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

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

О свойствах классификатора
при значительных
отклонениях параметров
крови от нормы

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Гавриков Б. М., Гавриков М.Б., Пестрякова Н.В. О свойствах классификатора при значительных отклонениях параметров крови от нормы // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2021. № 31. 27 с.
<https://doi.org/10.20948/prepr-2021-31>
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2021-31>

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

**О свойствах классификатора
при значительных отклонениях
параметров крови от нормы**

Москва — 2021

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

О свойствах классификатора при значительных отклонениях параметров крови от нормы

Описана и реализована математическая модель, предназначенная для численного исследования способности статистического метода классификации к интерполяции и экстраполяции. Разработанный авторами классификатор основан на полиномиально-регрессионном подходе и имеет вероятностные оценки. Он используется для оценивания состояния здоровья человека по параметрам лабораторного анализа периферической крови. Рассматривается база крови при значительном отклонении от нормы.

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

Boris Mikhailovich Gavrikov, Mikhail Borisovich Gavrikov, Nadejda Vladimirovna Pestryakova

On the properties of the classifier in case of significant deviations of blood parameters from the norm

A mathematical model is described and implemented, intended for the numerical study of the ability of the statistical classification method to interpolate and extrapolate. The classifier developed by the authors is based on the polynomial-regression approach and has probabilistic estimates. It is used to assess the state of human health based on the parameters of laboratory analysis of peripheral blood. The blood base is considered with a significant deviation from the norm.

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

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты 18-29-26008, 18-29-26009.

Оглавление

Введение	3
Метод классификации.....	3
Численное моделирование искажений.....	5
Эритроциты RBC[L ⁻¹].....	7
Тромбоциты PLT[L ⁻¹]	9
Лейкоциты WBC[L ⁻¹]	11
Гемоглобин HGB[gL ⁻¹].....	12
Лимфоциты LYMPH[L ⁻¹]	13
Лимфоциты LIMP [%]	15
Гранулоциты GRAN [L ⁻¹]	16
Гранулоциты GRAN [%].....	18
Заключение.....	19
Библиографический список.....	21

Введение

Исследование интерполяционных и экстраполяционных свойств метода распознавания или классификации является актуальной проблемой. Заметим, что объем используемых для обучения выборок ограничен, а математически обоснованные требования к их структуре не разработаны, поэтому при решении практических задач представляется разумным проводить специальный анализ возможностей классификатора к обобщению, поскольку поступающие на его вход реальные объекты в общем случае отличаются от элементов исходных обучающих множеств.

В настоящей работе описана и реализована математическая модель, предназначенная для численного исследования способности метода классификации к интерполяции и экстраполяции. С этой целью проводится анализ динамики характеристик распознавания элементов множеств, первоначально использовавшихся для обучения метода, в процессе их постепенно нарастающего изменения.

Объектом изучения является статистический классификатор [1], используемый для оценивания состояния здоровья человека (СЗЧ) по результатам лабораторного анализа периферической крови. Он основан на полиномиально-регрессионном подходе и имеет вероятностные оценки. В качестве обучающего множества рассматривается совокупность наборов из восьми показателей крови, относящихся к одному из классов состояния некоторой системы организма (СО) человека. Исследовалось изменение каждого из этих параметров крови.

В [2-4] вводится понятие экстраполяционных свойств метода, но по ряду аспектов говорится об искажении в целом, то есть интерполяция и экстраполяция объединены. Здесь предлагается и применяется способ описания каждого из этих свойств по отдельности. Новый подход, в сравнении с использовавшимся ранее, позволяет получить более детальное представление о возможностях рассмотренного классификатора.

Метод классификации

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

Рассматриваем определенную СО человека. 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 классов

СЗЧ с базисным вектором $\mathbf{e}_k=(0\dots 1\dots 0)$ (здесь 1 находится на k -м месте, $1\leq k\leq K$, причем $K=4$) из $\mathbf{R}^K$. Обозначаем $Y=\{\mathbf{e}_1,\dots,\mathbf{e}_K\}$.

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

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

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

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

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

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

Тогда (2) можно записать в векторном виде:

$$\mathbf{p}(\mathbf{v}) = (p_1(\mathbf{v}), \dots, p_K(\mathbf{v}))^T \cong A^T \mathbf{x}(\mathbf{v}), \quad (3)$$

где A – матрица размера $L \times K$, столбцами которой являются векторы $\mathbf{a}^{(1)}, \dots, \mathbf{a}^{(K)}$. 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: $[\mathbf{v}^{(1)}, \mathbf{y}^{(1)}], \dots, [\mathbf{v}^{(J)}, \mathbf{y}^{(J)}]$. Здесь $\mathbf{v}^{(j)}$ – набор параметров крови, соответствующий элементу СЗЧ с номером k ($1\leq k\leq K$), $\mathbf{y}^{(j)} = (0\dots 1\dots 0)$ – его базисный вектор, где 1 стоит на k -м месте, $1\leq j\leq J$):

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

Поскольку проблема обращения заполненной матрицы большой размерности до сих пор не решена [5], правую часть (4) получаем посредством рекуррентной процедуры [6].

В данной работе рассмотрена пищеварительная система для мужчин. В этом случае использовались модификации вектора $\mathbf{x}(\mathbf{v})$ следующего вида:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} = & (1, \{v_i\}, \{v_i v_j\}, \{v_i v_j v_k\}, \{v_i v_j v_k v_l\}), \\ & 1 \leq i \leq 8, i \leq j \leq 8, j \leq k \leq 8, k \leq l \leq 8. \end{aligned} \quad (5)$$

В (5) выражения в фигурных скобках соответствуют цепочкам элементов вектора, вычисляемым по всем показателям крови из имеющегося набора. Длина полинома 495. Имеются мономы первого, второго, третьего и четвертого порядка. Перекрестные произведения используются для мономов второго, третьего и четвертого порядка.

Обучающее множество рассматриваемой СО имеет 109 элементов: классы здоровья K^1 и K^4 содержат по 33 набора крови, а классы K^2 и K^3 включают соответственно 17 и 26 элементов.

Обученный классификатор обеспечил 99,2% правильной классификации на обучающем множестве; имеется по одной ошибке на элементах K^2 и K^3 .

Численное моделирование искажений

Ниже при нумерации классов K^1, K^2, K^3, K^4 используется символ $c, 1 \leq c \leq 4$, а число элементов в них обозначено $|K^1|, |K^2|, |K^3|, |K^4|$. Признаки $P_1, \dots, P_8$ перенумерованы посредством символа $b, 1 \leq b \leq 8$.

В таблице 1 для K^1, K^2, K^3, K^4 приведены диапазоны, которым принадлежат используемые первичные признаки $P_1, \dots, P_8$ ($D_b^c \equiv [l_b^c, r_b^c], 1 \leq c \leq 4, 1 \leq b \leq 8$). Также для каждого признака указан соответствующий отрезок по совокупности четырех классов ($D_b \equiv \bigcup_{1 \leq c \leq 4} D_b^c \equiv [l_b, r_b]$). Особенность K^1 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

$$v_{b0} \rightarrow v_{b0} \pm h_{b0} \cdot t, h_{b0} = (r_{b0} - l_{b0})/10, t=1, \dots, 9. \quad (6)$$

Опишем, что происходит с элементами обучающего множества в процессе усиления искажения. Изначально имеется только по одной ошибке во втором классе и третьем классах. С нарастанием t часть элементов выходят за правую или левую границы отрезка D_{b0}^{c0} , в зависимости от увеличения признака (знак «+» в (6)) или его уменьшения (знак «-» в (6)).

Элементы называем внутренними (*in*), если при модификации рассматриваемый признак не покинул рамки соответствующего ему диапазона (табл.1); в противном случае объекты считаются внешними (*ex*).

Кроме того, при модификации может становиться противоположным статус элементов в отношении правильности классификации.

