оценка правильного распознавания E_w сначала монотонно уменьшается, а на пятом и шестом шагах резко нарастает и выходит на верхний предел 255. Здесь имеется локальный минимум в целом монотонно убывающей E_e. Заметим, что именно с седьмого шага выполняется Ne=|К1|. На начальном этапе появления ошибок E_e=246 (высокий уровень говорит об ухудшении *e-monotony*), причем на третьем и четвертом шаге E_e>E_w. Нарастание Ne до максимального значения сопровождается монотонным уменьшением E_m.

Итак, для К1 при искажении П2 в обоих направлениях на начальных шагах наблюдается устойчивое безошибочное распознавание – нет проблем ни с экстраполяцией, ни с оценками. Далее Ne повышается, но медленнее, чем увеличиваются N^1_{2-} и N^1_{2+}, которые еще до середины интервала искажения достигают максимума |К1|=33 (*хорошая экстраполяция*). При уменьшении П2 на второй половине интервала искажения Ne поднимается до |К1|, а при увеличении этого признака везде Ne<<|К1| без понижения темпа роста. В каждом из рассмотренных способов изменения П2 наблюдается падение E_m. Поскольку при повышении П1 имеем E_e=255, то нарушена *e-monotony*; аналогичные выводы можно сделать и при понижении П1 ввиду появления ошибок с высокими оценками (E_e=246); при этом в обоих направлениях изменения П1 выполняется E_e>E_w, отсутствует разделение диапазона оценок.

Класс 2

В классе К2 динамика величин N^2_{2-}, N^2_{2+} и Ne при модификации П2 отличается от имевшейся для П1 (рис.2а, 6а). Уже на третьем шаге обоих направлений изменения П2 стремительно нараставшие N^2_{2-} и N^2_{2+} достигают максимального значения: $N^2_{2-} = N^2_{2+}$=|К2|=17. Внутри этого интервала $N^2_{2-} < N^2_{2+}$ при их незначительном различии. На первом шаге $Ne > N^2_{2+}$, $Ne > N^2_{2-}$ (признак *плохой экстраполяции*), но уже со второго шага $Ne < N^2_{2+}$, $Ne < N^2_{2-}$. При уменьшении П2 значение Ne в целом растет (при наличии участков локальной стабилизации) с замедлением темпа, и с предпоследнего шага Ne=|К2|. При увеличении этого параметра Ne ведет себя немонотонно: сначала быстро повышается, с третьего по шестой шаг не меняется (Ne≡15), а далее на трех последних шагах понижается до значения Ne=11.

С ростом П2 оценка правильного распознавания E_w на первых трех интервалах увеличивается от 169 до 255, далее не изменяется, а на последнем шаге уменьшается до 252 (рис.6б). Оценка неправильного распознавания E_e имеет локальный максимум на первом шаге, а далее постепенно уменьшается; на последних трех шагах наблюдаются колебания (при итоговом росте). Прослеживается взаимное соответствие динамики числа ошибок и оценок. При

увеличении П2 сначала Ne повышается (E_m падает, E_w растет), затем Ne стабилизируется с третьего шага - именно здесь E_w устанавливается на 255 (падение E_m почти прекращается); на трех последних интервалах Ne понижается – на них происходит подъем E_m, а также колебание и увеличение E_e, которая перед этим уменьшалась монотонно и постепенно. Локальный максимум E_e на первом шаге приходится на область стремительного роста Ne, а также E_w. Оценки адекватные, причем $\max\limits_{[0,9]} E_e < \min\limits_{[0,9]} E_w$.

При уменьшении П2 (рис.6в) оценка правильного распознавания E_w на первых трех интервалах быстрого роста Ne стремительно увеличивается от 169 до 255 (E_m падает), далее происходит замедление как роста Ne, так и понижения E_m (у последней имеется небольшой локальный максимум), а E_w изменяется незначительно до седьмого шага, где резко уменьшается до 147 (далее Ne=|К2|, $E_m \equiv E_e = 0$). Оценка неправильного распознавания E_e постепенно уменьшается, исключением является локальный максимум на пятом шаге (в такт со скачкообразным изменением темпа роста Ne перед выходом на Ne=|К2|). Проблемы с оценками не отмечены, причем $\max\limits_{[0,9]} E_e < \min\limits_{[0,7]} E_w$.

Итак, для класса К2 на трети интервала модификации П2 в обоих направлениях быстро нарастающие N^2_{2-} и N^2_{2+} достигают максимума |К2|=17. На первом шаге $Ne > N^2_{2+}$, $Ne > N^2_{2-}$, что говорит о *плохой экстраполяции*, но далее в обоих неравенствах знак меняется на противоположный. Особенностью К2 является немонотонное поведение количества ошибок при росте П2: сначала Ne повышается, затем стабилизируется на уровне Ne=15, а далее понижается до Ne=11. Эта динамика ошибок сопровождается падением, установлением и подъемом E_m. При уменьшении П2 Ne монотонно растет (E_m падает до нуля): с предпоследнего шага Ne≡|К2|, $E_m \equiv E_e = 0$. В обоих способах изменения П2 оценки адекватные, выполняется условие разделения диапазона оценок.

Класс 3

Для класса К3 динамика величин N^3_{2-}, N^3_{2+} и Ne при изменении П2 существенно изменяется по сравнению с П1 (рис.3а, 7а).

Увеличение П2 характеризуется тем, что с первого до шестого шага $N^3_{2+} \equiv 1$, после чего эта величина резко нарастает до значения 21 на последнем шаге. Заметим, что |К3|=26, следовательно, $N^3_{2+} <$|К3| даже при максимальном искажении. Сначала Ne быстро нарастает (при этом E_m падает), но уже с четвертого шага устанавливается на значении 21, а далее уменьшается и с седьмого шага стабилизируется на 20 (что сопровождается небольшими колебаниями E_m в диапазоне 105-120). За исключением последнего шага, Ne$> N^3_{2+}$ (*плохая экстраполяция*). Оценка E_w на первых двух интервалах опускается от исходного значения 209 до 187, а далее постепенно нарастает и с пятого шага почти стабилизируется на уровне 241-248, лишь в самом конце опускается до 233 (рис.7б). Оценка E_e также в целом изменяются постепенно:

нарастает до пятого шага (при аналогичном изменении Ne), затем убывает, а на последнем шаге немного повышается (при стабилизации и незначительном уменьшении Ne). Исключением является локальный максимум E_e и минимум (E_w-E_e) на втором шаге, сопутствующий резкому изменению темпа роста Ne.

Уменьшение П2 сопровождается стремительным увеличением N^3_{2-}, но уже с четвертого шага эта величина устанавливается на значении 25 (рис.7в). Темп роста Ne ниже, чем у N^3_{2-}, но также достаточно большой; Ne< N^3_{2-} (*хорошая экстраполяция*). С шестого шага Ne стабилизируется на значении 22, а на последнем шаге достигает 24. Именно с шестого шага до этого нараставшая E_w устанавливается на значении 255. Сначала (E_w-E_e) падает, а E_e в целом повышается, но на шестом шаге (при резком прекращении роста Ne) E_e переходит к постепенному понижению, (E_w-E_e) увеличивается. На всем интервале искажения E_m монотонно падает, исключая незначительный локальный максимум на первом шаге, сопутствующий появлению новой ошибки, помимо имевшейся для немодифицированного множества.

При обоих способах изменения П2 выполняется: $\max\limits_{[0,9]} E_e < \min\limits_{[0,9]} E_w$.

Итак, в классе К3 при увеличении П2 на двух третьих интервала искажения N^3_{2+}=1, а далее N^3_{2+} стремительно нарастает до 21 (не достигает |К3|=26); поскольку Ne> N^3_{2+}, *экстраполяция плохая*, при этом Ne изменяется немонотонно: сначала повышается (E_m падает), затем устанавливается на 21, а далее понижается до 20 и заново стабилизируется (сопровождается небольшими колебаниями E_m). При уменьшении П2 величина N^3_{2-} нарастает быстрее, чем Ne: Ne< N^3_{2-} (*хорошая экстраполяция*); с четвертого шага N^3_{2-}≡25; с шестого шага Ne≡22, и на последнем шаге Ne достигает 24 (сопровождается монотонным падением E_m). Для обоих способов искажения К3 выполняется условие разделения диапазона оценок, однако вызывает опасение уменьшение (E_w-E_e) на втором шаге понижения П2 и третьем шаге повышения этого признака.

Класс 4

В классе К4 при изменении П2 N^4_{2-} и N^4_{2+} монотонно нарастают, на последнем шаге $N^4_{2-} = N^4_{2+}$=|К4|=33. Выполняется соотношение $N^4_{2-} > N^4_{2+}$, причем разница между этими величинами в общем значительная. Исключением является предпоследний шаг, где соотношение противоположное, а значения почти равны. Вплоть до шестого шага увеличения П2 соблюдается Ne> N^4_{2+} (*плохая экстраполяция*), на седьмом шаге Ne= N^4_{2+}, а далее Ne< N^4_{2+}, причем Ne растет на всем диапазоне изменения П2 и достигает значения 31 при максимальном искажении (рис.8а). Этот процесс сопровождается падением E_m. При уменьшении П2 сначала число ошибок повышается (E_m падает), а с третьего шага начинается колебание Ne между значениями 14 и 15 (E_m

медленно повышается). *Экстраполяция хорошая*: Ne< N^4_{2-}; только на втором шаге Ne> N^4_{2-} с отличием в 1.

Увеличение П2 приводит к тому, что исходная оценка E_w (224) в целом нарастает (с колебаниями) и достигает верхнего предела 255 только в точке с максимальным искажением (рис.8б). При этом оценка E_e совершает колебания в диапазоне от 28 до 78, а в конце понижается до уровня 2-6. При уменьшении П2 (рис.8в) E_w почти монотонно нарастает до значения 255 на седьмом шаге, а E_e с колебаниями меняется от 50 на первом шаге до 66 на последнем.

В каждом из указанных способов изменения П2 диапазоны оценок разделены: $\max\limits_{[1,9]} E_e < \min\limits_{[0,9]} E_w$.

Итак, в рамках класса К4 монотонно нарастающие N^4_{2-} и N^4_{2+} достигают максимума |К4|=33 на последнем шаге модификации. При повышении П2 более чем на половине интервала искажения выполняется Ne> N^4_{2+} (*плохая экстраполяция*), а далее это соотношение меняется на противоположное; Ne растет и в конце достигает значения 31; это сопровождается монотонным падением E_m. Когда П2 понижается, Ne< N^4_{2-} (*хорошая экстраполяция*), исключением является второй шаг с противоположным неравенством при минимальном различии величин; Ne изменяется немонотонно: сначала повышается, затем совершает колебания на уровне 14-15; при этом падение E_m сменяется постепенным небольшим ростом. Оценки вполне адекватные для обоих способов изменения П2; диапазоны оценок разделены.

Лейкоциты WBC[L^{-1}]

Класс 1

В классе К1 динамика величин N^1_{3-}, N^1_{3+}, а также (при уменьшении П3) и Ne схожа с имевшейся для соответствующих величин при рассмотрении П1, П2 (рис.1а,5а,9а). Различие между быстро нарастающими N^1_{3-} и N^1_{3+} промежуточное по сравнению с имеющимся для П1 и П2. При увеличении П3 уже на втором шаге появляются ошибки (отрезок устойчивого безошибочного распознавания на начальных шагах меньше, чем для П1 и П2), а на пятом шаге Ne=|К1|=33.

