

М.Л. Кочина, В.Г. Калиманов

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОРАЖЕНИЙ ГЛАЗОДВИГАТЕЛЬНЫХ МЫШЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Представлены результаты классификации интерференционных картин глаз больных горизонтальным косоглазием с использованием аппарата нечеткой логики. Установлено, что для точного разделения интерференционных картин глаз на группы наиболее информативными являются углы между диагоналями интерференционного ромба и длины отрезков горизонтальной диагонали. Для классификации параметров интерференционных картин глаз больных горизонтальным косоглазием целесообразно использовать двухступенчатый алгоритм. На первой ступени разделение на кластеры следует проводить по углам между диагоналями интерференционного ромба, на второй — с использованием значений длин отрезков горизонтальной диагонали.

Введение. Косоглазие — достаточно распространенное заболевание в детском возрасте. Ежегодно в Украине специалисты выявляют косоглазие в среднем у 50 тысяч детей. Это не только косметический недостаток, но и серьезное заболевание, которое ведет к нарушению зрительного восприятия. Косоглазие встречается по данным разных авторов от 0,5 % до 2 % детей [1–3].

Пути лечения косоглазия различные, поскольку зависят от причин, его вызвавших. Одним из них является хирургическое лечение, направленное на устранение структурной и структурно-функциональной патологии глазодвигательных мышц (ГДМ) [4–8]. Вид операции зачастую корректируется хирургом уже непосредственно на операционном столе, так как при такой операции необходимо учитывать особенности расположения ГДМ у конкретного человека. К сожалению, такой подход к хирургическому лечению косоглазия порождает ряд проблем, обусловленных невозможностью оценить интраоперационно состояние всех ГДМ, так как это привело бы к значительной травме глаза и нарушению его питания. Кроме того, одинаковые отклонения глазного яблока от нормального положения могут быть обусловлены самыми разными структурными и структурно-функциональными нарушениями ГДМ, например, отклонения глаза по горизонтали могут быть связаны с аномалиями прикрепления мышц вертикального действия, а по вертикали — горизонтального [9, 10].

В настоящее время практически единственным объективным методом диагностики структурных и структурно-функциональных нарушений ГДМ является поляризационно-оптический метод, основанный на исследовании оптической анизотропии роговицы глаза в поляризованном свете [11–13]. Роговица живого глаза оптически анизотропна, что обусловлено ее составом, строением и приложенными к ней усилиями со стороны глазодвигательных мышц и внутриглазного давления. Форма интерференционной картины, наблюдаемой на роговице живого глаза в поляризованном свете, во многом зависит от силы действия и места прикрепления прямых ГДМ к склере. Исследуя геометрические параметры интерференционной картины, можно определить, какая из мышц вызывает косоглазие, и разработать тактику хирургического лечения.

При разработке методов дифференциальной диагностики поражений ГДМ с использованием поляризационно-оптического метода были попытки использовать разные параметры интерференционных картин глаз [14]. Как показали результаты многолетних исследований [13], более надежными показателями для диагностики патологии ГДМ являются отрезки диагоналей интерференционного ромба и углы между ними.

Цель настоящей публикации — разработка метода классификации поражений глазодвигательных мышц при горизонтальном косоглазии.

Для разработки модели использовались описанные выше информативные параметры 150-ти интерференционных картин глаз детей с горизонтальным косоглазием.

Материалы и методы. Для разработки метода классификации интерференционных картин глаз пациентов с горизонтальным косоглазием мы использовали алгоритм нечетких s -средних. Предварительные исследования позволили выделить показатели интерференционных картин, по которым происходит разделение на кластеры с минимальной ошибкой. С этой целью были исследованы длины отрезков диагоналей интерференционного ромба (ОК,ОН,ОР,ОР) и углы между этими отрезками ($\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$) (рис. 1). Установлено, что оптимальное разделение на кластеры осуществляется по углам Φ_1 и Φ_2 .