На рисунках с литерой «а» показано, как изменяется ряд параметров при увеличении (уменьшении) фиксированного признака $P_1, \dots, P_8$. Здесь N^{in} (Ряд 8) – число внутренних элементов, среди которых распознано правильно – N_w^{in} (Ряд 6), неправильно – N_e^{in} (Ряд 3), причем $N^{in} = N_w^{in} + N_e^{in}$; эти величины характеризуют интерполяцию. Количество внешних элементов – N^{ex} (Ряд 1), из них распознано правильно – N_w^{ex} (Ряд 7), неправильно – N_e^{ex} (Ряд 4), причем $N^{ex} = N_w^{ex} + N_e^{ex}$; это характеристики экстраполяции. Кроме того, изображена динамика определяемого совместно экстраполяцией и интерполяцией количества распознаваний: ошибочных – $N_e = N_e^{in} + N_e^{ex}$ (Ряд 2), правильных – $N_w = N_w^{in} + N_w^{ex}$ (Ряд 5), причем $N_e + N_w = |K^c|$, $N^{in} + N^{ex} = |K^c|$.

Интервал интерполяции (экстраполяции) определяется выполнением условия $N^{in} > 0$ ($N^{ex} > 0$).

Будем оценивать *интерполяционные (экстраполяционные) свойства* метода следующим образом. Если на каком-то интервале изменения t имеем: $N_e^{in} < N_w^{in}$ ($N_e^{ex} < N_w^{ex}$), то считаем это признаком *хорошей интерполяции (экстраполяции)*; напротив, при выполнении $N_e^{in} > N_w^{in}$ ($N_e^{ex} > N_w^{ex}$) *интерполяция (экстраполяция) плохая*. Равенство соответствующих величин означает *посредственное* качество. Для получения количественных характеристик имеет значение соотношение величин в левой и правой частях приведенных неравенств.

Отметим некоторую условность данных здесь определений способности метода к интерполяции и экстраполяции. Мы имеем дело с многомерным пространством векторов. Интерполяция соответствует распознаванию векторов внутри границ обучающего множества конкретного класса, а экстраполяция – вне этих границ. Мы предлагаем упрощенный подход и рассматриваем в качестве такой границы многомерный параллелепипед, определяемый диапазонами каждого из признаков для рассматриваемого класса (табл.1).

Заметим, что на практике медики руководствуются именно таким способом при выявлении отклонений показателей крови от диапазонов, характерных для практического здорового человека.

Устойчивость метода к искажению определяется наличием и протяженностью интервала, на котором $N_e < N^{ex}$. Количественные характеристики могут быть вычислены с использованием величин в левой и правой частях данного неравенства. С тем чтобы обеспечить преемственность в проведенных нами исследованиях, заметим, что в предыдущих работах [2-4] для обозначения этого понятия использовали термин «хорошая экстраполяция», поскольку еще не было выполнено разделение интерполяции и экстраполяции.

Рисунки с литерой «б» демонстрируют динамику оценок при росте (падении) значения одного из признаков $\Pi_1, \dots, \Pi_8$.

Для описанных типов элементов установим соответствие между обозначениями их количества и оценок. Если элементы отнесены к рассматриваемому классу (правильная классификация), то вычисляется математическое ожидание их оценок, причем N_w соответствует E_w (Ряд 2 на рисунках с литерой «б»), $N_w^{in} - E_w^{in}$ (Ряд 5), $N_w^{ex} - E_w^{ex}$ (Ряд 8). Если модифицированные объекты отошли к другим классам (неправильная классификация), то вычисляется математическое ожидание оценок **альтернативы, соответствующей рассматриваемому классу**, причем N_e соответствует E_e (Ряд 3), $N_e^{in} - E_e^{in}$ (Ряд 6), $N_e^{ex} - E_e^{ex}$ (Ряд 9). Если рассматриваются элементы вне зависимости от правильности распознавания, то с учетом сказанного, всем $|K^c|$ элементам соответствует E (Ряд 1), $N^{in} - E^{in}$ (Ряд 4), $N^{ex} - E^{ex}$ (Ряд 7).

Выполнение условий $E_e^{in}=255$ или $E_e^{ex}=255$ соответствует фатальному нарушению оценок. Если на всем интервале изменения t выполняется $\min_{0 \leq t \leq 9} E_w \leq \max_{0 \leq t \leq 9} E_e$, где в качестве E_w может фигурировать как E_w^{in} , так и E_w^{ex} , а E_e соответствует E_e^{in} или E_e^{ex} , то разделение оценок по диапазонам отсутствует. Уменьшение величины $(E_w - E_e)$ говорит об ухудшении разделения оценок.

Ниже ограничимся рассмотрением третьего класса ($c_0=3$), соответствующего значительным отклонениям здоровья от нормы.

Эритроциты RBC[L⁻¹]

При увеличении Π_1 интерполяция существует до восьмого шага интервала искажения. Число внутренних элементов N^{in} (Ряд 8) падает до предпоследнего шага интерполяции медленнее, чем количество безошибочных распознаваний среди них N_w^{in} (Ряд 6), изменяющееся с высоким темпом вначале и несколько затормаживающееся к концу (рис. 1а). Соответственно

$N_e^{in} - N_w^{in} = N_e^{in}$ (Ряд 3) растет до 10 на пятом шаге и начинает опускаться до $N_e^{in} = 0$ на восьмом шаге, при выполнении $N_e^{in} < N_w^{in}$. Противоположно изменению отношения N_e^{in} / N_w^{in} , E_e^{in} (Ряд 4) сначала в целом уменьшается (рис. 1б), а с шестого шага начинает увеличиваться и достигает максимума 255. E_e^{in} (Ряд 6) растет и падает синхронно с N_e^{in} . E_w^{in} (Ряд 5) поднимается и с пятого шага устанавливается на 255, причем в последней точке интерполяции $E_e^{in} = E_w^{in}$. Диапазоны оценок E_w^{in} и E_e^{in} разделены, однако на четвертом шаге значение $E_e^{in} = 161$ высокое. Соотношение между изменением E_e^{in} и N_e^{in} / N_w^{in} говорит об обоснованности оценивания. Интерполяция до четвертого шага хорошая, затем меняется на противоположную; на восьмом шаге опять становится хорошей.

Для внешних элементов N_e^{ex} (Ряд 1) и N_w^{ex} (Ряд 4) увеличиваются; $N_e^{ex} - N_w^{ex} = N_w^{ex}$ (Ряд 7) также нарастает, но до меньшего значения, чем N_e^{ex} (рис. 1а). До третьего шага ошибки отсутствуют: $E_e^{ex} \equiv E_w^{ex}$ (Ряд 7, Ряд 8), и эти величины колеблются вблизи максимума 255 (рис. 1б). На четвертом шаге появляется ошибка с неадекватной оценкой $E_e^{ex} = 255$ (Ряд 9), далее E_e^{ex} опускается. E_e^{ex} также понижается, аналогично изменению отношения N_w^{in} / N_e^{in} . E_w^{ex} повышается и с шестого шага устанавливается на 255. Экстраполяция на интервале в пять шагов хорошая, а далее меняется на противоположную.

Отметим, что здесь и ниже при исследовании поведения E_e^{in} представляет интерес лишь область, начинающаяся от первого или даже второго шага искажения. Это объясняется тем, что природа ошибки, имеющейся в исходном состоянии обучающего множества, не связана с его модификацией. Тем не менее, при определении уровня оценок следует ориентироваться на приемлемое значение $E_e^{in} = 56$ в отсутствие искажения.

Подчеркнем также, что сам факт достижения функциями E_e^{in} , E_w^{in} , E_e^{ex} , E_w^{ex} уровня 255 не приводит к проблемам с оцениванием, но при исследовании искажений требуется снять ограничения по диапазону оценок.

На первом и втором шагах $N_e = N^{ex}$ (Ряд 2, Ряд 1), затем до пятого шага $N_e > N^{ex}$ (рис. 1а), а со следующего шага неравенство меняется на противоположное; следовательно, на начальном этапе устойчивость классификатора к такому искажению посредственная, далее плохая, а затем хорошая.