Оба направления изменения П3 приводит к монотонному уменьшению E_w, E_e и E_m, причем E_e<E_w на каждом шаге существования обеих оценок (рис.9б,в). К последнему шагу уровень E_e при падении П3 значительно выше, чем при росте этого признака (85 против 17). Поведение E_e коррелируется с динамикой Ne для двух рассмотренных способов искажения К1. А именно, при увеличении П3 ошибки появляются раньше, и их количество нарастает быстрее, а уровень E_e ниже и падает скорее, чем при уменьшении этого признака. В каждом направлении изменения П3 оценки адекватны, однако нет разделения диапазона оценок: $\min\limits_{[0,4]} E_w < \max\limits_{[2,9]} E_e$ при увеличении П3, а также $\min\limits_{[0,5]} E_w < \max\limits_{[3,9]} E_e$ при уменьшении П3.

Итак, на начальном этапе изменения П3 в обоих направлениях наблюдается устойчивое безошибочное распознавание К1 (только на первом шаге при увеличении этого признака), а далее Ne повышается, но остается меньше, чем стремительно увеличивающиеся N^1_{3-} и N^1_{3+}, которые еще до трети интервала искажения достигают максимума |К1| (*хорошая экстраполяция*). На середине интервала искажения Ne поднимается до |К1|, что сопровождается монотонным падением E_m. Оценки адекватны при обоих способах изменения П3, причем $E_e<E_w$ на каждом шаге, где имеются обе оценки. Разделения диапазона оценок нет ни в одном из способов искажения.

Класс 2

Для класса К2 увеличение П3 характеризуется тем, что с первого до четвертого шага $N^2_{3+}\equiv1$; далее эта величина стремительно поднимается и достигает максимального значения |К2|=17 на седьмом шаге (рис.10а). На первых двух отрезках Ne растет быстро, затем замедленно (здесь везде E_m понижается); с четвертого шага Ne устанавливается на максимуме 17 (E_m также стабилизируется на 11). Поскольку Ne>> N^2_{3+}, *экстраполяция плохая*. Оценка E_w нарастает ко второму шагу до 255 и остается такой же на следующем отрезке (рис.10б). Оценка E_e на первых двух отрезках увеличивается от начального значения 72 до 85, далее падает, сначала резко, затем замедленно, а с четвертого шага не изменяется ($E_e\equiv11$). Динамика E_w и E_e коррелируются с характером изменения Ne. А именно, быстрое нарастание Ne на двух начальных интервалах сопровождается заметным увеличением E_e и E_w. На следующем отрезке медленного повышения Ne перед стабилизацией происходит падение E_e и установление E_w.

Уменьшение П3 сопровождается стремительным увеличением N^2_{3-}, но уже с третьего шага (до шестого) эта величина устанавливается на значении 16, а на седьмом шаге достигает максимума 17 (рис.10а). Темп роста количества ошибок велик – с третьего шага Ne стабилизируется на 17 (здесь также резко замедляется происходившее до этого быстрое падение E_m). Поскольку Ne$\geq N^2_{3-}$, *экстраполяция плохая*. На двух отрезках существования E_w нарастает (рис.10в). В целом наблюдается уменьшение E_e со стабилизацией на значении 31 для трех последних шагов. Локальный максимум E_e на начальном интервале коррелируется с резким увеличением Ne.

Выполняется неравенство $\max\limits_{[0,9]} E_e<\min\limits_{[0,3]} E_w$ при повышении П3 и $\max\limits_{[0,9]} E_e<\min\limits_{[0,2]} E_w$ при понижении этого параметра, проблем с оценками нет.

Итак, для класса К2 при увеличении П3 до четвертого шага $N^2_{3+}=1$; далее эта величина нарастает до максимума |К2|=17 на седьмом шаге. При уменьшении П3 сначала N^2_{3-} быстро увеличивается, с третьего до шестого шага устанавливается на 16, а на седьмом шаге достигает 17. В обоих направлениях искажения *экстраполяция плохая*: Ne быстро нарастает (с превышением N^2_{3+} и

N^2_{3-}) до наивысшего значения, что сопровождается сначала стремительным падением, а затем стабилизацией E_m. В каждом из способов изменения П3 выполняется условие разделения диапазона оценок, оценки адекватные.

Класс 3

Для класса К3 при увеличении П3 вплоть до четвертого шага Ne≡1, а далее число ошибок падает до нуля (при этом E_m увеличивается и стабилизируется на 255 с четвертого шага) (рис.11а,б). Значение N^3_{3+} нарастает и устанавливается на максимуме |К3|=26 с шестого шага, причем на первом шаге Ne= N^3_{3+}, а далее Ne<< N^3_{3+} (*хорошая экстраполяция*). Исходная оценка правильного распознавания E_w (209) монотонно нарастает и с четвертого шага устанавливается на верхнем уровне 255 (рис.11б). Оценка неправильного распознавания E_e, имеющая неискаженное значение 56, с первого по третий шаг равна нулю, а на четвертом шаге подскакивает до 255, что говорит о нарушении *e-monotony*.

На первых двух отрезках уменьшения П3 наблюдается рост величины Ne до 11 (сопровождается уменьшением E_m), далее Ne падает (при увеличении E_m); Ne=3 на последнем шаге (рис.11а). N^3_{3-} монотонно увеличивается с достижением максимального значения на шестом шаге, причем на первом шаге Ne> N^3_{3-} (*плохая экстраполяция*), а далее Ne< N^3_{3-}. Внутри отрезка [0,6] выполняется соотношение $N^3_{3-} > N^3_{3+}$ (разница между ними в целом значительная). E_w почти монотонно повышается и с четвертого шага устанавливается на 255 (рис.11в). E_e от неискаженного значения 56 сначала в целом очень медленно нарастает до 73 на четвертом шаге, далее темп роста E_e резко увеличивается (при этом (E_w-E_e) уменьшается), а после максимума (E_e=163) на седьмом шаге на двух последних интервалах E_e падает до 115, а (E_w-E_e) растет. Выполняется неравенство: $\max\limits_{[0,9]} E_e < \min\limits_{[0,9]} E_w$. На первом шаге E_e и E_w имеют соответственно локальный максимум и минимум, вызванные резким увеличением Ne. Оценки адекватные.

Итак, в К3 в результате изменения П3 величины N^3_{3+} и N^3_{3-} нарастают и достигают |К3|=26 на шестом шаге. При уменьшении П3 сначала Ne повышается, а затем понижается (что сопровождается синхронным падением, а затем ростом E_m); на первом шаге Ne> N^3_{3-} (*плохая экстраполяция*), а далее Ne< N^3_{3-}. При увеличении П3 сначала сохраняется неискаженное значение Ne=1, далее Ne падает до 0 (E_m растет и стабилизируется на 255); на первом шаге Ne= N^3_{3+}, а далее Ne<< N^3_{3+} (*хорошая экстраполяция*). Поведение оценок адекватно при понижении П3, выполняется условие разделения диапазона оценок; при повышении этого параметра имеется нарушение *e-monotony* (E_e=255).

Класс 4

Для класса К4 повышение П3 характеризуется тем, что N^4_{3+} к шестому шагу медленно увеличивается до 3, после чего резко нарастает до максимального значения |К4|=33 на последнем шаге (рис.12а). Рост Ne, сначала быстрый (с достижением значения 24 на втором шаге), а далее замедленный, сопровождается понижением E_m; на четвертом шаге Ne устанавливается на значении 26, а затем уменьшается и с седьмого шага стабилизируется на 25 – при этом E_m повышается (рис.12б). До седьмого шага Ne$> N^4_{3+}$ (*плохая экстраполяция*), а далее Ne$< N^4_{3+}$. Оценка E_w на первом отрезке опускается от исходного значения 224 до 188, а далее постепенно нарастает и с четвертого шага почти стабилизируется на уровне 255 (рис.12б). E_e падает от значения 92 на первом шаге до 55, а затем также увеличивается до 158.

Уменьшение П3 сопровождается стремительным ростом N^4_{3-}: на третьем шаге эта величина достигает значения 30, после чего медленно нарастает до 33 на последнем шаге. Число ошибок увеличивается почти линейно и достигает Ne=13 при максимальном искажении, что сопровождается очень незначительным повышением E_m, приближающимся к 255. *Экстраполяция хорошая* везде: Ne$< N^4_{3-}$. Нарастающая E_w с четвертого шага устанавливается на значении 255 (рис.12в). E_e также повышается от 134 на первом шаге до 249 на последнем, что говорит об ухудшении *e-monotony*.

В каждом из указанных способов изменения П3 выполняется условие разделения диапазонов оценок: $\max\limits_{[1,9]} E_e < \min\limits_{[0,9]} E_w$.

Итак, для К4 при росте П3 количество ошибок Ne изменяется немонотонно: сначала поднимается, затем устанавливается на 26, а далее опускается и заново стабилизируется на 25 (при этом E_m понижается, а потом повышается). N^4_{3+} к шестому шагу медленно увеличивается до 3, после чего резко нарастает до максимального значения |К4|=33 в конце. До седьмого шага Ne$> N^4_{3+}$ (*плохая экстраполяция*), а далее Ne$< N^4_{3+}$. Поведение оценок адекватное; выполнено условие разделения диапазонов оценок. Падение П3 приводит к почти линейному увеличению Ne до 13 на максимальном искажении, при крайне незначительном повышении E_m, приближающемся к 255. К третьему шагу N^4_{3-} стремительно нарастает до 30, после чего медленно поднимается до 33 на последнем шаге. *Экстраполяция хорошая* везде: Ne$< N^4_{3-}$. Оценки вызывают опасения ввиду небольшой разницы между E_w и E_e; высокий уровень E_e говорит об ухудшении *e-monotony*.

Гемоглобин HGB[gL^{-1}]

Класс 1

В классе К1 динамика величин N^1_{4-}, N^1_{4+}, а также (при повышении П4) и Ne схожа с имевшейся для аналогичных величин при изучении П3 (рис.13а, 9а).

При увеличении П4 уже на втором шаге появляются ошибки (отрезок устойчивого безошибочного распознавания на начальных шагах меньше, чем для П1 и П2), а на пятом шаге Ne=|К1|=33. Столь стремительное нарастание ошибок сопровождается монотонным понижением E_m. Наблюдается очень незначительное убывание E_w на четырех отрезках существования этой величины; E_e почти монотонно падает от 226 при появлении ошибок на втором шаге до 90 в конце интервала искажения (рис.13б); диапазоны оценок разделены: $\max\limits_{[2,9]} E_e < \min\limits_{[0,4]} E_w$. Вызывает опасение высокий уровень оценок ошибочного распознавания: на третьем шаге E_e=229, что говорит о проблемах с выполнением *e-monotony*.

При уменьшении П4 только на четвертом шаге появляется одна ошибка (интервал с сохранением правильного распознавания больше, чем для П1, П2 и П3), а Ne при начавшемся после пятого шага существенном нарастании, даже на последнем шаге достигает значения 25 (меньше, чем |К1|=33). При этом изменение E_m (локальный максимум на первом шаге и дальнейшее повышение) происходит в небольшом диапазоне (252-254,6) вблизи максимума 255. E_w практически монотонно нарастает до 255 и сохраняет это значение на двух последних шагах. Ошибка, появившаяся на четвертом шаге, имеется и на пятом с неизменной оценкой E_e=255, что свидетельствует о нарушении *e-monotony* (рис.13в). Далее (после небольшого локального минимума) E_e к концу интервала искажения немного подрастает почти до 255.