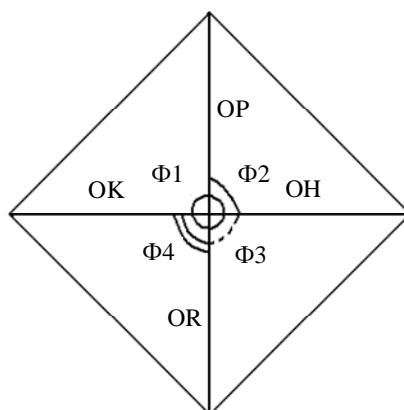


Рис. 1. Схема интерференционного ромба нормального глаза

Для того чтобы в дальнейшем была возможность разделить испытуемых в соответствии с результатами кластеризации, использовалась система нечеткого вывода Мамдани [15, 16], для которой входными переменными являлись углы Φ_1 и Φ_2 , а выходными — номера групп, полученные при кластеризации. Результаты проведенной нечеткой кластеризации используются в качестве базы знаний для системы нечеткого вывода.

Для синтеза нечетких правил на основании результатов кластеризации центру каждого кластера было поставлено в соответствие одно нечеткое правило [16] вида если $x = \tilde{x}_i$, то $y = \tilde{y}_i$, где нечеткие термы \tilde{x}_i — «около \tilde{x}_i », \tilde{y}_i — «около \tilde{y}_i », тогда для полученных кластеров правила базы знаний будут соответствовать системе нечетких логических уравнений.

Для аппроксимации многомерной функции принадлежности каждого нечеткого кластера функциями принадлежности термов входных и выходных переменных использовалась гауссова функция принадлежности

$$\mu^t(x) = \begin{cases} e^{-\frac{(x-b)^2}{2c_1^2}}, & x < b, \\ 1, & x = b, \\ e^{-\frac{(x-b)^2}{2c_2^2}}, & x > b, \end{cases}$$

где $\mu^t(x)$ — функция принадлежности переменной x терму t ; b — параметр функции принадлежности, соответствующий координате максимума (в данном случае координата центра кластера); c_1, c_2 — параметры сжатия–растяжения функции принадлежности. Поиск оптимальных параметров функций принадлежности проводился по методу наименьших квадратов отдельно для левой и правой ветвей ее графика.

Для построения модели использовался пакет программ Scilab, сопоставимый по возможностям и интерфейсу с пакетом MATLAB [17, 18]. Для решения задачи нечеткой кластеризации на основе алгоритма нечетких c -средних использовался Fuzzy Clustering and Data Analysis Toolbox.

Результаты и их обсуждение. Для более точной классификации параметров интерференционных картин глаз больных горизонтальным косоглазием мы использовали двухступенчатый алгоритм. На первой ступени разделение на кластеры проводилось по углам Φ_1 и Φ_2 , на второй использованы значения длин отрезков горизонтальной диагонали интерференционного ромба. В результате внутри каждого кластера получено по два подкластера. Такой подход позволяет повысить точность определения вида поражения глазодвигательного аппарата и улучшить качество диагностического процесса.

В табл. 1 приведены координаты центров полученных кластеров. При построении моделей для кластеризации использовались параметры 133 интерференционных картин глаз, для проверки полученных моделей — 17 глаз. Объем первого кластера составил 75 (56 %) глаз, второго — 58 (44 %). Как показала проверка, кластеризация интерференционных картин по углам Φ_1 и Φ_2 осуществляется без ошибок.

Таблица 1

№ кластера	Объем кластера	Показатели интерференционных картин, град	
		Φ_1	Φ_2
1	75 (56 %)	78,3	101,9
2	58 (44 %)	89,2	90,4

Для полученных кластеров правила базы знаний соответствуют системе нечетких логических уравнений:

$$\begin{cases} \mu_{K1}^a(X) = \mu_{\Phi1}^a(x_1) \wedge \mu_{\Phi2}^a(x_2), \\ \mu_{K2}^{\bar{a}}(X) = \mu_{\Phi1}^{\bar{a}}(x_1) \wedge \mu_{\Phi2}^{\bar{a}}(x_2), \end{cases}$$

где $\mu_{K1}^a(X), \mu_{K2}^{\bar{a}}(X)$ — степень выполнения правил нечеткой базы знаний для входного вектора углов $X = (x_1, x_2)$, $\mu_{\Phi1}^a(x_1), \mu_{\Phi2}^a(x_2)$ и $\mu_{\Phi1}^{\bar{a}}(x_1), \mu_{\Phi2}^{\bar{a}}(x_2)$ — функции принадлежности значения показателя нечеткому терму базы знаний.

