

## Математические модели автоматизации процессов диагностирования больных при предынсультном состоянии

© Н.И. Сидняев, В.В. Гаража

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

*Перед данным исследованием ставится цель определения математической модели, которая могла бы лежать в основе автоматизации процесса диагностирования больных в предынсультном состоянии. Предложено использовать представление диагностируемого человека в виде «черного ящика». Показано, что с помощью такого подхода можно получать оценку состояния больного и накапливать информацию нескольких обследований. Для обнаружения взаимосвязи диагностических параметров и физических состояний человека используется диагностическая матрица. С помощью ряда этапов было получено проверяющее множество, которое локализует множество, подразумевающее сокращение функции различимости с использованием таблицы. После удаления лишних строк по принципу принадлежности было получено булево произведение оставшихся функций для определения минимального диагностического множества. Рассмотренные диагностические матрицы являются детерминированными моделями объектов диагностирования больных при предынсультном состоянии, в которых каждому возможному физическому состоянию поставлена вполне определенная, «жесткая» комбинация условных значений параметров. Рассмотрены преимущества предлагаемой аналитической модели, включающие получение конкретных числовых значений физического состояния человека, что позволяет получить функцию состояния с целью его прогнозирования. Диагностическая матрица предоставляет возможность получить описание всех видов взаимосвязей между физическими состояниями человека и диагностическими параметрами. Полученную модель можно назвать наглядной и относительно простой, что способствует облегчению процесса постановки диагноза. Используемые системы булевых функций на основе диагностических матриц служат основой синтеза логических автоматов для постановки диагноза, способных упростить процесс диагностики и производить его не только в клинических условиях.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, матрица, автомат, булева алгебра, автоматическое обнаружение приступов, инсульт

**Введение.** Инсульт, как правило, сложно предвидеть, и в то же время требуется предпринять срочные меры по оказанию помощи при инсульте. Существуют работы, в которых указывается на то, что предынсультное состояние можно определить за несколько месяцев [1–4]. В связи с этим ученые разрабатывают различные способы профилактики и оценки рисков инсульта [5–8], в том числе идет работа по автоматизации процесса постановки диагноза [9–12].

Цель рассматриваемого исследования — предложить математическую модель, которая будет служить основой логики программы, выполняющей диагностику по полученным признакам, проявившимся за достаточно продолжительное время до самого инсульта.

Непосредственно перед инсультом на фоне поражения головного мозга возникает парез или паралич мимической мускулатуры с одной стороны. Распознать предынсульт можно по слабости мышц верхних конечностей. Пациент не может поднять обе руки сразу над головой и тем более удерживать их в таком положении длительное время. Процесс говорения нарушен, голос слабый, фразы невнятные. Однако это состояние отмечается непосредственно перед инсультом, признаки будущего инсульта могут появляться гораздо раньше, и обнаружить их значительно сложнее, так как к ним могут привести и многие другие недуги. К таким симптомам относятся периодическое помутнение в одном или сразу двух глазах, частые приступы икоты, а также нарушение ритма дыхания и постоянные головные боли, обмороки, онемение и непродолжительный паралич конечностей, а также повышение артериального давления.

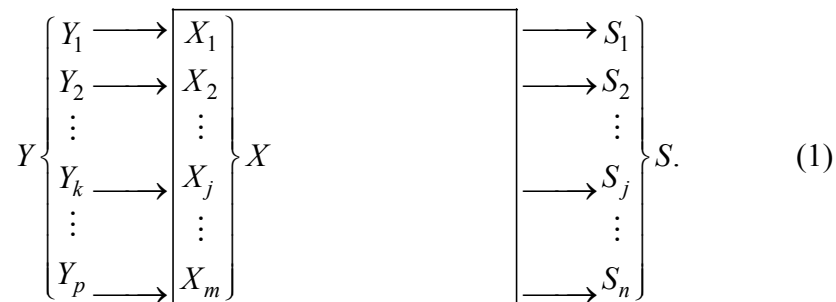
Все симптомы предынсульта подразделяются на генерализованные, или общие, и на очаговые (типичные для поражения конкретной доли мозга). Первые встречаются у пациентов с нарушением мозгового кровообращения. Ухудшение стимуляции отдельных центров головного мозга происходит на фоне ишемии и снижении объема его питания. Тромб уменьшает просвет сосуда, и к стволу поступает меньше крови. На этом этапе могут проявляться признаки, свидетельствующие об угрозе, а также может происходить отмирание тканей от нехватки кислорода. Однако в течение суток тромб может раствориться, питание нормализуется, и тогда объем погибших тканей будет незначительным [13, 14].