Итак, для К1 на начальных шагах наблюдается устойчивое безошибочное распознавание (минимальное при увеличении П4, а при его уменьшении более широкое, чем для П1, П2, П3) – нет проблем ни с экстраполяцией, ни с оценками. Число ошибок Ne нарастает медленнее, чем увеличиваются N^1_{2-} и N^1_{2+}, особенно существенно при уменьшении П4 (*хорошая экстраполяция*). Тем не менее при нарастании этого признака Ne быстро поднимается до максимального значения, что сопровождается стремительным падением E_m. При уменьшении П4 поздно начавшееся увеличение Ne без достижения максимума приводит к изменению E_m в небольшом диапазоне вблизи 255. При повышении П4 разделены диапазоны оценок, однако появление ошибок с высокими оценками (E_e=229) говорит об ухудшении *e-monotony*. При понижении П4 нарушается *e-monotony*: E_e=255.

Класс 2

В классе К2 динамика величин N^2_{4-}, N^2_{4+}, Ne, E_e, E_w и E_m при обоих способах изменения П4 схожа с имевшейся для П1 (рис.14а, 2а). В первой половине интервала искажений (рис.14а) наблюдается существенный рост Ne (с понижением E_m) в обоих направлениях изменения П4: Ne> N^2_{4+}, Ne> N^2_{4-} (*плохая экстраполяция*). Внутри отрезка [0,8] выполняется соотношение $N^2_{4-} > N^2_{4+}$, причем разница между этими величинами существенная. Лишь на предпоследнем шаге обоих типов изменения П4 все значения данного

параметра уходят за нижнюю и верхнюю границы ($N^2_{4-} = N^2_{4+}$ =|К2|=17). С пятого шага увеличения П4 имеем: *N*e=|К2|. При уменьшении этого признака *N*e устанавливается на 15, лишь на последнем шаге приближается к числу элементов |К2| (*N*e=16). Для обоих направлений изменения П4 в области выхода *N*e на установление E_m имеет локальный максимум, а дальше еще опускается и стабилизируется, причем в случае увеличения П4 на более низком уровне, чем при его уменьшении.

Два способа искажения К2 сопровождаются схожим немонотонным изменением оценки неправильного распознавания E_e, которая в целом понижается, более заметно при увеличении П4, чем при его уменьшении (рис.14б,в). Оценка правильного распознавания E_w в целом растет в обоих направлениях модификации (при понижении П4 с восьмого шага выходит на верхний предел 255, а при повышении этого признака достигает максимума на четвертом шаге). Однако количество правильных распознаваний при увеличении П4 уже на пятом падает до нуля, а при его уменьшении становится незначительным (рис.14а). Также выполняется неравенство: $\max\limits_{[0,9]} E_e < \min\limits_{[0,4]} E_w$ в случае увеличения П4, а при уменьшении этого параметра $\max\limits_{[0,9]} E_e < \min\limits_{[0,9]} E_w$; в обоих случаях оценки адекватные.

Итак, для К2 на первой половине интервала искажения П4 величина *N*e нарастает быстрее, чем N^2_{4-} и N^2_{4+} (*плохая экстраполяция*), которые достигают максимума |К2|=17 только на предпоследнем шаге. Уже с середины этого диапазона *N*e=|К2| при увеличении П4, а при его уменьшении *N*e стабилизируется на 15 и в конце достигает 16. В обоих случаях E_m опускается и устанавливается, причем в случае увеличения П4 на более низком уровне, чем при его уменьшении. В каждом направлении изменения П4 выполняется условие разделения диапазона оценок, оценки адекватны.

Класс 3

Для класса К3 при изменении П4 величины N^3_{4-} и N^3_{4+} увеличиваются почти одинаково; на последнем шаге N^3_{4-}=|К3|=26 и N^3_{4+}=25 (рис.15а).

Повышение П4 приводит к возрастанию *N*e до 26 уже на пятом шаге, причем *N*e> N^3_{4+} (*плохая экстраполяция*) на всем интервале модификации. Оценка E_m монотонно падает. E_w опускается от начальной величины 209 до 142 на четвертом шаге искажения. E_e от исходного значения 56 поднимается до 97 (максимум при появлении новых ошибок помимо имевшейся в отсутствии искажения), а затем падает до 15 на предпоследнем и последнем шагах. Оценки адекватны, причем $\max\limits_{[0,9]} E_e < \min\limits_{[0,4]} E_w$.

При уменьшении П4 с первого по восьмой шаг *N*e=2; только на последнем шаге *N*e=3 (*N*e<< N^3_{4-}, *хорошая экстраполяция*). Оценка E_m повышается от 203 до 247. E_w растет и достигает 255 при максимальном искажения. E_e сначала увеличивается до 74, затем с небольшими колебаниями падает до 39 (E_w-E_e

повышается), после этого E_e нарастает до 189 на последнем шаге (E_w-E_e понижается). Следовательно, имеется ухудшение *e-monotony*. Выполняется $\max\limits_{[0,9]} E_e < \min\limits_{[0,9]} E_w$ при малом различии величин.

Итак, в классе К3 с изменением П4 величины N^3_{4-} и N^3_{4+} увеличиваются почти одинаково; на последнем шаге N^3_{4-}=|К3|=26 и N^3_{4+}=25. При повышении П4 Nе возрастает до максимального значения на середине интервала искажения, причем везде Nе$> N^3_{4+}$ (*плохая экстраполяция*); E_m падает. При понижении этого признака сначала Nе стабилизируется на значении 2, а на последнем шаге повышается до 3 (Nе$<< N^3_{4-}$, *хорошая экстраполяция*), при этом E_m растет. Хотя в обоих случаях искажения К3 выполняется условие разделения диапазона оценок, при увеличении П4 оценки адекватны, а при уменьшении этого признака разница между левой и правой частями соответствующего неравенства невелика, кроме того, ухудшается *e-monotony*, поскольку E_e достигает большого значения.

Класс 4

В классе К4 при обоих способах изменения П4 N^4_{4-} и N^4_{4+} увеличиваются, причем $N^4_{4+} > N^4_{4-}$ с первого до шестого шага, а на остальных шагах $N^4_{4+} = N^4_{4-}$; в конце интервала искажения обе величины достигают максимума |К4|=33 (рис.16а).

При повышении П4 сначала Nе незначительно поднимается: на втором и третьем шагах достигает значения 5, а далее падает и с пятого шага стабилизируется на 1, что сопровождается сначала ростом, а с пятого шага – установлением E_m на 247. Везде выполняется неравенство Nе$< N^4_{4+}$ (*хорошая экстраполяция*). Оценка E_w увеличивается, на третьем шаге достигает 255 и после незначительного колебания устанавливается на этом значении (рис.16б). E_e к четвертому шагу повышается от 150 до 170, а далее резко падает и стабилизируется на нулевом уровне.

При понижении П4 на третьем шаге Nе нарастает до 14, затем на четвертом шаге падает до 13, далее опять увеличивается до 24 при максимальном искажении; на всем интервале изменения П4 происходит монотонное убывание E_m. До пятого шага выполняется неравенство Nе$> N^4_{4+}$ (*плохая экстраполяция*), далее неравенство меняется на противоположное. Оценка E_w на начальном интервале имеет локальный минимум (опускается от 224 до 207), а затем почти монотонно нарастает (с небольшими колебаниями) и на двух последних шагах принимает значение 255 (рис.16в). Оценка E_e совершает колебания, противоположные с наблюдаемыми у Nе: падает от 96 до 29 на четвертом шаге (локальный минимум Nе), затем нарастает до 70 и далее опять уменьшается до 45.

В каждом из указанных способов изменения П4 выполняется неравенство: $\max\limits_{[1,9]} E_e < \min\limits_{[0,9]} E_w$, оценки адекватные.

Итак, в классе К4 N^4_{4-} и N^4_{4+} достигают максимума |К4|=33 на последнем шаге. При повышении П4 везде Ne< N^4_{4+} (*хорошая экстраполяция*); сначала Ne нарастает до 5, затем убывает (эти этапы сопровождаются монотонным ростом E_m), а с середины интервала искажения Ne стабилизируется на значении 1 (E_m также устанавливается на 247). При понижении П4 Ne почти монотонно возрастает до 24, при этом E_m монотонно падает; до пятого шага выполняется неравенство Ne> N^4_{4+} (*плохая экстраполяция*), а далее неравенство меняется на противоположное. Оценки адекватны для обоих направлений искажения К4, причем выполняется условие разделения диапазона оценок.

Лимфоциты LIMPH [%]

Класс 1

В классе К1 динамика величин N^1_{6-}, N^1_{6+} при обоих способах изменения П6 схожа с имевшейся для П1 (рис.17а, 1а). При неискаженном К1 количество ошибок распознавания нулевое (Ne=0), как и на двух начальных шагах изменения П6 (рис.17а) в обоих направлениях. Далее Ne монотонно увеличивается (исключая локальную стабилизацию на предпоследнем отрезке повышения П6), причем выполняется соотношение: Ne< N^1_{6+}, Ne< N^1_{6-} (*хорошая экстраполяция*). На первом шаге имеет место: $N^1_{6+} > N^1_{6-}$, при значительном различии этих стремительно нарастающих величин; на следующем шаге они сближаются, а приведенное неравенство меняет знак на противоположный; далее $N^1_{6-} \equiv N^1_{6+} \equiv$|К1|. С третьего до седьмого шага Ne при росте П6 существенно больше, чем при его убывании. При последующем уменьшении П6 с восьмого шага Ne=|К1|, а при увеличении этого признака Ne приближается к максимуму (Ne=32 при наибольшем искажении).

При повышении П6 на участке безошибочной классификации (Ne≡0) и на двух начальных отрезках с нарастанием Ne значение E_m увеличивается от 252, достигает максимума 255 и далее устанавливается на нем. Изначально высокая E_w (252) в целом нарастает (исключая локальный минимум на третьем шаге) и с четвертого шага выходит на верхний предел 255; оценка E_e постоянна и равна 255, т.е. *e-monotony* нарушена (рис.17б). Столь высокий уровень и равенство E_w и E_e делает невозможным использование функции оценки.

При уменьшении П6 (рис.17в) все оценки в целом понижаются – исключением является локальные максимумы E_w (пятый шаг), а также E_e (четвертый и седьмой шаги); нет противоречий с методикой распознавания. Также выполняется неравенство: $\max\limits_{[3,9]} E_e < \min\limits_{[0,9]} E_w$, но различие между величинами в левой и правой частях неравенства небольшое.

Итак, для класса К1 на начальных шагах обоих способов модификации наблюдается устойчивое безошибочное распознавание – в этой зоне нет проблем ни с экстраполяцией, ни с оценками. Далее число ошибок Ne

нарастает, но остается ниже, чем стремительно нарастающие N^1_{6-} и N^1_{6+}, которые на третьем шаге достигают максимума |К1| (*хорошая экстраполяция*). В результате повышения П6 значение *N*e увеличивается: *N*e=|К1|-1 при наибольшем искажении; при этом E_m растет и с четвертого шага устанавливается на максимуме 255, следовательно, оценки не адекватны, свойство *e-monotony* нарушено (E_w=E_e=255). При понижении П6 монотонный рост *N*e с достижением максимума на предпоследнем шаге сопровождается уменьшением E_m (очень незначительным в начальной зоне с *N*e≡0); оценки адекватны, причем диапазоны оценок разделены.