На рис. 2 показаны графики функций принадлежности для нечетких термов базы знаний.

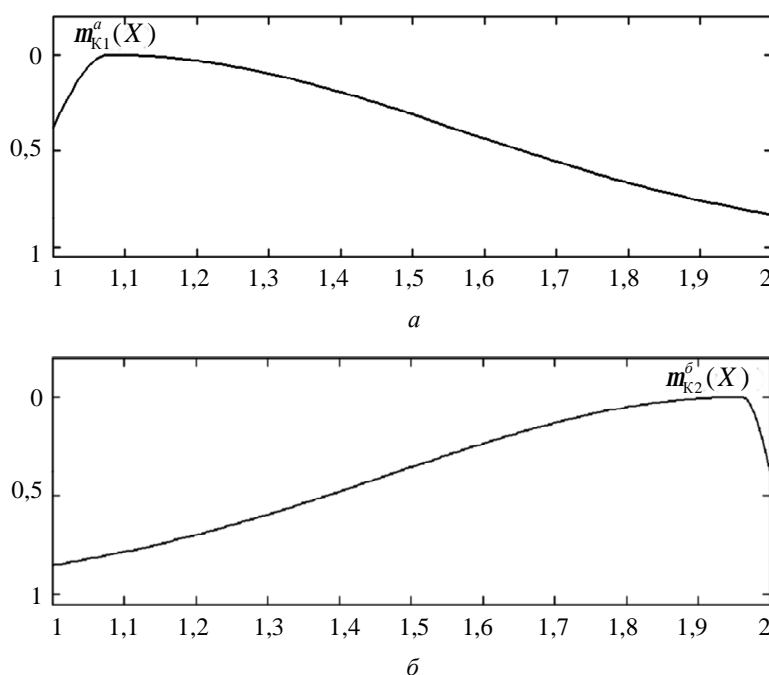


Рис. 2. Функции принадлежности для правил, соответствующих полученным кластерам (a — первый кластер; b — второй)

Для аппроксимации многомерной функции принадлежности каждого нечеткого кластера функциями принадлежности термов входных и выходных переменных были рассчитаны их оптимизированные параметры (табл. 2).

Для оценки адекватности разработанной модели классификации использовался следующий подход: из обучающей выборки извлекалась одна строка, соответствующая набору показателей конкретной интерференционной картины, и синтезировалась модель. По ней вычислялся номер группы, к которой относится выбранный набор показателей. Такая операция проводилась для каждой строки в выборке. Проверка показала, что все интерференционные картины были правильно классифицированы с использованием разработанных функций принадлежности.

Таблица 2

Функция	Параметр b	Параметр c_1	Параметр c_2
$\mu_{\Phi 1}^a$	90,4	16,71	5,24
$\mu_{\Phi 2}^a$	101,9	4,99	18,54
$\mu_{\Phi 1}^b$	78,3	17,09	4,65
$\mu_{\Phi 2}^b$	89,2	5,14	20,07
μ_{K1}^a	1,0770	0,0789	0,4878
μ_{K2}^b	1,9630	0,4915	0,0381

На рис. 3 представлены схемы интерференционных ромбов, соответствующие первому (*a*) и второму (*б*) кластерам. Полученная форма интерференционной картины, соответствующей первому кластеру (рис. 3, *a*), свидетельствует о том, что горизонтальное отклонение глаза обусловлено смещением места прикрепления верхней прямой мышцы от соответствующего меридиана в сторону внутренней прямой мышцы. Как показали клинические наблюдения, при таком расположении мышц наблюдается сходящееся косоглазие [9,10]. Форма интерференционной картины, построенной для второго кластера, сходна с нормальной (см. рис. 1), однако для кластеризации были отобраны показатели с отклонением глаз от ортофорического положения по горизонтали. В этом случае можно предполагать наличие чисто функциональных нарушений ГДМ (усиление или ослабление соответствующих мышц горизонтального действия).