**Методы решения проблемы.** Для выделения основных, существенных для постановки диагноза свойств, так или иначе связанных с определением общего состояния больного, пациент заменяется аналитической математической моделью. При этом некоторое множество видов состояний пациента, исключительно важных с точки зрения его функционирования как здорового, предназначенного для выполнения определенной работы, становятся второстепенными и при разработке модели диагностирования как объекта для постановки диагноза могут быть исключены [15].

Замена реальных биологических элементов их идеализированными моделями позволяет широко использовать различные математические методы [16–19]. Под математической моделью объекта диагностирования следует понимать множество аналитических, логических, статистических, графических и вообще любых качественных соотношений, которые связывают выходные параметры человека с его входными и внутренними параметрами [20]. Наиболее универсальной моделью объекта диагностирования является представление его в виде «черного ящика», в частности конечного автомата, входные и выходные параметры которого имели конечное множество значений.

Предполагается, что все возможные состояния пациента образуют конечное множество состояний. В данном случае пациент является «черным ящиком» не потому, что его внутренняя структура и параметры неизвестны, а потому, что поставлена задача — определить состояние обследуемого, исследуя только его выходные параметры [21].

**Описание модели и поиск множеств.** «Черный ящик», являющийся моделью объекта диагностирования, представлен в следующем виде:



Здесь  $Y$  — множество входных воздействий;  $X$  — множество внутренних состояний;  $S$  — множество выходных сигналов.

Оператор  $A$  преобразует множество всех входных воздействий  $Y$  от стимулирующих лекарств и внешней среды и множество всех структурных параметров наблюдаемого  $X$  в множество всех выходных (диагностических) параметров  $S$ :

$$S = A\{Y, X\}. \quad (2)$$

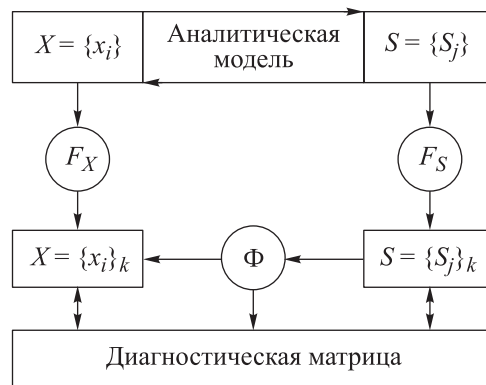
Поскольку при диагностировании элементы множества  $Y$  стабилизируются (или изменяются по заданному закону), выражение (2) примет вид

$$S = A\{X\}. \quad (3)$$

Иными словами, любой выходной параметр диагностируемого больного является функцией его физического состояния при данном состоянии входов. Если параметры физического состояния обследуемого  $\{x_i\}$  отнести к выходным параметрам автомата, то диагностическая задача формулируется следующим образом: по известным значениям выходных параметров  $\{S_i\}$  нужно определить неизвестные значения входных параметров  $\{x_i\}$  [22]. Для успешного решения этой задачи требуется знать вид оператора  $A$ , иными словами, необходимо иметь исчерпывающее описание связей между всеми выходными параметрами и всеми возможными состояниями (болезнями) пациента.



описываются в виде так называемых диагностических матриц. В диагностике больных они носят название таблиц отклонений от нормы. Синтез матриц такого рода проводится в определенной последовательности, представленной на рисунке. Сначала составляется полный перечень возможных болезней при диагностировании, основанный на анализе опыта и поведения больного. Затем из полученного перечня исключаются с использованием статистических оценок редко встречающиеся или несущественные признаки болевых ощущений [23, 24].