Класс 2

Увеличение П6 в классе К2 характеризуется тем, что с первого до четвертого шага N^2_{6+}=1, после чего эта величина резко нарастает до максимального значения 17 на предпоследнем шаге. На первом отрезке *N*e повышается до 10 (сопровождается уменьшением E_m), а далее *N*e понижается (с отдельными участками стабилизации) до 5 при максимальном искажении, чему сопутствует увеличение E_m, исключая локальный минимум на седьмом шаге (рис.18а,б). До шестого шага *N*e> N^2_{6+} (*плохая экстраполяция*), а далее знак в этом неравенстве меняется на противоположный. Оценка E_w ко второму шагу увеличивается от исходного значения 169 до 255 и устанавливается на этом уровне. Оценка E_e в целом повышается от неискаженного значения 72 до 204 на последнем шаге, но имеются многочисленные колебания со значительным размахом. На каждом шаге E_w>E_e, но диапазоны оценок не разделены. Поскольку E_e в конце интервала искажения нарастает до большого значения, это свидетельствует об ухудшении *e-monotony* оценок.

Уменьшение П6 сразу вызывает стремительный рост N^2_{6-}, но с третьего до седьмого шага эта величина устанавливается на 16, а на двух последних шагах принимает максимальное значение 17 (рис.18а). Вначале *N*e быстро монотонно повышается, затем в целом до конца интервала искажения увеличивается, но незначительно, причем с шестого шага совершает колебания в диапазоне 13-14 (сопровождается медленным уменьшением E_m от исходного значения 163 до 145, далее очень постепенным увеличением до 161, а с шестого шага – понижением с нарастающим темпом). На первом отрезке *N*e> N^2_{6-} при разнице величин на 1 (*проблемная экстраполяция*), а со второго шага *N*e< N^2_{6-}, но различие между ними невелика. Оценка E_w ведет себя немонотонно: к третьему шагу увеличивается от 169 до 255 и на одном отрезке стабилизируется на этом уровне, затем падает до 170 на седьмом шаге, а далее нарастает до 239 к концу интервала искажения (рис.18в). Оценка E_e сначала в целом повышается от неискаженного значения 72 до 151 на седьмом шаге, а затем к последнему шагу уменьшается до 33. Диапазоны оценок не разделены. На каждом шаге E_w>E_e, но на седьмом шаге различие этих величин мало, следовательно, правильность оценок вызывает опасение.

Итак, в классе К2 при росте П6 количество ошибок Ne изменяется немонотонно: сначала на одном шаге резко повышается (сопровождается уменьшением E_m), затем постепенно понижается (с увеличением E_m). До шестого шага Ne$>N^2_{6+}$, что говорит о *плохой экстраполяции*; далее знак в этом неравенстве меняется на противоположный. При падении П6 на первой половине интервала искажения Ne увеличивается быстро, а далее поднимается более медленно и совершает колебания на уровне 13-14, что сопровождается сначала очень плавным понижением E_m, от исходного значения 163 до минимума 145 и подъемом на первоначальный уровень, а с шестого шага – падением с нарастающим темпом. На первом шаге Ne$>N^2_{6-}$, что свидетельствует о *проблемной экстраполяции*, а везде далее Ne$<N^2_{6-}$, но разница между ними невелика. Диапазоны оценок не разделены при изменении П6 в обоих направлениях, но на каждом шаге $E_w>E_e$, причем различие этих величин становится малым при понижении П6, а при его повышении E_e в конце интервала искажения нарастает до большого значения, *e-monotony* оценок ухудшается. Следовательно, правильность оценивания в обоих случаях вызывает опасение.

Класс 3

В классе К3 увеличение П6 характеризуется тем, что с первого до пятого шага N^3_{6+}=1, после чего эта величина резко нарастает до максимального значения |К3|=26 на последнем шаге. К шестому шагу Ne повышается до 24 (при этом E_m падает), до восьмого шага не изменяется: Ne≡24 (участки локальной стабилизации Ne и E_m совпадают), и на последнем отрезке Ne увеличивается до 25 (с понижением E_m) (рис.19а,б). За исключением последнего шага Ne$>N^3_{6+}$ (*плохая экстраполяция*). Оценка E_w ко второму шагу поднимается от исходного значения 209 до 248, затем к четвертому шагу падает до 229, а с пятого шага стабилизируется на 255 (рис.19б). E_e от неискаженного значения 56 резко повышается на первом отрезке (при аналогичном изменении Ne из-за появлении большого количества ошибок сверх имевшейся в отсутствии искажения); далее E_e до третьего шага незначительно колеблется на уровне 89-95, затем резко падает до 37 и после небольшого локального максимума уменьшается до уровня 28-30 (это происходит на фоне значительного нарастания Ne); на завершающем этапе, с шестого шага, E_e незначительно варьируется (совпадает с зоной установления Ne).

Уменьшение П6 вызывает быстрый рост N^3_{6-} до 24 на третьем шаге, далее с четвертого шага эта величина устанавливается на 25, а на последнем шаге принимает максимальное значение 26 (рис.19а). Вначале Ne повышается до 21 на пятом шаге (при этом E_m падает), на шестом шаге Ne не меняется, а затем понижается до 3 в конце интервала искажения (сопровождается ростом E_m). На первом отрезке Ne$>N^3_{6-}$ (*плохая экстраполяция*), а со второго шага Ne$<N^3_{6-}$. Оценка E_w ведет себя немонотонно: к пятому шагу падает от 209 до 127, на следующем шаге подскакивает до 198, затем следует локальный минимум 180,

а далее нарастает до 204 к концу интервала искажения (рис.19в). Оценка E_e в целом повышается от начального значения 56 до 85 на последнем шаге, при этом совершает небольшие колебания, не опускаясь ниже 47.

Выполняется неравенство $N^3_{6-} > N^3_{6+}$ внутри [0,9] при большом различии этих величин. В каждом из двух указанных способов изменения П6 имеем: $\max\limits_{[0,9]} E_e < \min\limits_{[0,9]} E_w$, оценки адекватные.

Итак, в классе К3 при увеличении П6 на первой половине интервала искажения Nе быстро растет (при этом E_m падает), далее на двух отрезках не изменяется: Nе≡24 (участки локальной стабилизации Nе и E_m совпадают), и к последнему шагу увеличивается до 25 (с понижением E_m); за исключением последнего шага, Nе$> N^3_{6+}$ (*плохая экстраполяция*). При уменьшении П6 количество ошибок Nе изменяется немонотонно: сначала повышается до 21 (при этом E_m падает), затем понижается до 3 (сопровождается ростом E_m); на первом отрезке Nе$> N^3_{6-}$ (*плохая экстраполяция*), а со второго шага Nе$< N^3_{6-}$. Выполняется неравенство $N^3_{6-} > N^3_{6+}$ при большом различии этих величин. Оценки в обоих направлениях изменения П6 вполне адекватные, причем выполняется условие разделения диапазонов оценок.

Класс 4

Для класса К4 в обоих направлений изменения П6 величины N^4_{6-} и N^4_{6+} увеличиваются почти одинаково и с четвертого шага устанавливаются на максимальном значении |К4|=33, причем внутри отрезка [0,4] по оси абсцисс имеем: $N^4_{6-} < N^4_{6+}$ (рис.20а).

Повышение П6 приводит к возрастанию Nе (с отрезками локальной стабилизации) до 18 на последнем шаге, причем Nе$< N^4_{6+}$ (*хорошая экстраполяция*) на всем интервале модификации. Оценка E_m с первого шага совершает незначительные колебания на уровне 249-255 и только с седьмого шага начинает уменьшаться до 230 в конце (рис.20б). E_w на первом шаге резко нарастает и уже со второго шага стабилизируется на 255. Оценка E_e на первом шаге принимает значение 232, а затем приближается к максимуму и достигает 255 (нарушение *e-monotony*), совершает колебания вблизи него, а затем падает до 210 на последнем шаге.

При уменьшении П6 наблюдается стремительное нарастание Nе: на втором шаге Nе=33, причем внутри отрезка [0,4] по оси абсцисс имеем: N^4_{6-} <Nе (*плохая экстраполяция*). Оценка E_m ко второму шагу понижается стремительно, затем медленно, а с седьмого шага E_m≡0 (рис.20в). E_w резко падает на отрезке своего существования. Оценка E_e также от 43 на первом шаге монотонно уменьшается и с седьмого шага устанавливается на нулевом уровне. Оценки адекватные, причем выполняется неравенство: $\max\limits_{[1,9]} E_e < \min\limits_{[0,1]} E_w$.

Итак, для класса К4 в обоих направлениях изменения П6 N^4_{6-} и N^4_{6+} увеличиваются почти одинаково и на четвертом шаге достигают максимального

значения |К4|=33, причем $N^4_{6-} < N^4_{6+}$. При повышении П6 Ne медленно возрастает до 18 на последнем шаге, причем Ne< N^4_{6+} (*хорошая экстраполяция*) везде; E_m совершает незначительные колебания вблизи 255 и только в конце уменьшается до 230. E_e достигает максимума 255 (нарушение *e-monotony*), оценки не адекватны. При понижении П6 уже на втором шаге Ne=33, причем N^4_{6-}<Ne (*плохая экстраполяция*). Оценки адекватные, выполняется условие разделения диапазонов оценок.

Заключение

Имеются две основные составляющие в развитии современной цифровой медицины. В первую входят мероприятия, относящиеся к организационным вопросам. Их перечень в целом понятен, а в самой разработке научно-исследовательская компонента отсутствует. Высокий уровень информатизации здесь уже достигнут.

Совершенно иная ситуация со второй составляющей – компьютеризацией лечебного процесса. Очертить круг проблем здесь достаточно трудно. К сожалению, до сих пор медики и специалисты по математическому моделированию говорят, по сути, на разных языках, им трудно понять друг друга. Сложность заключается в том, что медики зачастую не могут даже сформулировать задачи для исследователей-математиков, и последним приходится брать инициативу на себя.

В этой связи разработанный авторами классификатор состояний систем организма по параметрам периферической крови является одной из «первых ласточек» успешного создания подобного языка общения.

На основе обширного опыта медиков сформированы базы данных, которые перерабатываются с использованием статистического метода. В итоге этот подход позволяет с большой точностью осуществлять предварительную диагностику. Результаты получены при рассмотрении ключевой проблемы в лечебном процессе, что говорит о высокой значимости данной разработки.

Однако в теории и практике распознавания имеются свои проблемы. Подходы к решению одной из них изложены в настоящей работе. Отметим немаловажный момент, что уникальные базы показателей крови являются достаточно редким предметом рассмотрения для подобных публикаций. При необходимости можно аналогичным образом проанализировать множества иной природы.

Предложена оригинальная методика и разработана математическая модель численного исследования экстраполяционных способностей метода распознавания. Введены новые понятия, позволяющие проследить за динамикой качества распознавания объектов, представляющих собой заданную модификацию элементов обучающего множества при увеличении различия между исходными и полученными векторными величинами.