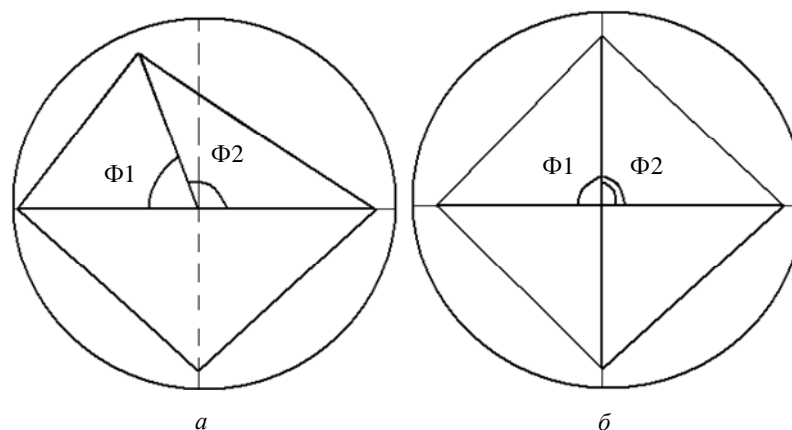


Рис. 3. Схемы интерференционных ромбов первого (*a*) и второго (*б*) кластеров

Для проведения более точной диагностики состояния ГДМ был осуществлен второй этап кластеризации. Для этих целей использовались отрезки горизонтальной диагонали (ОК, ОН) интерференционного ромба (см. рис. 1). В результате кластеризации в каждом из полученных ранее кластеров выделено по два подкластера.

Правило, по которому определялся номер подкластера, состояло в следующем. Если значение выходной переменной больше порога в 1,5, то показатель относится ко второй подгруппе, если меньше — к первой.

Для разделения испытуемых согласно результатам кластеризации, использовалась система нечеткого вывода Мамдани, для которой входными переменными выступали отрезки ОН и ОК, а выходными — номера групп, полученные при кластеризации. Для данных подкластеров правила базы знаний соответствуют системе нечетких логических уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{K1}(X) = \mu_{ОН1}^a(x_1) \wedge \mu_{ОК1}^b(x_2), \\ \mu_{K2}(X) = \mu_{ОН2}^a(x_1) \wedge \mu_{ОК2}^b(x_2), \\ \mu_{K3}(X) = \mu_{ОН3}^a(x_1) \wedge \mu_{ОК3}^b(x_2), \\ \mu_{K4}(X) = \mu_{ОН4}^a(x_1) \wedge \mu_{ОК4}^b(x_2), \\ \mu_{K5}(X) = \mu_{ОН5}^a(x_1) \wedge \mu_{ОК5}^b(x_2), \end{array} \right.$$

где $\mu_{K1}(X), \mu_{K2}(X), \mu_{K3}(X), \mu_{K4}(X), \mu_{K5}(X)$ — степень выполнения правил нечеткой базы знаний для входного вектора отрезков $X = (x_1, x_2)$, $\mu_{ОН}^a(x_1)$, $\mu_{ОК}^b(x_2)$ — функции принадлежности значения длины отрезка горизонтальной диагонали интерференционного ромба нечеткому терму базы знаний.

В результате расчетов получены параметры оптимизированных функций принадлежности показателей интерференционных картин, отнесенных к первому и второму подкластерам первого (табл. 3) и второго (табл. 4) кластера.

Координаты центров подкластеров первого кластера представлены в табл. 5. Ошибка разделения первого кластера на подкластеры, определяемая по описанной выше методике, составляет 7 %. При объеме кластера 75 глаз к первому подкластеру отнесено 27 (36 %) глаз, ко второму — 48 (64 %).

На рис. 4 представлены схемы интерференционных картин, построенные для первого (а) и второго (б) подкластеров первого кластера. Полученные результаты распределения интерференционных картин глаз на подкластеры указывают, что в первом кластере основной причиной косоглазия является смещение места прикрепления верхней прямой мышцы от вертикального меридиана в сторону внутренней прямой мышцы, а не дисбаланс действия горизонтальных мышц (о котором свидетельствует разница в длинах отрезков горизонтальной диагонали). Хотя в первом подкластере может иметь место еще и гиперфункция внутренней прямой мышцы, о чем свидетельствует значительная разница в длинах отрезков горизонтальной диагонали.