При уменьшении Π_1 интерполяция существует также до предпоследнего шага интервала искажения. Число внутренних элементов N^{in} (Ряд 8) понижается медленнее, чем количество безошибочных распознаваний среди них N_w^{in} (Ряд 6), принимающее нулевое значение на шестом шаге (рис. 2а).

Соответственно, $N^{\text{in}} - N_w^{\text{in}} = N_e^{\text{in}}$ (Ряд 3) растет и достигает 12 на третьем шаге, а затем падает, причем от шестого шага $N_e^{\text{in}} \equiv N^{\text{in}}$. Аналогично динамике отношения $N_w^{\text{in}} / N_e^{\text{in}}$, E^{in} (Ряд 4) опускается (рис. 2б). Схожим образом изменяется E_w^{in} (Ряд 5), а также в целом E_e^{in} (Ряд 6), причем с шестого шага $E^{\text{in}} \equiv E_e^{\text{in}}$, и эти две величины принимают весьма низкие значения к концу. Приведенные закономерности говорят об обоснованности оценивания. Также на каждом шаге $E_e^{\text{in}} < E_w^{\text{in}}$, но диапазоны этих оценок не разделены; уровень $E_e^{\text{in}} = 119$ на первом шаге высокий. Интерполяция на начальном отрезке в два шага хорошая, а далее плохая.

Для внешних элементов N^{ex} (Ряд 1) и N_e^{ex} (Ряд 4) нарастают почти синхронно до максимума 26 на последнем шаге (рис. 2а). К четвертому шагу $N^{\text{ex}} - N_e^{\text{ex}} = N_w^{\text{ex}}$ (Ряд 7) повышается до 3, а далее $N^{\text{ex}} \equiv N_e^{\text{ex}}$. E^{ex} (Ряд 7) падает (рис. 2б); это согласуется с подъемом N_e^{ex} , причем до пятого шага долевое соотношение $N_w^{\text{ex}} : N_e^{\text{ex}}$ в N^{ex} уменьшается, а далее $N_w^{\text{ex}} \equiv 0$. Сходно с E^{ex} изменяется E_e^{ex} (Ряд 9); с пятого шага $E^{\text{ex}} \equiv E_e^{\text{ex}}$, и к концу эти две величины близки к нулю. E_w^{ex} появляется на первом шаге и ко второму увеличивается до 154, практически не меняется до третьего, а на следующем – падает; уровень E_w^{ex} везде низкий. Приведенные закономерности свидетельствуют, что оценивание обоснованное. Диапазоны оценок E_w^{ex} и E_e^{ex} разделены. Экстраполяция на первом шаге хорошая, а далее переходит в плохую.

Устойчивости классификатора плохая, поскольку $N_e > N^{\text{ex}}$ (Ряд 2, Ряд 1) выполняется всюду (рис. 2а), кроме конечной точки интервала искажения. На первом шаге $E_w^{\text{ex}} < E_e^{\text{in}}$ (рис. 2б), дальнейшее искажение проблематично.

Тромбоциты PLT[L⁻¹]

При увеличении P_2 интерполяция существует на всем интервале искажения. С первого по шестой шаг число внутренних элементов $N^{\text{in}} \equiv 25$ (Ряд 8), а далее уменьшается до 5 в конце, но количество безошибочных распознаваний среди них N_w^{in} (Ряд 6) сокращается гораздо быстрее и обнуляется на восьмом шаге; исключением является участок стабилизации $N_w^{\text{in}} \equiv 5$ с четвертого по шестой шаг (рис. 3а). $N^{\text{in}} - N_w^{\text{in}} = N_e^{\text{in}}$ (Ряд 3) растет и с четвертого по шестой шаг принимает значение 20, а затем падает, причем на последнем отрезке $N^{\text{in}} \equiv N_e^{\text{in}}$. Аналогично динамике отношения $N_w^{\text{in}} / N_e^{\text{in}}$, E^{in} (Ряд 4) уменьшается (рис. 3б), как и в целом E_e^{in} (Ряд 6); на указанном выше отрезке, где N_w^{in} и N_e^{in} неизменны, E^{in} и E_e^{in} имеют небольшие локальные

максимумы. E_w^{in} (Ряд 5) сначала убывает, затем нарастает, а с пятого шага совершает незначительные колебания вблизи максимума 255. Закономерность между поведением E^{in} , а также долевым соотношением $N_w^{in}:N_e^{in}$ в N^{in} свидетельствует об обоснованности оценивания. Диапазоны оценок E_w^{in} и E_e^{in} разделены. Хорошая интерполяция наблюдается на интервале до второго шага.

Для внешних элементов с первого по шестой шаг $N^{ex} \equiv 1$ (Ряд 1), аналогично со второго по шестой шаг $N_e^{ex} \equiv 1$ (Ряд 4); далее N^{ex} увеличивается быстрее, чем N_e^{ex} , причем $N^{ex} - N_e^{ex} = N_w^{ex}$ (Ряд 7) линейно нарастает до 6 на восьмом шаге и на последнем отрезке не меняется (рис. 3а). С первого до шестого шага $E^{ex} \equiv 255$ (Ряд 7); далее E^{ex} существенно понижается (рис. 3б), аналогично изменению отношения N_w^{in}/N_e^{in} . Тождество $E_e^{ex} \equiv 255$ (Ряд 9) с неприемлемым уровнем оценок имеет место со второго до шестого шага, затем E_e^{ex} в целом опускается. На первом шаге $E_w^{ex} = 255$ (Ряд 8), а с седьмого – E_w^{ex} от значения 255 незначительно уменьшается. Экстраполяция хорошая на первом и седьмом шагах, а на остальных участках плохая.

Устойчивость классификатора плохая (рис. 3а), поскольку почти до конца интервала искажения $N_e > N^{ex}$ (Ряд 2, Ряд 1).

При уменьшении Π_2 для интерполяции, имеющейся на всем интервале искажения, число внутренних элементов N^{in} (Ряд 8) и количество безошибочных распознаваний среди них N_w^{in} (Ряд 6) уменьшаются в значительной степени синхронно, причем с первого по третий шаг $N^{in} - N_w^{in} = N_e^{in}$ (Ряд 3) принимает значения 2, 3 и 2 соответственно (рис. 4а). С четвертого шага $N_w^{in} \equiv 0$, $N^{in} \equiv N_e^{in} \equiv 1$. E^{in} (Ряд 4) существенно понижается (рис. 4б), что соответствует аналогичному изменению отношения N_w^{in}/N_e^{in} . E_e^{in} (Ряд 6) сначала поднимается, а затем опускается и колеблется на достаточно низком уровне; с четвертого шага $E^{in} \equiv E_e^{in}$. E_w^{in} (Ряд 5) варьируется на высоком уровне, но в целом увеличивается, не достигая 255. Закономерность между поведением E^{in} , а также долевым соотношением $N_w^{in}:N_e^{in}$ в N^{in} , говорит об обоснованности оценивания. Диапазоны оценок E_w^{in} и E_e^{in} разделены. До последнего (третьего) шага существования правильного распознавания интерполяция хорошая, далее плохая.

Для внешних элементов N^{ex} (Ряд 1) нарастает до 25 на четвертом шаге и устанавливается на этом значении (рис. 4а). N_e^{ex} (Ряд 4) увеличивается до 23 на последнем шаге, но после участка почти линейного роста имеется: $N_e^{ex} \equiv 21$ с шестого по восьмой шаг. К третьему шагу $N^{ex} - N_e^{ex} = N_w^{ex}$ (Ряд 7) повышается до 14, а далее понижается, причем также с шестого по восьмой шаг наблюдается

стабилизация: $N_w^{ex} \equiv 4$. Аналогично динамике долевого соотношения $N_w^{ex} : N_e^{ex}$ в N^{ex} , E^{ex} (Ряд 7) падает (рис. 4б). В целом сходным образом изменяется E_e^{ex} (Ряд 9) при весьма высоком уровне значений: на втором шаге $E_e^{ex} = 199$. E_w^{ex} с первого до второго шага практически постоянно, оставаясь на уровне, близком к максимальному, на следующем – немного падает, а далее нарастает; с шестого шага $E_w^{ex} \equiv 255$. Приведенные закономерности свидетельствуют об обоснованности оценивания, но диапазоны оценок E_w^{ex} и E_e^{ex} разделены слабо. Экстраполяция сначала хорошая, а после четвертого шага переходит в плохую.