Данная методика реализована на примере статистического классификатора, основанного на полиномиальной регрессии и имеющего вероятностные оценки. Классификатор предназначен для оценивания по четырехбалльной шкале состояния СО у женщин и мужчин на основании данных анализа периферической крови (из пальца), включающего восемь независимых признаков. Рассмотрена пищеварительная система для мужчин.

Исследования проводились отдельно по каждому используемому признаку. Представлены диапазоны их изменения для четырех классов здоровья: $D_b^c \equiv [l_b^c, r_b^c], 1 \le c \le 4, 1 \le b \le 8$, а также соответствующий отрезок по совокупности классов ($D_b \equiv \bigcup_{1 \le c \le 4} D_b^c \equiv [l_b, r_b]$). При нумерации классов используется символ $c, 1 \le c \le 4$, а признаки перенумерованы посредством символа $b, 1 \le b \le 8$. Поскольку для класса здоровых людей значения трех признаков являются константами, эти случаи являются вырожденными и пока в данной работе не описывались.

Пять оставшихся признаков суть RBC [L^{-1}] – эритроциты, HGB [gL^{-1}] – гемоглобин, PLT [L^{-1}] – тромбоциты, WBC [L^{-1}] – лейкоциты, LIMPH [%] – лимфоциты.

Шаг модификации данного признака считали равным десятой доле длины отрезка $D_b \equiv [l_b, r_b]$.

Введены новые величины, а именно, число модифицированных элементов, у которых значение фиксированного признака вышло за границы отрезка, определяемого номером класса и признака ($D_b^c \equiv [l_b^c, r_b^c]$), а именно, за правый его конец (число элементов N_{b+}^c) при увеличении признака или за левый (N_{b-}^c) при его уменьшении. Также проанализировано, как изменяется количество ошибок распознавания Ne.

Экстраполяционные свойства метода определены следующим образом. Если на каком-то этапе модификации признака выполнялось: $N\text{e} < N_{b+}^c$ ($N\text{e} < N_{b-}^c$), то это считали признаком *хорошей экстраполяции*; напротив, при выполнении $N\text{e} > N_{b+}^c$ ($N\text{e} > N_{b-}^c$) *экстраполяция плохая*. Равенство соответствующих величин означает среднее качество.

Понятно, что это деление условное, однако оно позволило формализовать интуитивное представление об экстраполяционных свойствах классификатора и с использованием Ne, N_{b+}^c и N_{b-}^c описать динамику искажений. Кроме того, на основе предложенных к рассмотрению величин нетрудно ввести иные числовые характеристики экстраполяционных свойств метода.

Представляет большой интерес поведение оценки при предложенной модификации. Проблема заключается в том, какие именно величины следует использовать. Выбор должен основываться на их информативности.

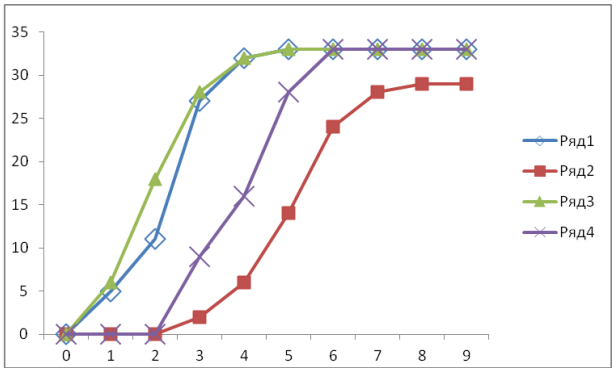
В нашем исследовании в качестве таковых использовались оценка центра масс E_{m}, а также средние оценки правильного и неправильного распознавания (E_{w}, E_{e}).

Следует отметить большую вариативность полученных решений для разных классов при рассмотрении одного признака, а для всего набора комбинаций класс&признак она еще выше. Было показано, что для класса К1 (здоровые) на начальных шагах обоих способов модификации каждого из признаков наблюдается устойчивое безошибочное распознавание – в этой зоне нет проблем ни с экстраполяцией, ни с оценками.

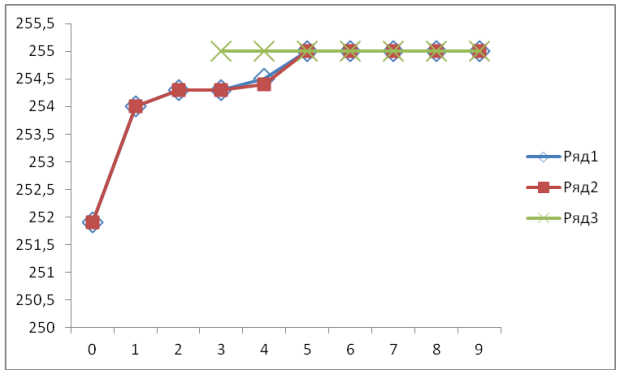
Динамика оценки центра масс E_{m} более гладкая, чем оценки правильного и соответственно неправильного распознавания (E_{w}, E_{e}). Объяснение заключается в том, что набор объектов в первом случае (E_{m}) фиксированный, меняется только значение одного признака, причем постепенно. Гладкость E_{m} свидетельствует о непрерывности функции оценки. Совокупность объектов при вычислении оценок правильного и неправильного распознавания меняется скачкообразно (причем это происходит синхронно, элементы переходят из нераспознанных в распознанные или наоборот), отсюда следует нарушение гладкости E_{w} и E_{e}.

Отображенное на рисунках поведение N_{b+}^{c}, N_{b-}^{c}, Ne, E_{w}, E_{e} и E_{m} не является абсолютно хаотичным, напротив, имеются определенные закономерности в динамике этих величин. Описаны отмеченные корелляционные зависимости в динамике с одной стороны N_{b+}^{c}, N_{b-}^{c} и Ne, а с другой – E_{w} и E_{e}. Еще более очевидной является связь между Ne и E_{m}, проявляющаяся в рассмотренных сочетаниях класс&признак.

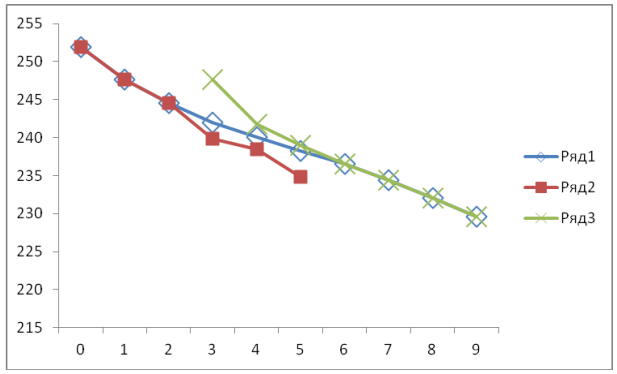
В настоящем исследовании приведены данные об ухудшении и нарушении свойств оценок (например, *e-monotony*) на основе представленных средних величин. В реальных ситуациях целесообразно выполнить анализ более детально по всем ошибочным оценкам.



а) П1+:(N^1_{1+} -*N*e), П1-:(N^1_{1-} -*N*e)

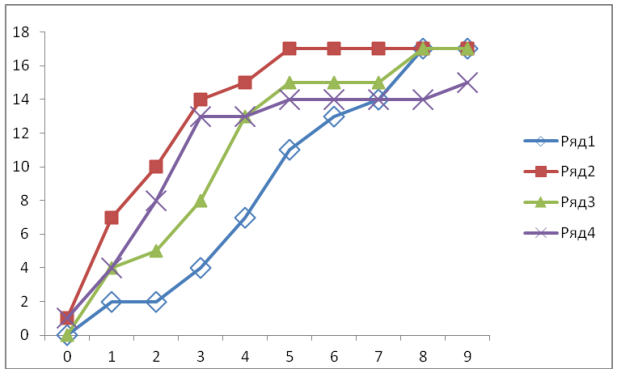


б) П1+:(E_m, E_w, E_e)

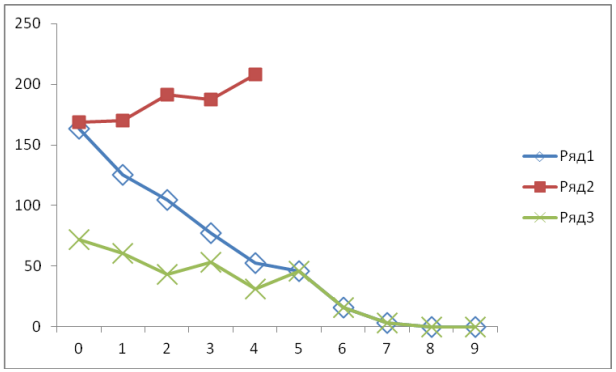


в) П1-:(E_m, E_w, E_e)

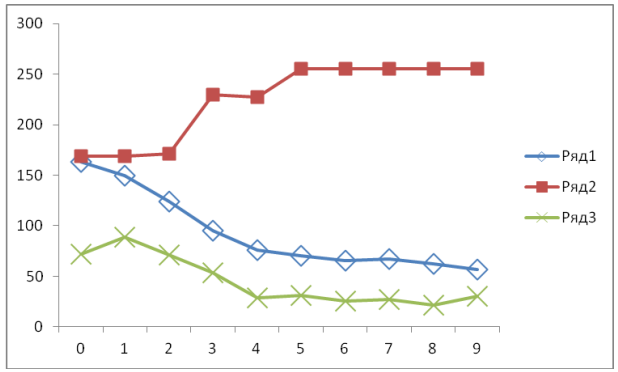
Рис. 1. Признак 1, класс 1



а) П1+:(N^2_{1+} -*N*e), П1-:(N^2_{1-} -*N*e)

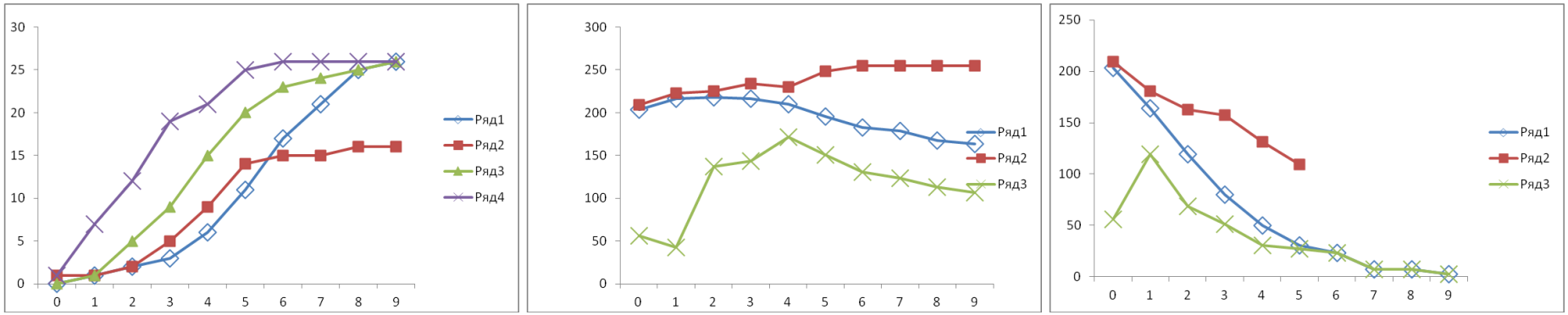


б) П1+:(E_m, E_w, E_e)