Для второго подкластера (рис. 4, б) основной причиной отклонения глаза от ортофорического положения в сторону носа можно считать смещение места прикрепления верхней прямой мышцы, поскольку различия в длинах отрезков горизонтальной диагонали незначительные.

Таблица 3

Функция	Параметр b	Параметр c_1	Параметр c_2
$\mu_{ОН1}^a$	0,4219	0,0048	0,0145
$\mu_{ОН2}^a$	0,4056	0,0054	0,0164
$\mu_{ОН3}^a$	0,4454	0,0074	0,0118
$\mu_{ОН4}^a$	0,4555	0,0140	0,0963
$\mu_{ОН5}^a$	0,4635	0,0094	0,0109
$\mu_{ОК1}^b$	0,3922	0,0082	0,0088
$\mu_{ОК2}^b$	0,3561	0,0109	0,0129
$\mu_{ОК3}^b$	0,3717	0,0076	0,0111
$\mu_{ОК4}^b$	0,4239	0,0188	0,0469
$\mu_{ОК5}^b$	0,3401	0,0177	0,0147
$\mu_{К1}$	1,9999	0,2812	0,0002
$\mu_{К2}$	1,9999	0,2789	0,0002
$\mu_{К3}$	1,9999	0,2812	0,0002
$\mu_{К4}$	1,0000	0,0002	0,2426
$\mu_{К5}$	1,9999	0,2789	0,0003

Таблица 4

Функция	Параметр b	Параметр c_1	Параметр c_2
$\mu_{ОН1}^a$	0,4125	0,0059	0,0178
$\mu_{ОН2}^a$	0,4191	0,0067	0,0171
$\mu_{ОН3}^a$	0,4655	0,0141	0,0118
$\mu_{ОН4}^a$	0,3952	0,0331	0,0198
$\mu_{ОН5}^a$	0,4789	0,0189	0,0592
$\mu_{ОК1}^b$	0,3409	0,0111	0,0135
$\mu_{ОК2}^b$	0,4236	0,0106	0,0132
$\mu_{ОК3}^b$	0,4387	0,0123	0,0213
$\mu_{ОК4}^b$	0,3897	0,0072	0,0079
$\mu_{ОК5}^b$	0,3844	0,0199	0,0086
$\mu_{К1}$	1,9999	0,2653	0,0002
$\mu_{К2}$	1,9999	0,2653	0,0002
$\mu_{К3}$	1,0000	0,0002	0,2449
$\mu_{К4}$	1,9999	0,2653	0,0002
$\mu_{К5}$	1,0000	0,0002	0,2449

Таблица 5

№ подкластера	Объем подкластера	Показатели интерференционных картин, у.е.	
		ОК	ОН
1	27 (36 %)	0,47	0,40
2	48 (64 %)	0,41	0,39

Координаты центров полученных подкластеров второго кластера представлены в табл. 6.

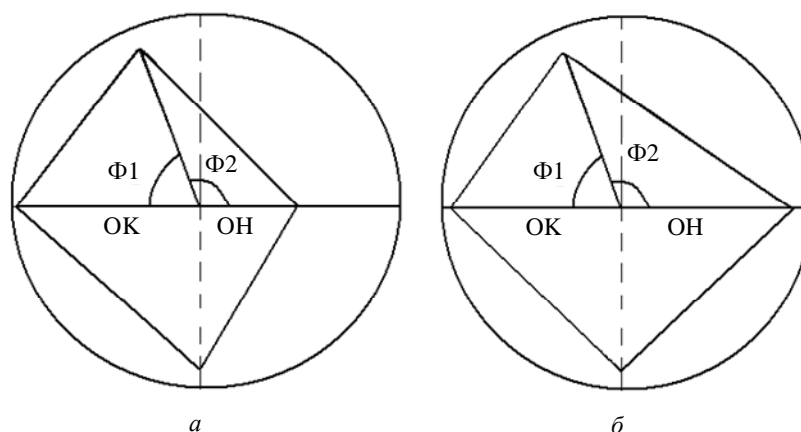


Рис. 4. Схемы интерференционных картин первого (*a*) и второго (*б*) подкластеров первого кластера

Таблица 6

№ подкластера	Объем подкластера	Показатели, у.е.	
		ОК	ОН
1	19 (33%)	0,44	0,43
2	39 (67%)	0,43	0,37

Объем второго кластера 58, ошибка разделения на подкластеры, определяемая по описанной выше методике, составила 12 %, ко второму подкластеру отнесено 39 (67 %) глаз, к первому — 19 (33 %).