Блок-схема синтеза диагностической матрицы:

$X = \{x_i\}$  — бесконечное множество физических состояний объекта;  $X = \{x_i\}_k$  — конечное множество физических состояний;  $S = \{s_j\}$  — бесконечное множество симптомов;  $S = \{s_j\}_k$  — конечное множество симптомов;  $F_X$  — оператор, преобразующий множество  $X$ ;  $F_S$  — оператор, преобразующий множество  $S$

На пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца ставится 1 тогда, когда при наличии  $i$ -го отклонения от нормы наблюдается выход  $j$ -го диагностического параметра из области его допустимых значений, а в противном случае ставится нуль.

Для синтеза такой матрицы необходимо бесконечное множество физических состояний больного заменить конечным множеством физических состояний, каждое из которых связано с определенной болезнью (или их комбинацией) или со здоровым состоянием. Такое преобразование может быть записано в виде

$$\{x_i\}_k = F_x \{x_i\}, \quad (5)$$

где  $\{x_i\}_k$  — конечное множество параметров больного при диагностировании, каждый из которых может принимать лишь два условных значения — 0 и 1, соответствующих отсутствию и наличию  $i$ -го

заболевания:  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $F_x$  — оператор, преобразующий множество  $\{x_i\}$  во множество  $\{x_i\}_k$  следующим образом: для любого  $i$  параметру  $x_i$  присваивается значение 0, если величина  $x_i$  лежит в области допустимых значений, а в противном случае присваивается значение 1;  $\{x_i\}$  — множество структурных параметров больного при диагностировании, каждый из которых может принимать в общем случае бесконечное множество значений в определенном интервале.

Преобразование бесконечного множества симптомов в конечное множество симптомов можно записать в виде

$$\{S_j\}_k = F_S \{S_j\}. \quad (6)$$

Здесь  $\{S_j\}_k$  — конечное множество диагностических симптомов, каждый из которых может принимать только два условных значения — 0 и 1;  $j = 1, 2, \dots, n$ ;  $F_S$  — оператор, преобразующий множество  $\{S_j\}$  во множество  $\{S_j\}_k$  следующим образом: любому  $j$  параметру  $S_j$  присваивается условное значение 0, если величина  $S_j$  лежит в области значений, соответствующих исправному состоянию объекта диагностирования, и присваивается условное значение 1 в противном случае;  $\{S_j\}$  — множество симптомов, каждый из которых может принимать в общем случае бесконечное множество значений в определенном интервале.

В результате проведенных преобразований получено два конечных множества  $\{x_i\}_k$  и  $\{S_j\}_k$ , элементы которых определенным образом связаны друг с другом.

В общем виде эта связь может быть выражена так:

$$\{S_j\}_k = \Phi \{x_i\}_k, \quad (7)$$

где  $\Phi$  — оператор, преобразующий множество физических состояний больного во множество диагностических параметров.

Преобразование (7) отражает функционирование любого наблюдаемого пациента как преобразователя множества структурных параметров во множество диагностических параметров, и оно является модификацией модели (4).

Преобразование (4) можно развернуть следующим образом:

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \varphi_1(x_1, x_2, \dots, x_i); \\
 S_2 &= \varphi_2(x_1, x_2, \dots, x_i); \\
 &\dots\dots\dots \\
 S_j &= \varphi_j(x_1, x_2, \dots, x_i).
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Система уравнений (8) связывает каждый диагностический параметр  $S_j$  со всеми структурными параметрами объекта диагностирования. В этом смысле она аналогична системе уравнений (4), отражающей связи между структурными параметрами и диагностическими сигналами в аналитической модели объекта диагностирования. Различие заключается в классе функций  $\varphi_j$ . Действительно, в системе уравнений (7) функции  $\varphi_j$  обладают следующими свойствами: каждый аргумент  $x_i$  функции  $\varphi_j$  может принимать лишь два значения — 0 и 1; каждая функция  $\varphi_j$  также может принимать лишь два значения — 0 и 1. Эти свойства функций позволяют отнести их к классу двузначных булевых функций, являющихся основным математическим инструментом для анализа дискретных систем автоматики и вычислительной техники. Рассмотрение с изложенных выше позиций диагностической матрицы как модели объекта диагностирования показывает, что она является, по сути, табличной формой записи системы уравнений (7). Действительно, каждому столбцу матрицы (8) соответствует определенная болезнь. Каждой  $i$ -й болезни поставлен в соответствие конкретный структурный параметр  $x_i$ , принимающий два значения: 1 — при наличии заболевания, 0 — при ее отсутствии. (Конкретные структурные параметры в матрице обычно не указываются.) Каждой строке диагностической матрицы соответствует определенный диагностический параметр  $S_j$ , принимающий, как уже было показано, также два значения: 0 и 1. Диагностический параметр  $S_j$  в матрице кровообращения мозга можно рассматривать как двузначную булеву функцию, существенно зависящую от аргументов  $x_1$ ,  $x_6$  и  $x_9$ . Булева функция существенно зависит от аргумента  $x_1$ , если имеет место соотношение