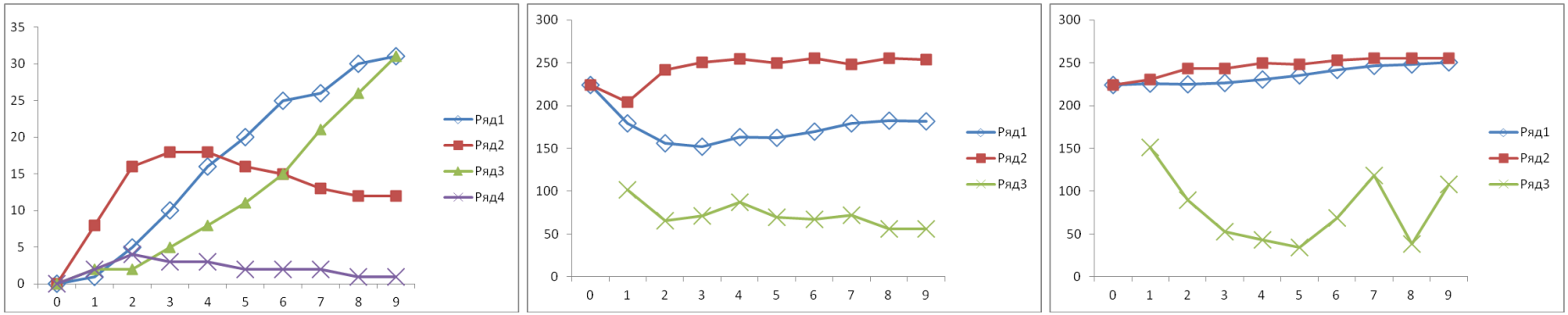
в) П1-:(E_m, E_w, E_e)

Рис. 2. Признак 1, класс 2



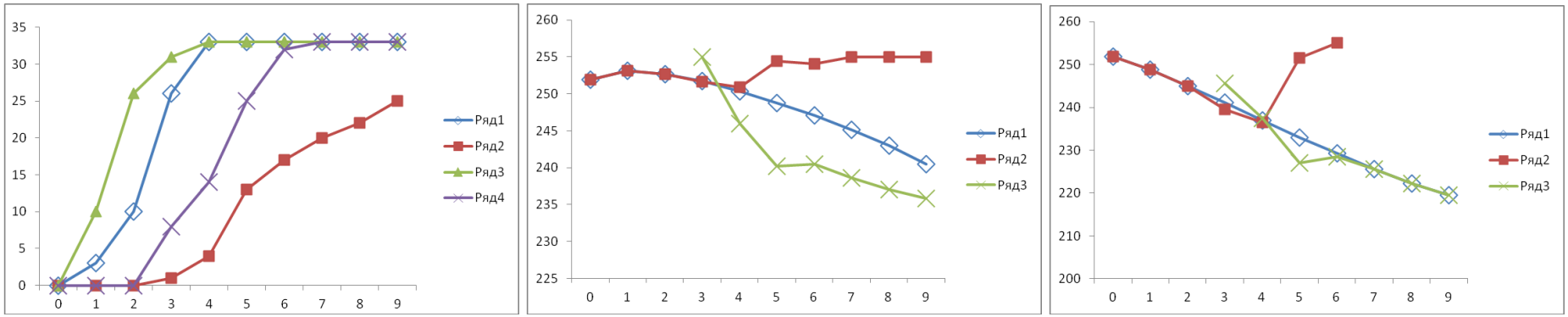
а) П1+:(N^3_{1+}-*N*e), П1-:(N^3_{1-}-*N*e) *б)* П1+:(E_m, E_w, E_e) *в)* П1-:(E_m, E_w, E_e)

Рис. 3. Признак 1, класс 3



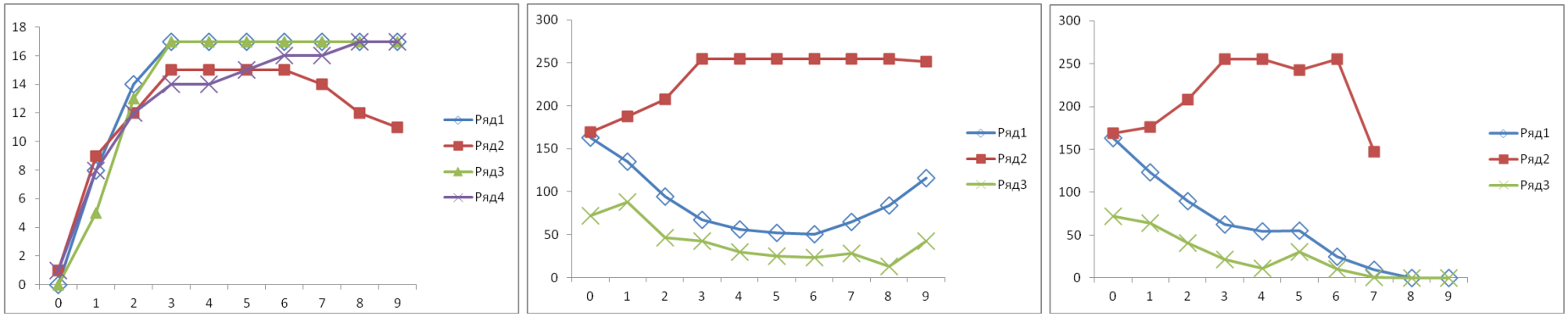
а) П1+:(N^4_{1+}-*N*e), П1-:(N^4_{1-}-*N*e) *б)* П1+:(E_m, E_w, E_e) *в)* П1-:(E_m, E_w, E_e)

Рис. 4. Признак 1, класс 4



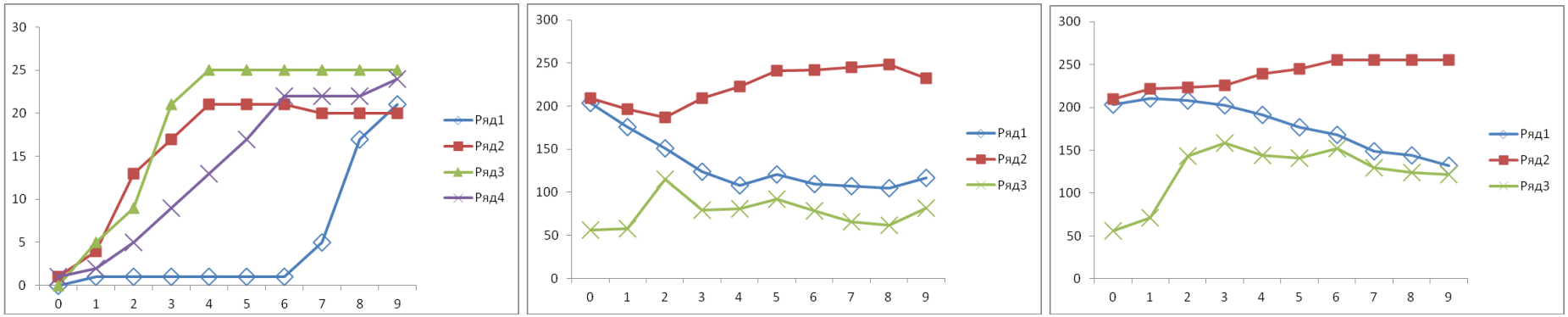
а) П2+:(N^1_{2+} -*N*e), П2-:(N^1_{2-} -*N*e) *б)* П2+:(E_m, E_w, E_e) *в)* П2-:(E_m, E_w, E_e)

Рис. 5. Признак 2, класс 1



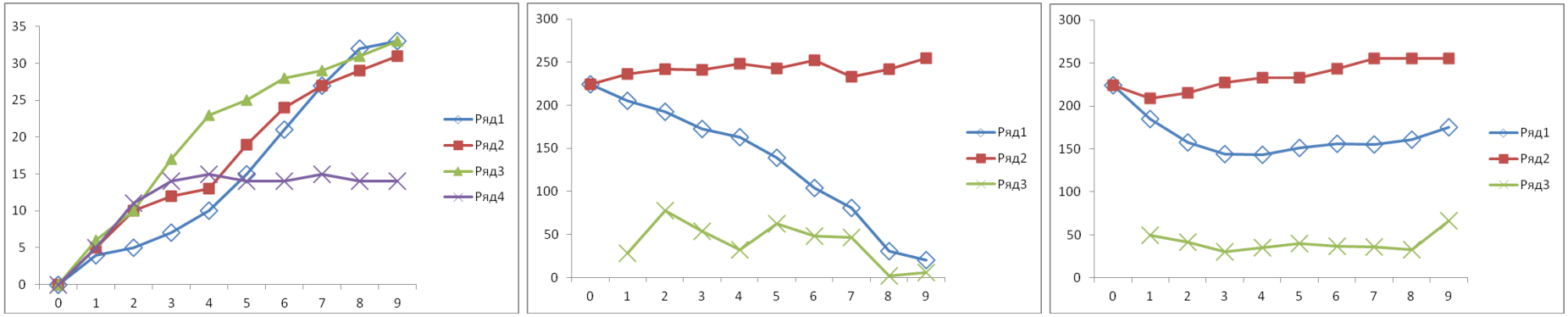
а) П2+:(N^2_{2+} -*N*e), П2-:(N^2_{2-} -*N*e) *б)* П2+:(E_m, E_w, E_e) *в)* П2-:(E_m, E_w, E_e)

Рис. 6. Признак 2, класс 2



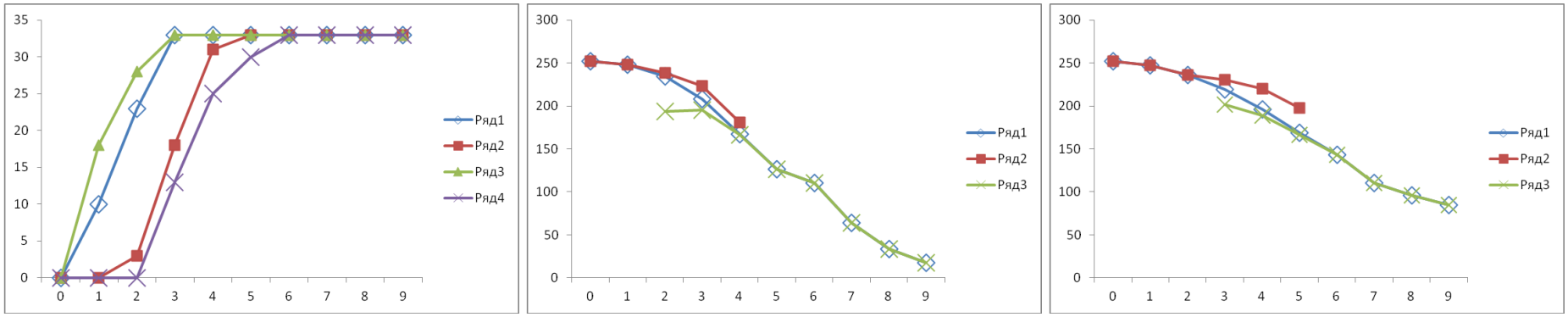
а) П2+:(N^3_{2+} -*N*e), П2-:(N^3_{2-} -*N*e) *б)* П2+:(E_m, E_w, E_e) *в)* П2-:(E_m, E_w, E_e)