Устойчивости классификатора хорошая, поскольку $N_e < N^{ex}$ (рис. 4а) выполняется всюду, кроме начальной точки, где нет искажения. На втором шаге $E_w^{in} > E_e^{ex}$, но различие этих величин незначительное (рис. 4б).

Лейкоциты WBC[L⁻¹]

При увеличении Π_3 число внутренних элементов N^{in} (Ряд 8) и количество правильных распознаваний среди них N_w^{in} (Ряд 6) уменьшаются синхронно, причем с нулевого до четвертого шага $N^{in} - N_w^{in} = N_e^{in} \equiv 1$ (Ряд 3), а в последней точке интервала интерполяции на пятом шаге $N_e^{in} = 0$ (рис. 5а). В соответствии с поначалу низким, а затем нулевым уровнем N_e^{in} увеличивается (рис. 5б) E^{in} (Ряд 4). Аналогично изменяется E_w^{in} (Ряд 5). E^{in} и E_w^{in} устанавливаются на максимуме 255 с последнего шага существования ошибки, где E_e^{in} (Ряд 6) от имевшегося перед этим нулевого уровня подскакивает до $E_e^{in} = 255$, вследствие чего оценочная функция становится неадекватной.

Для внешних элементов N^{ex} (Ряд 1) и N_w^{ex} (Ряд 7) нарастают при полном их совпадении (рис. 5а), $N^{ex} - N_w^{ex} = N_e^{ex} \equiv 0$ (Ряд 4). В согласии с динамикой N_w^{ex} , $E^{ex} \equiv E_w^{ex} \equiv 255$ (Ряд 7, Ряд 8) с первого до последнего шага (рис. 5б). Оценивание обоснованное. Оценки максимальные.

Интерполяция и экстраполяция всюду хорошие.

Вплоть до четвертого шага $N_e \equiv 1$, а далее $N_e \equiv 0$; это соответствует значительной устойчивости классификатора к искажению, поскольку на первом шаге $N_e = N^{ex}$ (Ряд 2, Ряд 1), а далее $N_e < N^{ex}$ (рис. 5а).

При уменьшении Π_3 интерполяция также завершается на пятом шаге, но число внутренних элементов N^{in} (Ряд 8) уменьшается заметно медленнее, чем количество безошибочных распознаваний среди них N_w^{in} (Ряд 6), принимающее со второго шага нулевое значение (рис. 6а). Соответственно $N^{in} - N_w^{in} = N_e^{in}$ (Ряд 3) растет до 9 на первом шаге, не меняется до второго, а затем падает при

выполнении $N_e^{in} \equiv N^{in}$. Аналогично динамике отношения N_w^{in}/N_e^{in} , E^{in} (Ряд 4) понижается (рис. 6б). Сходным образом изменяются E_w^{in} (Ряд 5) и E_e^{in} (Ряд 6), причем от второго шага $E^{in} \equiv E_e^{in}$, и эти две величины равны нулю на последнем отрезке интерполяции. Оценивание обоснованное. Диапазоны оценок E_w^{in} и E_e^{in} разделены. Интерполяция хорошая до первого шага.

Для всюду хорошей экстраполяции N^{ex} (Ряд 1) и N_w^{ex} (Ряд 7) нарастают: на первом они равны, далее $N^{ex} - N_w^{ex} = N_e^{ex}$ (Ряд 4) увеличивается до 8 на пятом шаге, а затем уменьшается до 3 в конце (рис. 6а). Противоположно динамике N_e^{ex}/N_w^{ex} , E^{ex} (Ряд 7) сначала понижается, потом повышается (рис. 6б). Аналогично изменяется E_w^{ex} (Ряд 8), причем с четвертого шага $E_w^{ex} \equiv 255$. E_e^{ex} (Ряд 9) растет, а далее падает синхронно с N_e^{ex} . Соотношение между изменением E^{ex} и N_e^{ex}/N_w^{ex} говорит об обоснованности оценивания. Диапазоны E_e^{ex} и E_w^{ex} разделены.

На начальном интервале до первого шага $N_e > N^{ex}$ (Ряд 2, Ряд 1), устойчивость классификатора плохая; затем она меняется на противоположную (рис. 6а). Диапазоны E_e^{ex} и E_w^{in} разделены слабо: E_e^{ex} поднимается до 163, а E_w^{in} опускается до 171 (рис. 6б).

Гемоглобин HGB[gL⁻¹]

При увеличении Π_4 интерполяция, существующая на всем интервале искажения, на начальном отрезке в один шаг хорошая, а далее плохая. Число внутренних элементов N^{in} (Ряд 8) понижается медленнее, чем количество безошибочных распознаваний среди них N_w^{in} (Ряд 6), принимающее с пятого шага нулевое значение (рис. 7а). $N^{in} - N_w^{in} = N_e^{in}$ (Ряд 3) растет и достигает 13 на третьем и четвертом шагах, а затем падает; от пятого шага $N_e^{in} \equiv N^{in}$. Аналогично динамике отношения N_w^{in}/N_e^{in} , E^{in} (Ряд 4) опускается (рис. 7б). Сходным образом изменяется E_w^{in} (Ряд 5), а также в целом E_e^{in} (Ряд 6), причем с пятого шага $E^{in} \equiv E_e^{in}$, и эти две величины принимают весьма низкие значения к концу. Оценивание обоснованное. Диапазоны оценок E_w^{in} и E_e^{in} разделены.

Для внешних элементов N^{ex} (Ряд 1) и N_e^{ex} (Ряд 4) нарастают при почти полном их совпадении (рис. 7а); исключением является лишь наличие одного правильного распознавания на первом шаге с $E_w^{ex} = 255$ (Ряд 8). В согласии с подъемом N_e^{ex} при противоположной динамике долевого соотношения $N_w^{ex}:N_e^{ex}$ в N^{ex} , величина E^{ex} (Ряд 7) падает (рис. 7б). Схожим образом изменяется E_e^{ex}

(Ряд 9), причем со второго шага $E^{ex} \equiv E_e^{ex}$, а в конце они принимают столь же невысокие значения, как E^{in} и E_e^{in} . Оценивание обоснованное. Диапазоны E_e^{ex} и E_w^{ex} разделены. Экстраполяция посредственная на первом шаге, далее плохая.

На всем интервале искажения $N_e > N^{ex}$ (Ряд 2, Ряд 1), что соответствует низкой устойчивости классификатора (рис. 7а). Диапазоны E_e^{ex} и E_w^{in} не разделены: $E_e^{ex} = 151$ на первом шаге, а E_w^{in} в конце опускается до 142 (рис. 7б).

При уменьшении Π_4 для интерполяции, имеющейся до предпоследнего шага интервала искажения, число внутренних элементов N^{in} (Ряд 8) и количество безошибочных распознаваний среди них N_w^{in} (Ряд 6) уменьшаются синхронно (рис. 8а); с первого до восьмого шага $N^{in} - N_w^{in} = N_e^{in} \equiv 2$ (Ряд 3). E^{in} (Ряд 4) после незначительного повышения ощутимо понижается (рис. 8б), что соответствует аналогичному изменению отношения N_w^{in} / N_e^{in} . E_w^{in} (Ряд 5) увеличивается, причем $E_w^{in} \equiv 255$ на последнем отрезке. E_e^{in} (Ряд 6) сначала убывает, а затем возрастает. Диапазоны оценок E_w^{in} и E_e^{in} разделены, но значение $E_e^{in} = 129$ довольно высокое. Хорошая интерполяция наблюдается на интервале до шестого шага, а далее меняется на противоположную; ее ухудшению сопутствует увеличение E_e^{in} .