Второй кластер, в отличие от первого, сформирован интерференционными картинками, на которых углы между диагоналями ромба прямые, что указывает на отсутствие существенных дислокаций глазодвигательных мышц от линий их действия. На рис. 5 представлены схемы интерференционных картин, построенные для первого (*a*) и второго (*б*) подкластеров второго кластера.

Первый подкластер второго кластера (рис. 5, *a*) образовали симметричные интерференционные картины. Такая форма картин свидетельствует о прикреплении глазодвигательных мышц в области соответствующих меридианов [4]. Горизонтальное отклонение глазного яблока от ортофорического положения в этом случае может быть связано с чисто функциональными нарушениями ГДМ. Ко второму подкластеру второго кластера (рис. 5, *б*)

отнесены картины с более выраженной асимметрией отрезков горизонтальной диагонали. Такой вид интерференционной картины характерен для горизонтального косоглазия, обусловленного дисбалансом действия горизонтальных прямых мышц или смещением места их прикрепления вдоль линии действия. Обычно в таких случаях внутреннюю прямую мышцу хирургически смещают вдоль линии ее действия дальше от лимба, что позволяет создать нормальный баланс действия ГДМ и восстановить ортофорическое положение глаза.

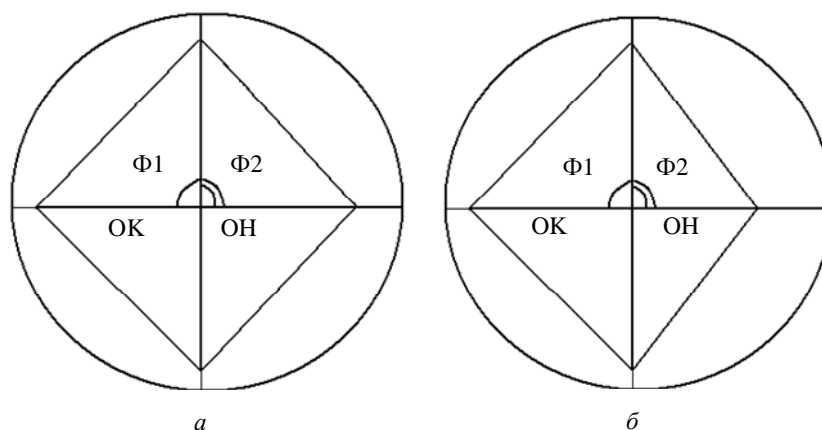


Рис. 5. Схемы интерференционных картин первого (а) и второго (б) подкластера второго кластера

Таким образом, интерференционные картины глаз, отнесенные ко второму кластеру, принадлежат пациентам с более простыми формами поражения ГДМ, которые хорошо поддаются коррекции. Первый кластер образован интерференционными картинками пациентов, отклонение глаз которых по горизонтали обусловлено аномалиями прикрепления верхней прямой мышцы, что с точки зрения хирургического лечения представляет значительную сложность [4, 5, 8]. Предложенные модели позволяют не только классифицировать новых пациентов в соответствующие группы в зависимости от параметров интерференционных картин, но и провести дифференциальную диагностику поражений ГДМ. Модели построены для горизонтального косоглазия, однако данный методический подход может использоваться для разных вариантов отклонения глаз, что позволит получить новую информацию о причинах косоглазия и разработать эффективные методы его лечения.

Как было описано выше, для классификации интерференционных картин глаз больных горизонтальным косоглазием использовался двухступенчатый алгоритм. На первой ступени разделение на кластеры проведено по углам $\Phi 1$ и $\Phi 2$, на второй использованы значения длин отрезков горизонтальной диагонали интерференционного ромба ОК и ОН. В результате внутри каждого кластера получено по два подкластера. Такой подход позволяет более точно разделить интерференционные картины на соответствующие группы и установить причину появления косоглазия.