Рис. 7. Признак 2, класс 3



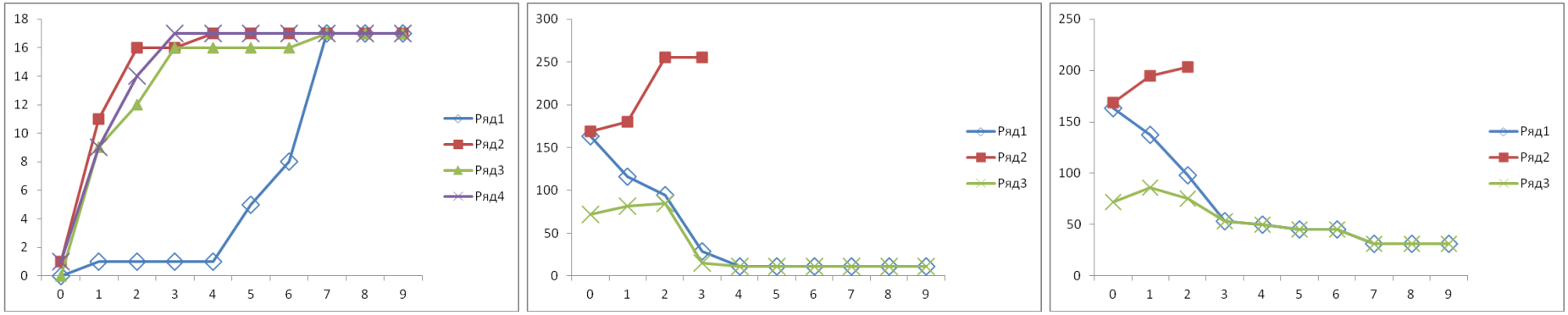
а) П2+:(N^4_{2+} -*N*e), П2-:(N^4_{2-} -*N*e) *б)* П2+:(E_m, E_w, E_e) *в)* П2-:(E_m, E_w, E_e)

Рис. 8. Признак 2, класс 4



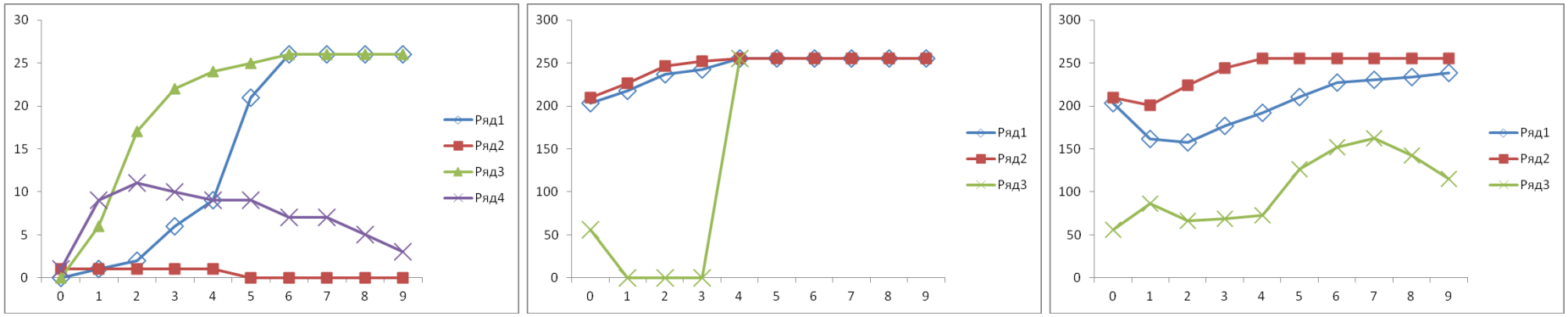
а) ПЗ+:(N^1_{3+} -*N*e), ПЗ+:(N^1_{3-} -*N*e) *б)* ПЗ+:(E_m, E_w, E_e) *в)* ПЗ-:(E_m, E_w, E_e)

Рис. 9. Признак 3, класс 1



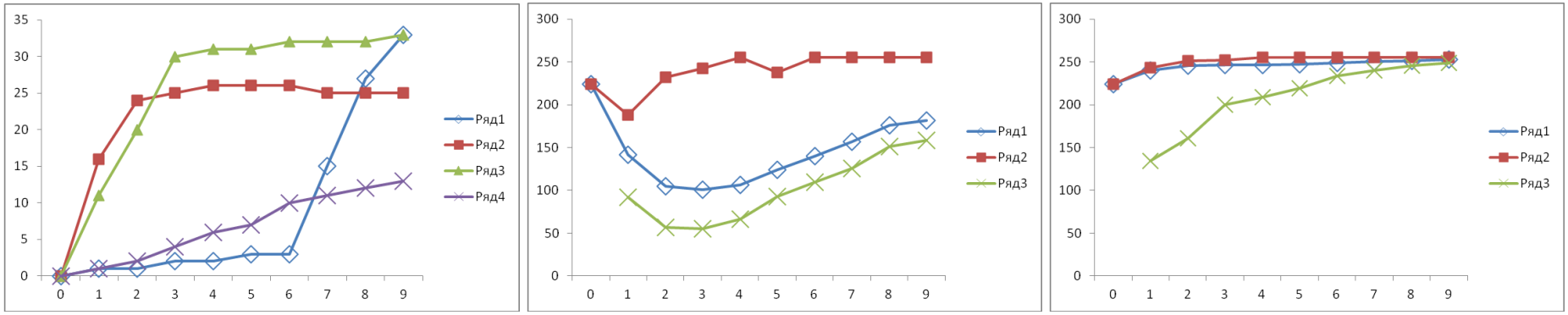
а) ПЗ+:(N^2_{3+} -*N*e), ПЗ+:(N^2_{3-} -*N*e) *б)* ПЗ+:(E_m, E_w, E_e) *в)* ПЗ-:(E_m, E_w, E_e)

Рис. 10. Признак 3, класс 2



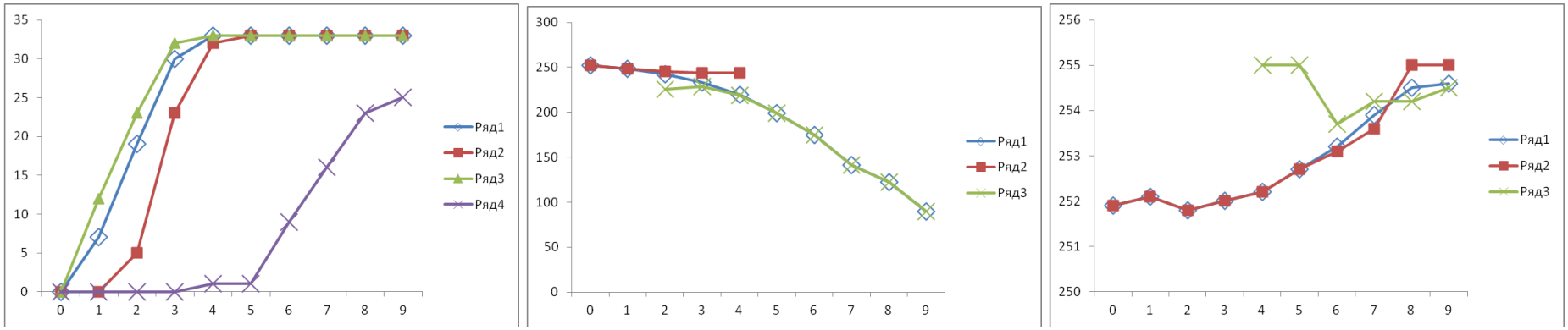
а) ПЗ+:(N^3_{3+} -*N*e), ПЗ+:(N^3_{3-} -*N*e) *б)* ПЗ+:(E_m, E_w, E_e) *в)* ПЗ-:(E_m, E_w, E_e)

Рис. 11. Признак 3, класс 3



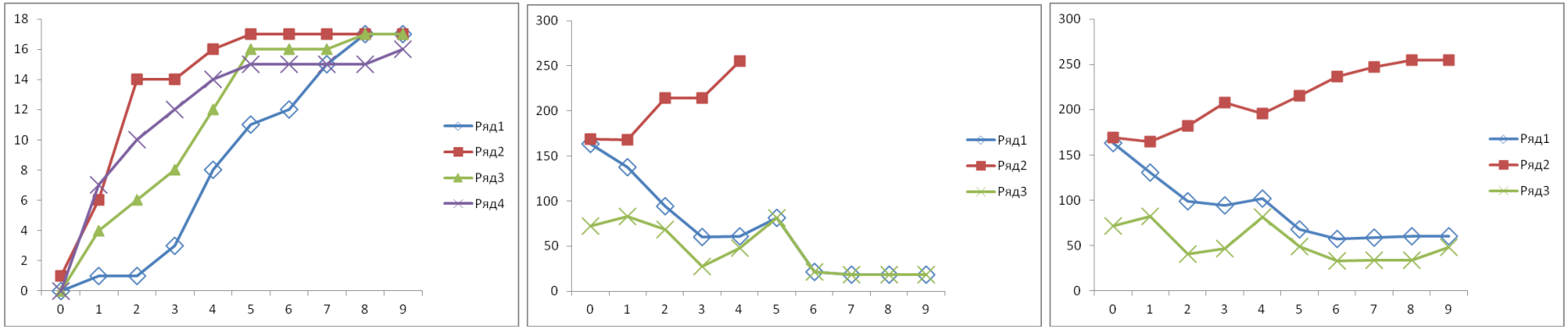
а) ПЗ+:(N^4_{3+} -*N*e), ПЗ+:(N^4_{3-} -*N*e) *б)* ПЗ+:(E_m, E_w, E_e) *в)* ПЗ-:(E_m, E_w, E_e)

Рис. 12. Признак 3, класс 4



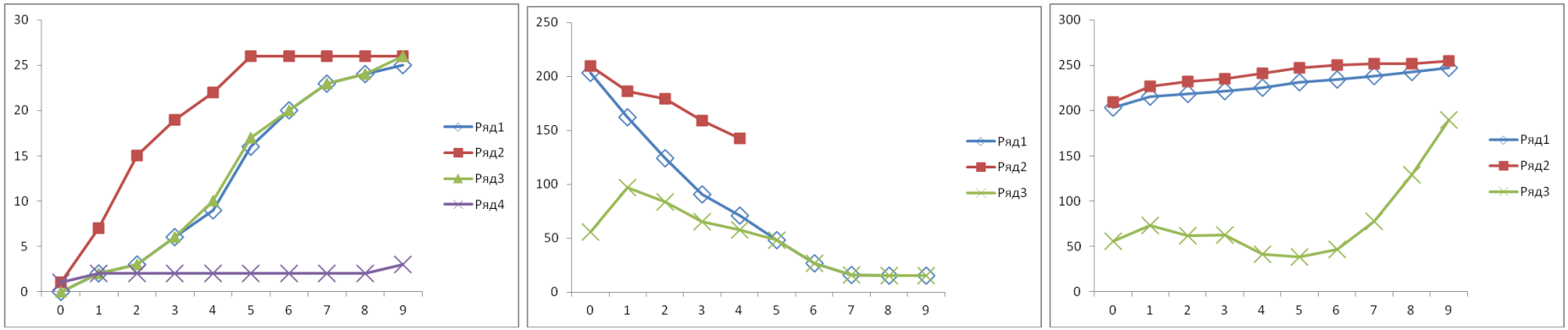
а) П4+:(N^1_{4+} -*N*e), П4+:(N^1_{4-} -*N*e) *б)* П4+:(E_m, E_w, E_e) *в)* П4-:(E_m, E_w, E_e)