Для внешних элементов N^{ex} (Ряд 1) и N_w^{ex} (Ряд 7) нарастают при полном совпадении, $N_e^{ex} \equiv 0$ (Ряд 4); исключением является конечный шаг, где $N_e^{ex} = 3$ (рис. 8а). $E^{ex} \equiv E_w^{ex}$ (Ряд 7, Ряд 8) с первого до предпоследнего шага (рис. 8б), причем на начальном отрезке они принимают значение 255, далее незначительно уменьшаются, затем увеличиваются; в конечной точке $E_w^{ex} = 255$. Поведение E^{ex} согласуется с низким уровнем N_e^{ex} . Диапазоны E_e^{ex} и E_w^{ex} разделены. Экстраполяция хорошая везде.

С первого шага $N_e \equiv 2$, а в конечной точке $N_e = 3$; это соответствует значительной устойчивости классификатора к искажению, поскольку $N_e = N^{ex}$ (Ряд 2, Ряд 1) лишь на первом шаге, а далее $N_e < N^{ex}$ (рис. 8а). Диапазоны E_e^{ex} и E_w^{in} разделены слабо: E_e^{ex} принимает значение 189, а $E_w^{in} = 209$ в начальной точке (рис. 8б).

Лимфоциты LYMPH[L⁻¹]

При увеличении Π_5 интерполяция существует до пятого шага. Число внутренних элементов N^{in} (Ряд 8) падает медленнее, чем количество правильных распознаваний среди них N_w^{in} (Ряд 6), принимающее с четвертого

шага нулевое значение (рис. 9а). $N^{in} - N_w^{in} = N_e^{in}$ (Ряд 3) растет и на втором шаге достигает 16, а затем падает, при этом $N_e^{in} \equiv N^{in}$ от четвертого шага. Аналогично динамике отношения N_w^{in} / N_e^{in} , E^{in} (Ряд 4) уменьшается (рис. 9б). Схожим образом изменяется E_e^{in} (Ряд 6), причем на последнем отрезке интерполяции $E^{in} \equiv E_e^{in}$. E_w^{in} (Ряд 5) понижается, а затем повышается до 255. Оценивание обоснованное. Диапазоны оценок E_w^{in} и E_e^{in} разделены. Хорошая интерполяция на интервале в один шаг, а далее она становится противоположной.

Для внешних элементов наблюдается почти синхронное нарастание N^{ex} (Ряд 1) и N_e^{ex} (Ряд 4), причем $N^{ex} - N_e^{ex} = N_w^{ex} \leq 4$ (Ряд 7) (рис. 9а). Аналогично динамике долевого соотношения $N_w^{ex} : N_e^{ex}$ в N^{ex} , сначала E^{ex} (Ряд 7) существенно падает, а после пятого шага идет повышение, сменяющееся понижением (рис. 9б). E_e^{ex} (Ряд 9) ведет себя схожим образом, но при меньших величинах. На первом шаге E_w^{ex} имеет достаточно низкое значение, затем поднимается и с третьего шага $E_w^{ex} \equiv 255$. Оценивание обоснованное. Диапазоны E_e^{ex} и E_w^{ex} разделены. Экстраполяция хорошая на первом шаге, посредственная на втором, а далее становится плохой.

Устойчивость классификатора плохая до четвертого шага (рис. 9а), с пятого становится хорошей, но $N^{ex} - N_e \leq 2$ (Ряд 2, Ряд 1).

При уменьшении Π_5 интерполяция имеется также до пятого шага. Число внутренних элементов N^{in} (Ряд 8) и количество безошибочных распознаваний среди них N_w^{in} (Ряд 6) синхронно понижаются (рис. 10а), причем $N^{in} - N_w^{in} = N_e^{in} \leq 4$ (Ряд 3). Противоположно изменению отношения N_e^{in} / N_w^{in} , значения E^{in} (Ряд 4) незначительно повышаются (рис. 10б), затем следует участок с локальным минимумом E^{in} на четвертом шаге, где $N_w^{in} < N_e^{in}$, после чего E^{in} достигает 255 при $N_e^{in} = 0$. E_w^{in} (Ряд 5) нарастает до 255 и сохраняется на четвертом и пятом шагах. Поскольку N_e^{in} меняется при небольшом количестве ошибок, то E_e^{in} (Ряд 6) ведет себя немонотонно, но в целом нарастает. Оценивание обоснованное. Диапазоны оценок E_w^{in} и E_e^{in} разделены, однако верхний уровень $E_e^{in} = 162$ вызывает опасение. Интерполяция плохая на четвертом шаге, а на остальных – хорошая.

Для экстраполяции N^{ex} (Ряд 1) и N_w^{ex} (Ряд 7) нарастают, затем N^{ex} устанавливается на максимуме, а N_w^{ex} колеблется на более низком уровне (рис. 10а). До второго шага $N^{ex} \equiv N_w^{ex}$, далее $N^{ex} - N_w^{ex} = N_e^{ex}$ (Ряд 4) увеличивается до 6 на пятом шаге, а в конце уменьшается до 4. На первом и втором шагах

$E^{ex} \equiv 255$ (Ряд 7), затем понижается, а далее опять приближается к максимуму (рис.10б), что противоположно динамике N_e^{ex}/N_w^{ex} . С первого до последнего шага $E_w^{ex} \equiv 255$ (Ряд 8). Диапазоны E_e^{ex} и E_w^{ex} разделены, но ввиду повышения E_e^{ex} (Ряд 9) до 189 возможна неадекватность оценок. Экстраполяция всюду хорошая.

Классификатор в значительной степени устойчив к такому искажению, поскольку везде $N_e \leq 6$, причем на первом шаге $N_e = N^{ex}$ (Ряд 2, Ряд 1), а далее $N_e < N^{ex}$ (рис. 10а). Диапазоны E_e^{ex} и E_w^{in} разделены слабо: E_e^{ex} поднимается до 189, а $E_w^{in} = 209$ в начальной точке (рис. 10б).

Лимфоциты LМРН [%]

При увеличении P_6 интерполяция существует до предпоследнего шага интервала искажения. С первого по пятый шаг число внутренних элементов $N^{in} \equiv 25$ (Ряд 8), а далее уменьшается, но количество правильных распознаваний среди них N_w^{in} (Ряд 6) сокращается быстрее, с высокими темпами вначале и с существенным замедлением к концу, причем с шестого по восьмой шаг N_w^{in} меняется от 2 до 1 (рис. 11а). $N^{in} - N_w^{in} = N_e^{in}$ (Ряд 3) растет и на пятом шаге достигает 22, а затем падает до 2 к концу диапазона интерполяции. Аналогично динамике отношения N_w^{in}/N_e^{in} , E^{in} (Ряд 4) уменьшается (рис. 11б), а на двух последних отрезках интерполяции увеличивается, но значение остается небольшим. E_e^{in} (Ряд 6) в целом понижается и доходит почти до нуля. E_w^{in} (Ряд 5) сначала колеблется, но к пятому шагу достигает максимума 255 и устанавливается на нем. Оценивание обоснованное. Диапазоны оценок E_w^{in} и E_e^{in} разделены. Хорошая интерполяция наблюдается на начальном интервале до первого шага.

Для внешних элементов с первого по пятый шаг $N^{ex} \equiv 1$ (Ряд 1), аналогично со второго по пятый шаг $N_e^{ex} \equiv 1$ (Ряд 4), а далее наблюдается почти синхронное нарастание N^{ex} и N_e^{ex} , причем $N^{ex} - N_e^{ex} = N_w^{ex} \leq 1$ (Ряд 7) (рис. 11а). Сначала E^{ex} (Ряд 7) падает до нуля (рис.11б), а затем в целом повышается, но остается на низком уровне, аналогично динамике долевого соотношения $N_w^{ex}:N_e^{ex}$ в N^{ex} , причем N_w^{ex} принимает единичные значения лишь на первом и двух последних шагах, а на промежуточных – нулевое. Схоже с E^{ex} изменяется и E_e^{ex} (Ряд 9); со второго по седьмой шаг $E^{ex} \equiv E_e^{ex}$. Значение E_w^{ex} существует только на трех шагах: на первом – достаточно низкое, а на двух последних – $E_w^{ex} \equiv 255$.