Обобщенная структурная схема получения моделей для разделения испытуемых на соответствующие группы представлена на рис. 6.

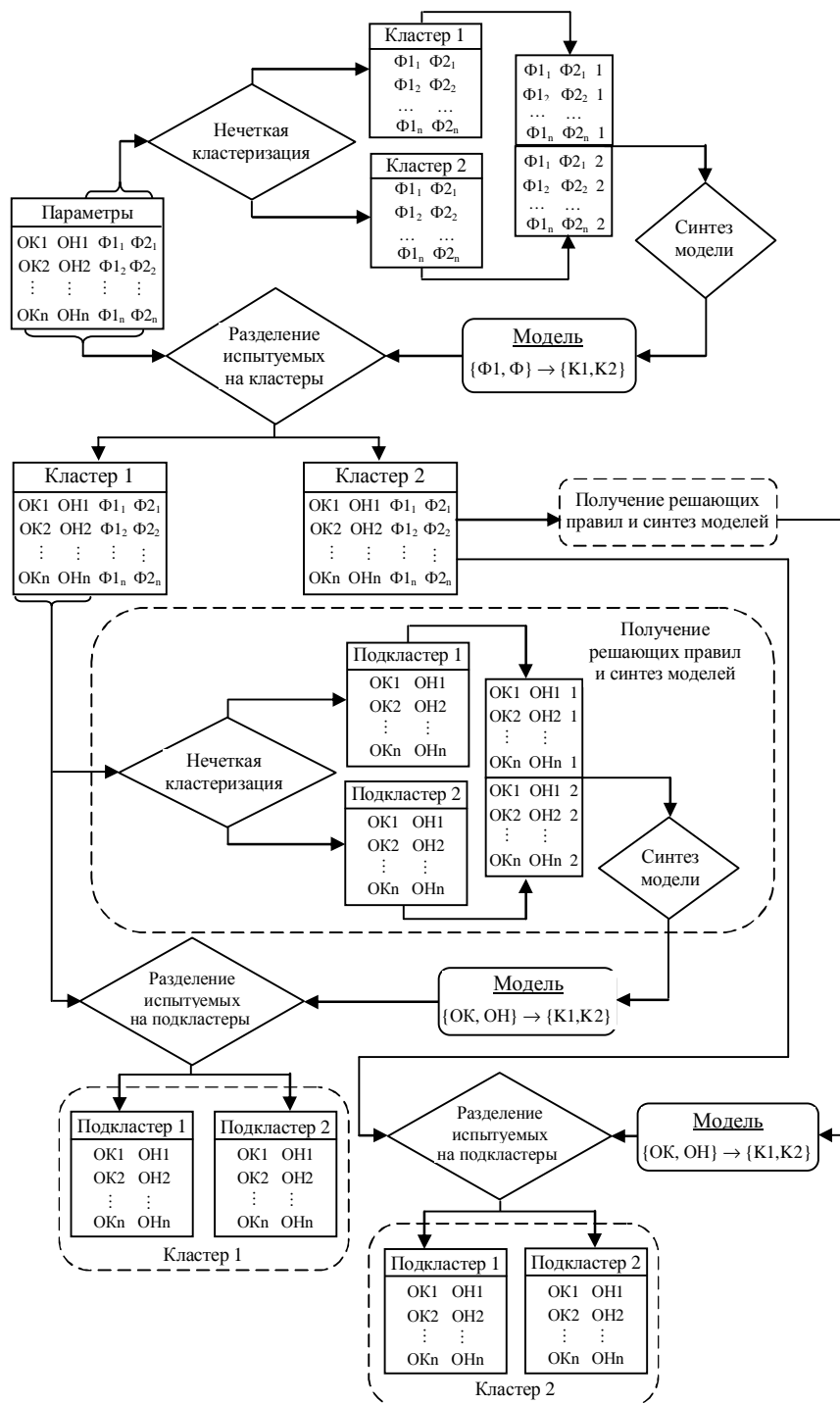


Рис. 6. Структурная схема получения моделей для классификации интерференционных картин при горизонтальном косоглазии

Выводы. Для точного разделения интерференционных картин глаз больных горизонтальным косоглазием на группы наиболее информативными являются углы между диагоналями интерференционного ромба и длины отрезков горизонтальной диагонали. Для классификации параметров интерфе-

ренционных картин глаз больных горизонтальным косоглазием целесообразно использовать двухступенчатый алгоритм.