Рис. 13. Признак 4, класс 1



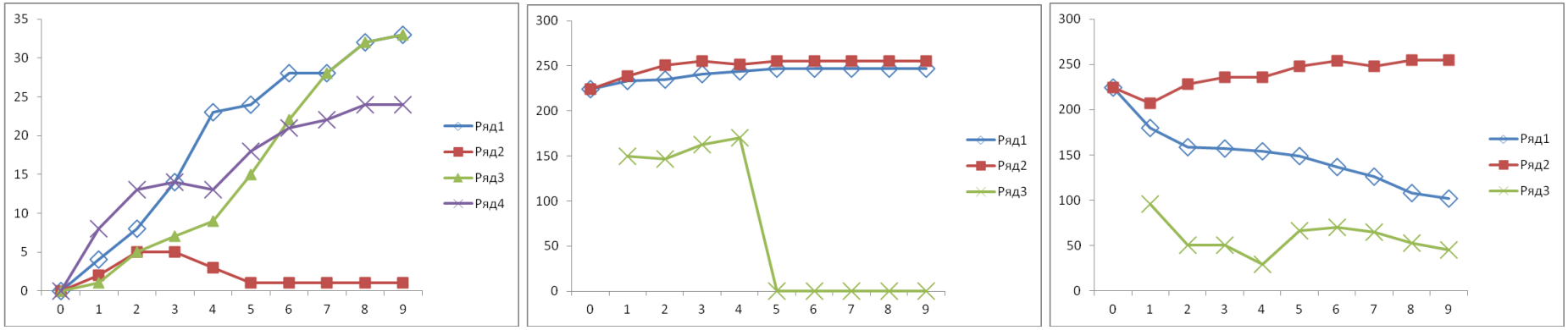
а) П4+:(N^2_{4+} -*N*e), П4+:(N^2_{4-} -*N*e) *б)* П4+:(E_m, E_w, E_e) *в)* П4-:(E_m, E_w, E_e)

Рис. 14. Признак 4, класс 2



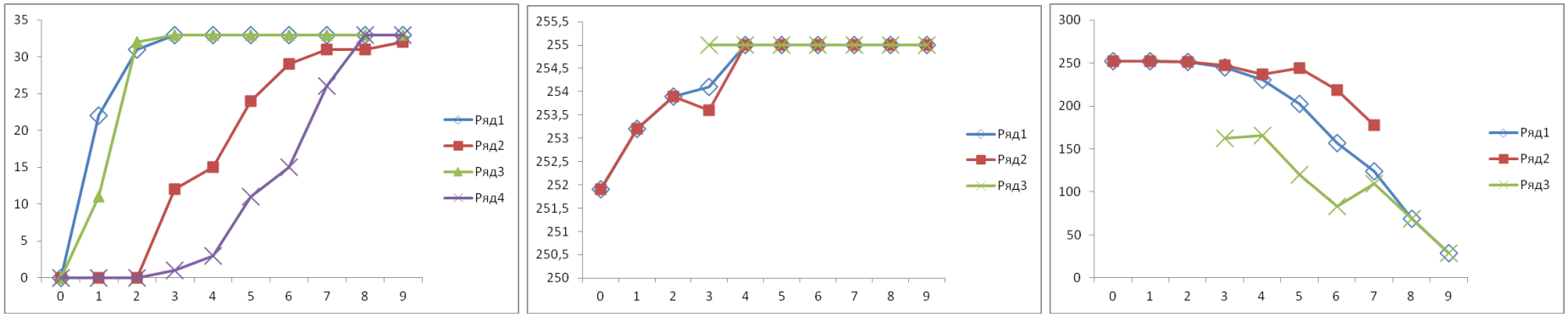
а) П4+:(N^3_{4+} -*N*e), П4+:(N^3_{4-} -*N*e) *б)* П4+:(E_m, E_w, E_e) *в)* П4-:(E_m, E_w, E_e)

Рис. 15. Признак 4, класс 3



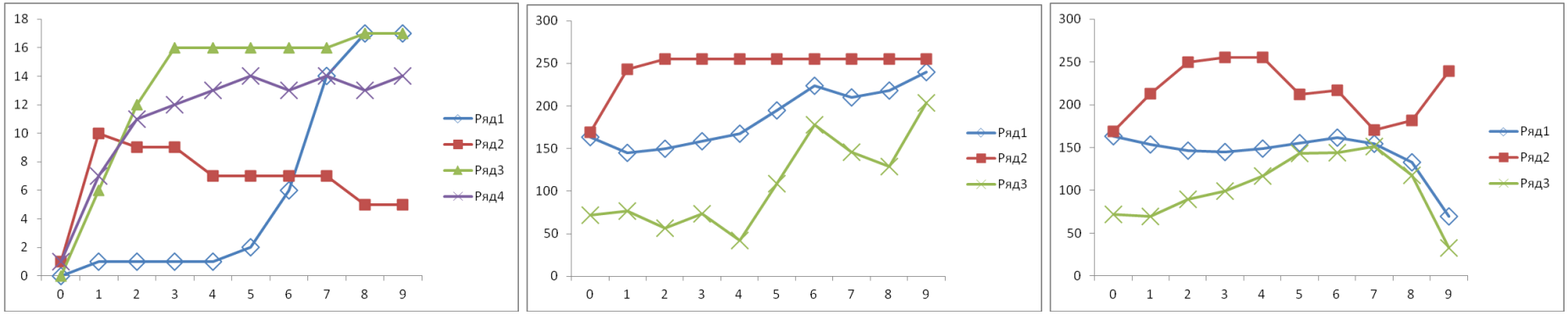
а) П4+:(N^4_{4+} -*N*e), П4+:(N^4_{4-} -*N*e) *б)* П4+:(E_m, E_w, E_e) *в)* П4-:(E_m, E_w, E_e)

Рис. 16. Признак 4, класс 4



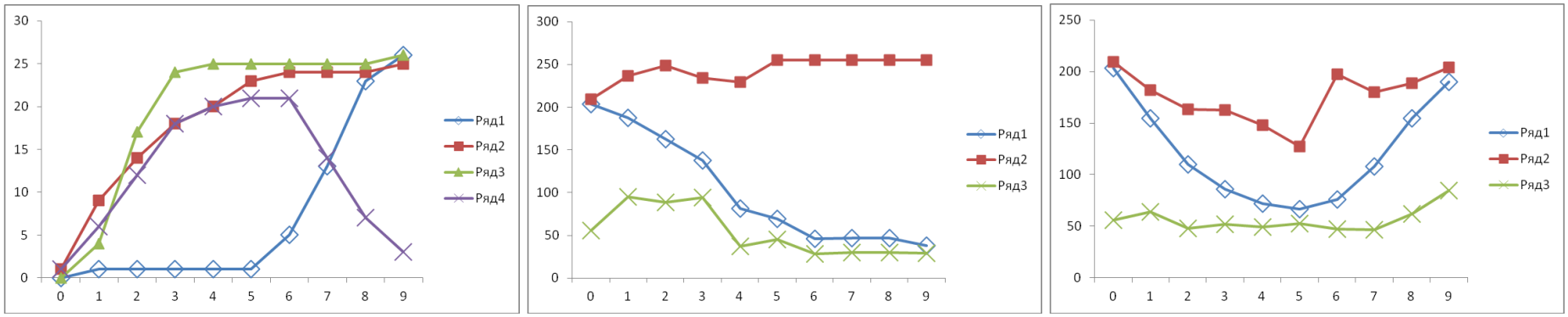
а) П6+:(N^1_{6+} -*N*e), П6+:(N^1_{6-} -*N*e) *б)* П6+:(E_m, E_w, E_e) *в)* П6-:(E_m, E_w, E_e)

Рис. 17. Признак 6, класс 1



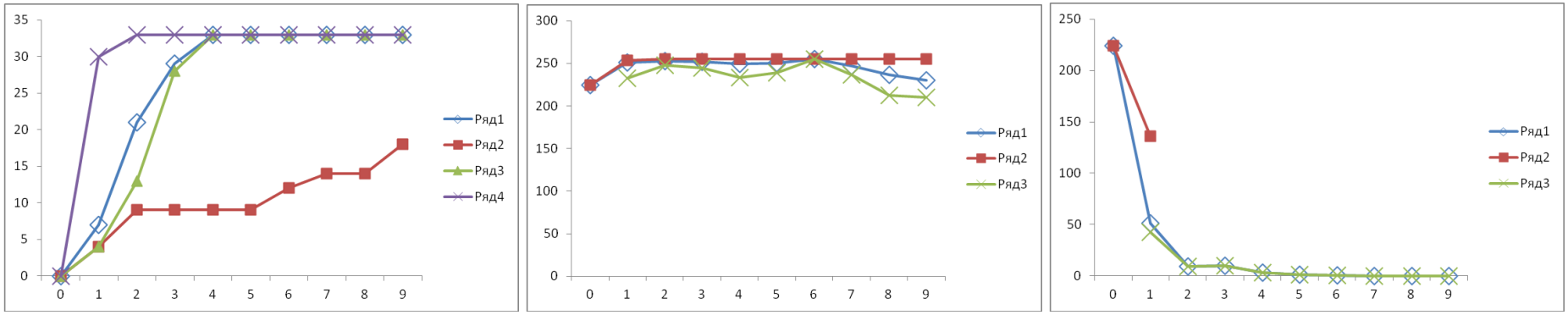
а) П6+:(N^2_{6+} -*N*e), П6+:(N^2_{6-} -*N*e) *б)* П6+:(E_m, E_w, E_e) *в)* П6-:(E_m, E_w, E_e)

Рис. 18. Признак 6, класс 2



а) П6+:(N^3_{6+} -*N*e), П6+:(N^3_{6-} -*N*e) *б)* П6+:(E_m, E_w, E_e) *в)* П6-:(E_m, E_w, E_e)

Рис. 19. Признак 6, класс 3



а) П6+:(N^4_{6+} -*N*e), П6+:(N^4_{6-} -*N*e) *б)* П6+:(E_m, E_w, E_e) *в)* П6-:(E_m, E_w, E_e)

Рис. 20. Признак 6, класс 4

Библиографический список

1. Количественная оценка гомеостатической активности здоровых и больных людей / Ставицкий Р.В. [и др.]. М.: ГАРТ. 2013. 131 с.

2. Гавриков Б.М., Пестрякова Н.В. О построении признакового пространства в задаче обучения // Информационные технологии и вычислительные системы. 2018. №1. С. 22-29.

3. Гавриков Б.М., Гавриков М.Б., Пестрякова Н.В. Структура базы обучения статистического классификатора состояний систем организма человека // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 255. 40 с.

4. Об одном методе распознавания символов, основанном на полиномиальной регрессии / М. Б. Гавриков [и др.] // Автоматика и Телемеханика. 2006. №2. С. 119-134.

5. Пестрякова Н.В. Метод распознавания символов, основанный на полиномиальной регрессии. М.: УРСС. 2011. 141 с.

6. Гавриков М.Б., Локуциевский О.В. Начала численного анализа. — М.: Янус, 1995.

7. Schürmann J. Pattern Classification. — New York: John Wiley&Sons, Inc., 1996.