Оценивание обоснованное. Диапазоны E_e^{ex} и E_w^{ex} разделены. Экстраполяция хорошая только на первом шаге, а далее становится плохой.

Устойчивость классификатора плохая (рис. 11а), поскольку почти до конца интервала искажения $N_e > N^{ex}$ (Ряд 2, Ряд 1).

При уменьшении Π_6 число внутренних элементов N^{in} (Ряд 8) и количество безошибочных распознаваний среди них N_w^{in} (Ряд 6) уменьшаются синхронно, причем с первого по второй шаг $N^{in} - N_w^{in} = N_e^{in}$ (Ряд 3) меняется от 3 до 1, а далее $N_e^{in} \equiv 0$; $N^{in} \equiv N_w^{in} \equiv 1$ с четвертого до предпоследнего шага интервала искажения, где имеется интерполяция (рис. 12а). Противоположно изменению отношения N_e^{in} / N_w^{in} , E^{in} (Ряд 4) и E_w^{in} (Ряд 5) сначала понижаются (рис. 12б), затем повышаются, в зоне стабилизации N^{in} и N_w^{in} значения E^{in} и E_w^{in} достигают максимума 255, далее опять уменьшаются. E_e^{in} (Ряд 6) незначительно падает, находясь на низком уровне. Оценивание обоснованное. Диапазоны оценок E_w^{in} и E_e^{in} разделены. Интерполяция хорошая везде.

Число внешних элементов N^{ex} (Ряд 1) нарастает и устанавливается с четвертого шага на уровне 25, а на последнем выходит на максимум 26 (рис. 12а). N_w^{ex} (Ряд 7) сначала также повышается до 6 на втором шаге, затем понижается до 4 на шестом шаге (на этих этапах $N^{ex} - N_w^{ex} = N_e^{ex}$ (Ряд 4) увеличивается до 21); далее N_w^{ex} поднимается к концу до 23 (N_e^{ex} уменьшается до 3). Этой динамике N_w^{ex} / N_e^{ex} соответствует падение с последующим ростом (рис. 12б) E^{ex} (Ряд 7). В целом E_w^{ex} (Ряд 8) изменяется аналогично E^{ex} ; немонотонное поведение E_w^{ex} объясняется изменением N_w^{ex} при небольших величинах. E_e^{ex} (Ряд 9) колеблется на низком уровне. Оценивание обоснованное. Диапазоны E_e^{ex} и E_w^{ex} разделены. Экстраполяция перестает быть плохой только после седьмого шага,

На первом шаге $N_e > N^{ex}$ (Ряд 2, Ряд 1) – устойчивость классификатора плохая, а далее меняется на противоположную (рис. 12а).

Гранулоциты GRAN [L⁻¹]

При увеличении Π_7 интерполяция существует до пятого шага интервала искажения. Число внутренних элементов N^{in} (Ряд 8) падает медленнее, чем количество безошибочных распознаваний среди них N_w^{in} (Ряд 6), имеющее высокие темпы вначале и существенное замедление перед выходом на нулевое значение на пятом шаге (рис. 13а). $N^{in} - N_w^{in} = N_e^{in}$ (Ряд 3) растет, на третьем шаге $N_e^{in} = 21$, а затем падает, достигая $N_e^{in} = N^{in} = 1$ на последнем шаге интерполяции.

Аналогично динамике отношения N_w^{in}/N_e^{in} , E^{in} (Ряд 4) в целом уменьшается, при небольшом нарушении монотонности к концу (рис. 13б). E_e^{in} (Ряд 6) колеблется на достаточно низком уровне, причем в последней точке интерполяции $E^{in}=E_e^{in}$. E_w^{in} (Ряд 5) повышается до 255 и устанавливается на этом значении. Оценивание обоснованное. Диапазоны оценок E_w^{in} и E_e^{in} разделены. Интерполяция плохая с первого шага.

Для внешних элементов N^{ex} (Ряд 1) и N_e^{ex} (Ряд 4) нарастают при почти полном совпадении, лишь на первом, втором и пятом шагах $N^{ex}-N_e^{ex}=N_w^{ex}=1$ (Ряд 7); с шестого шага $N^{ex}\equiv N_e^{ex}\equiv 26$ (рис. 13а). Выполнению $N_w^{ex}\equiv 1$ на первом и втором шагах соответствует $E^{ex}\equiv 255$ (Ряд 7), а далее увеличению N_e^{ex} сопутствует падение E^{ex} (рис. 13б). Аналогично уменьшается E_e^{ex} (Ряд 9) от $E_e^{ex}=250$ на втором шаге. По достижении $N^{ex}\equiv N_e^{ex}\equiv 26$ с шестого шага выполняется $E^{ex}\equiv E_e^{ex}$, эти величины поднимаются до 208, а затем опускаются до нуля. E_w^{ex} существует на первом, втором и пятом шагах, причем $E_w^{ex}\equiv 255$. Диапазоны E_e^{ex} и E_w^{ex} разделены, но высокое значение $E_e^{ex}=250$ ставит под вопрос его правомерность. Экстраполяция хорошая на первом шаге, посредственная на втором, а далее становится плохой.

Устойчивость классификатора плохая везде, поскольку $N_e > N^{ex}$ (Ряд 2, Ряд 1) на всем интервале искажения до установления этих величин на максимуме с шестого шага (рис. 13а). Диапазоны E_e^{ex} и E_w^{in} не разделены, более того, на втором шаге $E_e^{ex} > E_w^{in}$, что означает невозможность дальнейшего искажения.

При уменьшении Π_7 интерполяция также имеется до пятого шага. Число внутренних элементов N^{in} (Ряд 8) падает медленнее (рис. 14а), чем количество правильных распознаваний среди них N_w^{in} (Ряд 6), равное нулю со второго шага. $N^{in}-N_w^{in}=N_e^{in}$ (Ряд 3) нарастает до 8 на первом шаге, а затем падает, причем со второго шага $N^{in}\equiv N_e^{in}$. Аналогично динамике отношения N_w^{in}/N_e^{in} , E^{in} (Ряд 4) понижается почти до нулевого уровня (рис. 14б); аналогично изменяется E_e^{in} (Ряд 5), причем со второго шага $E^{in}\equiv E_e^{in}$. E_w^{in} (Ряд 6) на единственном отрезке существования повышается. Оценивание обоснованное. Диапазоны оценок E_w^{in} и E_e^{in} разделены, однако на первом шаге уровень $E_e^{in}=144$ довольно высокий. Интерполяция с первого шага плохая.

Для внешних элементов N^{ex} (Ряд 1) и N_e^{ex} (Ряд 4) нарастают почти синхронно (рис. 14а); с шестого шага эти величины устанавливаются на

максимуме 26. На первом шаге $N^{ex} - N_e^{ex} = N_w^{ex} = 5$ (Ряд 7), на втором – $N_w^{ex} = 1$, а далее $N^{ex} \equiv N_e^{ex}$. E^{ex} (Ряд 7) падает (рис. 14б), это согласуется с подъемом N_e^{ex} , причем до третьего шага долевое соотношение $N_w^{ex} : N_e^{ex}$ в N^{ex} уменьшается, а далее $N_w^{ex} \equiv 0$. Сходным с E^{ex} образом изменяется E_e^{ex} (Ряд 9); с третьего шага $E^{ex} \equiv E_e^{ex}$, а с шестого – эти две величины равны нулю. E_w^{ex} появляется на первом шаге и ко второму увеличивается до 255. Оценивание обоснованное. Диапазоны E_e^{ex} и E_w^{ex} разделены, однако уровень $E_e^{ex} = 135$ на первом шаге высокий. Экстраполяция плохая везде.

Выполнение условия $N_e > N^{ex}$ (Ряд 2, Ряд 1) на всем интервале искажения до установления этих величин на максимуме с шестого шага (рис. 14а) свидетельствует о низкой устойчивости классификатора.