В результате нечеткой кластеризации 150 интерференционных картин глаз больных горизонтальным косоглазием показано, что отклонения глаз в 56 % случаев обусловлены смещением места прикрепления верхней прямой мышцы от линии действия, из них в 36 % случаев наблюдается дисбаланс действия горизонтальных мышц. При нормальном прикреплении верхней прямой мышцы дисбаланс действия горизонтальных мышц наблюдается в 67 % случаев. Кластеризация по углам $\Phi 1$ и $\Phi 2$ осуществляется без ошибок, ошибка разделения первого кластера на подкластеры по значениям отрезков горизонтальной диагонали ОК и ОН составляет 7 %, второго — 12 %.

1. *Костенко О.А.* Исправлять косоглазие желательно до шести лет. — <http://www.beautyinfo.com.ua/m0c3i904.html>.
2. *Косоглазие.* — <http://www.vision-ua.com/patient/kosoglazz.php>.
3. *О косоглазии у детей.* — <http://www.kindereducation.com/zdorov 26.html>.
4. *Аветисов Э.С.* Содружественное косоглазие. — М.: Медицина, 1977. — 312 с.
5. *Ковалевский Е.И., Гусева М.Р., Грязнов М.И., Холмский А.А.* Научно-практический анализ результатов хирургического этапа лечения детей с врожденным косоглазием // Офтальмол. журн. — 1979. — № 5. — С. 272–275.
6. *Рыков С.А., Сенякина А.С.* Виды косоглазия, их классификация, особенности диагностики и лечения. — <http://www.miroft.org.ua/originalarts/169.html>.
7. *Сердюченко В.И., Дегтярева Н.М.* Клиника и лечение атипичного аккомодационного содружественного сходящегося косоглазия с эксцессом конвергенции // Офтальмол. журн. — 1991. — № 1. — С. 16–20.
8. *Сердюченко В.И.* Результаты хирургического лечения врожденного косоглазия у детей, страдающих детским церебральным параличом // Проблеми екологічної та медичної генетики та клінічної імунології. — Луганськ, 2003. — Вип. 4 (50). — С. 359–364.
9. *Кочина М.Л., Калиманов В.Г.* Исследование и моделирование поляризационно-оптических свойств роговицы глаза при различных состояниях экстраокулярных мышц // Бионика интеллекта. — 2008. — № 2(69). — С. 132–137.
10. *Босенко Т.О.* Диагностика асиметрії зовнішніх м'язів ока у поляризованому світлі при різних видах співдружньої косооконості: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. — Одеса, 1994. — 16 с.
11. *Пеньков М.А., Кочина М.Л.* Интерференционный метод в диагностике косоглазия // Офтальмол. журн. — 1979. — № 8. — С. 497–498.
12. *Пеньков М.А., Алтухер Г.М., Кочина М.Л.* Расчет изохром и изоклин роговой оболочки глаза // Биофизика. — 1982. — 28, вып. 2. — С. 313–316.
13. *Пеньков М.А., Кочина М.Л., Уткин Ю.А.* Анализ интерференционных изохром роговой оболочки глаза и выделение диагностических признаков // Проблемы бионики. — 1983. — Вып. 30. — С. 22–28.
14. *Водовозов А.М., Ковылин В.Б.* Использование поляризационно-оптического метода для диагностики состояния глазодвигательных мышц при вертикальной девиации // Офтальмол. журн. — 1990. — № 4. — С. 201–204.
15. *Babuska R.* Fuzzy Modeling for Control. — Boston: Kluwer Academ. Publ., 1998. — 288 p.
16. *Yager R., Fiiev D.* Essentials of Fuzzy Modeling and Control. — John Wiley & Sons, 1984.
17. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH./БХВ-Петербург. — СПб., 2005. — 736 с.
18. *Штовба С.Д.* Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. — М.: Горячая линия–Телеком, 2007. — 288 с.

Харьковская медицинская академия
последипломного образования,
Харьковский национальный медицинский университет

Получено 31.10.2011