Гранулоциты GRAN [%]

При увеличении P_8 интерполяция существует до седьмого шага. Число внутренних элементов N^{in} (Ряд 8) падает заметно медленнее, чем N_w^{in} (Ряд 6) – количество безошибочных распознаваний среди них, причем $N_w^{in} \equiv 0$ с пятого шага (рис. 15а). $N^{in} - N_w^{in} = N_e^{in}$ (Ряд 3) нарастает до 16 на втором шаге, не меняется до третьего, а затем падает, и с пятого шага $N^{in} \equiv N_e^{in}$. Аналогично динамике отношения N_w^{in} / N_e^{in} , E^{in} (Ряд 4) уменьшается, а на участке от третьего до четвертого шага имеет локальный максимум (рис. 15б). E_e^{in} (Ряд 6) понижается; с пятого шага $E^{in} \equiv E_e^{in}$, и на последнем отрезке интерполяции эти величины принимают нулевое значение. E_w^{in} (Ряд 5) сначала уменьшается, а затем увеличивается и устанавливается на максимуме 255. Оценивание обоснованное. Диапазоны оценок E_w^{in} и E_e^{in} разделены. Интерполяция до первого шага хорошая, затем меняется на противоположную.

Для внешних элементов наблюдается почти синхронное нарастание N^{ex} (Ряд 1) и N_e^{ex} (Ряд 4), причем $N^{ex} - N_e^{ex} = N_w^{ex} \leq 2$ (Ряд 7) (рис. 15а). В согласии с динамикой долевого соотношения $N_w^{ex} : N_e^{ex}$ в N^{ex} , сначала E^{ex} (Ряд 7) падает (рис. 15б), как и E_e^{ex} (Ряд 9); после четвертого шага E^{ex} и E_e^{ex} совершают колебания, но в целом нарастают; на последнем отрезке E^{ex} и E_e^{ex} понижаются. E_w^{ex} повышается и с третьего шага устанавливается на максимуме 255. Оценивание обоснованное. Диапазоны E_e^{ex} и E_w^{ex} разделены, однако уровень E_e^{ex} на первом шаге высокий: $E_e^{ex} = 198$. Экстраполяция на первом и втором шагах посредственная, а далее становится плохой.

Устойчивость классификатора плохая до седьмого шага, далее хорошая, но $N^{ex} - N_e \leq 1$. Диапазоны E_e^{ex} и E_w^{in} не разделены, более того, на первом шаге $E_e^{ex} > E_w^{in}$, что означает невозможность дальнейшего искажения.

При уменьшении Π_8 число внутренних элементов N^{in} (Ряд 8) и количество правильных распознаваний среди них N_w^{in} (Ряд 6) уменьшаются почти синхронно (рис. 16а), причем $N^{in} - N_w^{in} = N_e^{in} \leq 4$ (Ряд 3). Для интерполяции, имеющейся до шестого шага, аналогично изменению отношения N_w^{in} / N_e^{in} , E^{in} (Ряд 4) колеблется, но в целом понижается, что особенно заметно на пятом шаге, где минимуму соответствует $N_w^{in} = N_e^{in}$; на последнем шаге интерполяции E^{in} немного повышается (рис.16б). E_w^{in} (Ряд 5) сначала увеличивается и уменьшается в конце. Поскольку N_e^{in} варьируется, а количество ошибок небольшое, то E_e^{in} (Ряд 6) ведет себя немонотонно, но в целом нарастает. Оценивание обоснованное. Однако диапазоны E_w^{in} и E_e^{in} не разделены; более того, на шестом шаге $E_w^{in} < E_e^{in}$, что означает невозможность продолжения искажения. Интерполяция хорошая до четвертого шага, затем меняется на посредственную.

Для внешних элементов N^{ex} (Ряд 1) и N_w^{ex} (Ряд 7) нарастают, а затем N^{ex} устанавливается на максимуме, а N_w^{ex} – на более низком уровне (рис. 16а). $N^{ex} \equiv N_w^{ex}$ до второго шага, далее $N^{ex} - N_w^{ex} = N_e^{ex}$ (Ряд 4) увеличивается и с шестого шага стабилизируется при $N_e^{ex} \equiv 4$. На первом шаге $E^{ex} = E_w^{ex} = 255$ (Ряд 7, Ряд 8), далее эти величины понижаются (рис.16б), а затем повышаются и стабилизируются на последнем отрезке немного ниже максимума. Изменение E^{ex} противоположно динамике N_e^{ex} / N_w^{ex} – оценивание обоснованное. Диапазоны E_e^{ex} и E_w^{ex} разделены, однако E_e^{ex} достигает высокого значения 172. Экстраполяция всюду хорошая.

Наблюдается значительная устойчивость классификатора к искажению, поскольку везде $N_e \leq 4$ (рис. 16а), причем с первого шага $N_e < N^{ex}$ (Ряд 2, Ряд 1).

Заключение

Введенная в данной работе величина N^{in} соответствует числу внутренних элементов, которые в процессе постепенного увеличения или уменьшения одного из восьми параметров крови не вышли за пределы исходных отрезков принадлежности признаков (табл.1). Динамика N^{in} при изменении каждого из параметров крови является исконной характеристикой самой базы. В то же время оценочная функция E^{in} определяется и структурой исходной выборки и

построенным на ее основе классификатором, причем способ реализации последнего может иметь решающее значение. От «вердикта», который выносит E^{in} , зависит доля правильно и неправильно распознанных элементов (N_w^{in} и N_e^{in} соответственно) среди их общего количества N^{in} .

Аналогично N^{ex} – число внешних элементов, которые при нарастании искажения покинули начальные диапазоны признаков. Характер изменения N^{ex} определяется особенностями самого обучающего множества. Поведение E^{ex} является свойством классификатора. Значение E^{ex} влияет на соотношение N_w^{ex} и N_e^{ex} в N^{ex} .

Проведенные исследования продемонстрировали, как это работает в условиях реальной базы параметров крови, относящейся к третьему из четырех классов, соответствующему значительным отклонениям состояния рассматриваемой СО – пищеварительной системы для мужчин.

Было показано, что на этапе интерполяции характер изменения E^{in} определяет динамику долевого соотношения $N_w^{in}:N_e^{in}$ в N^{in} . При этом E^{in} как уменьшается, так и ведет себя немонотонно: понижение переходит в повышение, причем вплоть до максимума 255.

На этапе экстраполяции также продемонстрировано, что E^{ex} влияет на $N_w^{ex}:N_e^{ex}$ в N^{ex} . Наблюдается как падение E^{in} , так и немонотонное поведение: понижение переходит в повышение, а также незначительные колебания вблизи максимума 255.

Итак, предложена математическая модель искажения исходного обучающего множества. На ее основе проведено исследование способности классификатора к обобщениям: описаны его интерполяционные и экстраполяционные свойства. Поскольку в практической ситуации на вход классификатора поступает объект, отличный от обучающих элементов, полученные в данной работе результаты могут быть полезными при анализе достоверности ответа классификатора.

Библиографический список

1. Гавриков Б.М., Гавриков М.Б., Пестрякова Н.В. Статистический метод распознавания на основе нелинейной регрессии // Математическое моделирование, 2020. Т. 32. № 4. С. 116-130. DOI: 10.20948/mm-2020-04-09.
2. 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. С. 1-40. DOI: 10.20948/prepr-2020-32.
3. Гавриков Б.М., Гавриков М.Б., Пестрякова Н.В. Об устойчивости статистического классификатора состояний систем организма человека к искажениям в вырожденных случаях // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2020. № 49. С. 1-26. DOI: 10.20948/prepr-2020-49.
4. Гавриков Б.М., Пестрякова Н.В. Об экстраполяционных свойствах статистического классификатора. // Информационные технологии и вычислительные системы, 2020. № 4. С. 79-90. DOI:10.14357/20718632200407.
5. Гавриков М.Б., Локуцкий О.В. Начала численного анализа. — М.: Янус, 1995.
6. Schürmann J. Pattern Classification. — New York: John Wiley&Sons, Inc., 1996.

а) «1»- N^{ex} , «2»- N_e , «3»- N_e^{in} , «4»- N_e^{ex} ,
«5»- N_w , «6»- N_w^{in} , «7»- N_w^{ex} , «8»- N^{in}

б) «1»- E , «2»- E_w , «3»- E_e , «4»- E^{in} ,
«5»- E_w^{in} , «6»- E_e^{in} , «7»- E^{ex} , «8»- E_w^{ex} , «9»- E_e^{ex}

Рис. 1. Признак 1 (увеличение)

а) «1»- N^{ex} , «2»- N_e , «3»- N_e^{in} , «4»- N_e^{ex} ,
«5»- N_w , «6»- N_w^{in} , «7»- N_w^{ex} , «8»- N^{in}

б) «1»- E , «2»- E_w , «3»- E_e , «4»- E^{in} ,
«5»- E_w^{in} , «6»- E_e^{in} , «7»- E^{ex} , «8»- E_w^{ex} , «9»- E_e^{ex}

Рис. 2. Признак 1 (уменьшение)

а) «1»- N^{ex} , «2»- N_e , «3»- N_e^{in} , «4»- N_e^{ex} ,

б) «1»- E , «2»- E_w , «3»- E_e , «4»- E^{in} ,

«5»- N_w , «6»- N_w^{in} , «7»- N_w^{ex} , «8»- N^{in}

«5»- E_w^{in} , «6»- E_e^{in} , «7»- E^{ex} , «8»- E_w^{ex} , «9»- E_e^{ex}

Рис. 3. Признак 2 (увеличение)

а) «1»- N^{ex} , «2»- N_e , «3»- N_e^{in} , «4»- N_e^{ex} ,

«5»- N_w , «6»- N_w^{in} , «7»- N_w^{ex} , «8»- N^{in}

б) «1»- E , «2»- E_w , «3»- E_e , «4»- E^{in} ,

«5»- E_w^{in} , «6»- E_e^{in} , «7»- E^{ex} , «8»- E_w^{ex} , «9»- E_e^{ex}

Рис. 4. Признак 2 (уменьшение)

а) «1»- N^{ex} , «2»- N_e , «3»- N_e^{in} , «4»- N_e^{ex} ,

«5»- N_w , «6»- N_w^{in} , «7»- N_w^{ex} , «8»- N^{in}

б) «1»- E , «2»- E_w , «3»- E_e , «4»- E^{in} ,

«5»- E_w^{in} , «6»- E_e^{in} , «7»- E^{ex} , «8»- E_w^{ex} , «9»- E_e^{ex}

Рис. 5. Признак 3 (увеличение)

а) «1»- N^{ex} , «2»- N_e , «3»- N_e^{in} , «4»- N_e^{ex} ,
«5»- N_w , «6»- N_w^{in} , «7»- N_w^{ex} , «8»- N^{in}

б) «1»- E , «2»- E_w , «3»- E_e , «4»- E^{in} ,
«5»- E_w^{in} , «6»- E_e^{in} , «7»- E^{ex} , «8»- E_w^{ex} , «9»- E_e^{ex}

Рис. 6. Признак 3 (уменьшение)

а) «1»- N^{ex} , «2»- N_e , «3»- N_e^{in} , «4»- N_e^{ex} ,
«5»- N_w , «6»- N_w^{in} , «7»- N_w^{ex} , «8»- N^{in}

б) «1»- E , «2»- E_w , «3»- E_e , «4»- E^{in} ,
«5»- E_w^{in} , «6»- E_e^{in} , «7»- E^{ex} , «8»- E_w^{ex} , «9»- E_e^{ex}

Рис. 7. Признак 4 (увеличение)

а) «1»- N^{ex} , «2»- N_e , «3»- N_e^{in} , «4»- N_e^{ex} ,
«5»- N_w , «6»- N_w^{in} , «7»- N_w^{ex} , «8»- N^{in}

б) «1»- E , «2»- E_w , «3»- E_e , «4»- E^{in} ,
«5»- E_w^{in} , «6»- E_e^{in} , «7»- E^{ex} , «8»- E_w^{ex} , «9»- E_e^{ex}

Рис. 8. Признак 4 (уменьшение)

а) «1»- N^{ex} , «2»- N_e , «3»- N_e^{in} , «4»- N_e^{ex} ,
«5»- N_w , «6»- N_w^{in} , «7»- N_w^{ex} , «8»- N^{in}

б) «1»- E , «2»- E_w , «3»- E_e , «4»- E^{in} ,
«5»- E_w^{in} , «6»- E_e^{in} , «7»- E^{ex} , «8»- E_w^{ex} , «9»- E_e^{ex}

Рис. 9. Признак 5 (увеличение)

а) «1»- N^{ex} , «2»- N_e , «3»- N_e^{in} , «4»- N_e^{ex} ,
«5»- N_w , «6»- N_w^{in} , «7»- N_w^{ex} , «8»- N^{in}

б) «1»- E , «2»- E_w , «3»- E_e , «4»- E^{in} ,
«5»- E_w^{in} , «6»- E_e^{in} , «7»- E^{ex} , «8»- E_w^{ex} , «9»- E_e^{ex}

Рис. 10. Признак 5 (уменьшение)

а) «1»- N^{ex} , «2»- N_e , «3»- N_e^{in} , «4»- N_e^{ex} ,
«5»- N_w , «6»- N_w^{in} , «7»- N_w^{ex} , «8»- N^{in}

б) «1»- E , «2»- E_w , «3»- E_e , «4»- E^{in} ,
«5»- E_w^{in} , «6»- E_e^{in} , «7»- E^{ex} , «8»- E_w^{ex} , «9»- E_e^{ex}

Рис. 11. Признак 6 (увеличение)

а) «1»- N^{ex} , «2»- N_e , «3»- N_e^{in} , «4»- N_e^{ex} ,
«5»- N_w , «6»- N_w^{in} , «7»- N_w^{ex} , «8»- N^{in}

б) «1»- E , «2»- E_w , «3»- E_e , «4»- E^{in} ,
«5»- E_w^{in} , «6»- E_e^{in} , «7»- E^{ex} , «8»- E_w^{ex} , «9»- E_e^{ex}

Рис. 12. Признак 6 (уменьшение)

а) «1»- N^{ex} , «2»- N_e , «3»- N_e^{in} , «4»- N_e^{ex} ,
«5»- N_w , «6»- N_w^{in} , «7»- N_w^{ex} , «8»- N^{in}

б) «1»- E , «2»- E_w , «3»- E_e , «4»- E^{in} ,
«5»- E_w^{in} , «6»- E_e^{in} , «7»- E^{ex} , «8»- E_w^{ex} , «9»- E_e^{ex}

Рис. 13. Признак 7 (увеличение)

а) «1»- N^{ex} , «2»- N_e , «3»- N_e^{in} , «4»- N_e^{ex} ,
«5»- N_w , «6»- N_w^{in} , «7»- N_w^{ex} , «8»- N^{in}

б) «1»- E , «2»- E_w , «3»- E_e , «4»- E^{in} ,
«5»- E_w^{in} , «6»- E_e^{in} , «7»- E^{ex} , «8»- E_w^{ex} , «9»- E_e^{ex}

Рис. 14. Признак 7 (уменьшение)

а) «1»- N^{ex} , «2»- N_e , «3»- N_e^{in} , «4»- N_e^{ex} ,
«5»- N_w , «6»- N_w^{in} , «7»- N_w^{ex} , «8»- N^{in}

б) «1»- E , «2»- E_w , «3»- E_e , «4»- E^{in} ,
«5»- E_w^{in} , «6»- E_e^{in} , «7»- E^{ex} , «8»- E_w^{ex} , «9»- E_e^{ex}

Рис. 15. Признак 8 (увеличение)

а) «1»- N^{ex} , «2»- N_e , «3»- N_e^{in} , «4»- N_e^{ex} ,
«5»- N_w , «6»- N_w^{in} , «7»- N_w^{ex} , «8»- N^{in}

б) «1»- E , «2»- E_w , «3»- E_e , «4»- E^{in} ,
«5»- E_w^{in} , «6»- E_e^{in} , «7»- E^{ex} , «8»- E_w^{ex} , «9»- E_e^{ex}

Рис. 16. Признак 8 (уменьшение)