$$\varphi(x_1, x_2, \dots, x_{l-1}, 0, x_{l+1}, \dots, x_m) \neq \varphi(x_1, x_2, \dots, x_{l-1}, 1, x_{l+1}, \dots, x_m). \tag{9}$$

Как следует из данного определения,  $S_1$  существенно зависит только от трех указанных переменных.

В данном случае зависимость  $S_1 = \varphi_1(x_1 + x_6 + x_9)$  выражается в виде дизъюнкции (или функции логического сложения [25])

$$S_1 = x_1 + x_6 + x_9. \tag{10}$$

Соответствующий анализ остальных диагностических параметров позволяет записать систему уравнений (10) для данной диагностической матрицы в виде

$$\begin{cases} S_1 = x_1 + x_6 + x_9; \\ S_2 = x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_8 + x_{10}; \\ S_3 = x_7 + x_{11}; \\ S_4 = x_1; \\ S_5 = x_4 + x_7 + x_8 + x_{10} + x_{11}; \\ S_6 = x_5 + x_9; \\ S_7 = x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11}; \\ S_8 = x_8 + x_{11}; \\ S_9 = x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + x_8 + x_{11}; \\ S_{10} = x_2. \end{cases} \quad (11)$$

Все последовательные преобразования, приводящие к синтезу модели больного при диагностировании в виде диагностической матрицы, наглядно представлены на блок-схеме, приведенной на рисунке. В том случае, когда модель больного при диагностировании представлена в виде матрицы, диагностическая задача формулируется следующим образом. По данным значениям диагностических параметров  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , полученным при диагностическом обследовании, следует определить значения структурных параметров  $X_1, X_2, \dots, X_m$  в момент проверки, если известны функциональные зависимости между диагностическими параметрами и всеми структурными параметрами, заданные в виде диагностической матрицы или системы уравнений типа (11). Каждый структурный параметр и каждый диагностический параметр принимают только два значения: 0 и 1. Очевидно, для решения диагностической задачи необходимо обратное преобразование множества диагностических параметров в множество структурных параметров, так как при постановке диагноза известными являются именно значения диагностических параметров. В общем виде обратное преобразование можно представить выражением  $\{x_i\}_k = \Phi^{-1} \{S_j\}_k$  или в развернутом виде:

$$\begin{cases} x_1 = f_1(S_1, S_2, \dots, S_n); \\ x_2 = f_2(S_1, S_2, \dots, S_n); \\ x_m = f_m(S_1, S_2, \dots, S_n). \end{cases} \quad (12)$$

Вид функций  $f_i$  нетрудно установить в каждом конкретном случае на основе следующих рассуждений. В диагностической матрице,



составленной на основе системы уравнений (11), рассмотрим отдельно один из столбцов, например второй. Из матрицы видно, что наличие признаков нарушения кровообращения  $x_2$  определяется одновременным выходом трех диагностических параметров  $S_2$ ,  $S_9$  и  $S_{10}$  из области их допустимых значений. Значения остальных диагностических параметров при наличии только признаков  $x$  остаются в пределах нормы. Значит,  $x_2$  является булевой функцией, в данном случае конъюнкцией (или функцией логического умножения):

$$x_2 = S_2 S_9 S_{10}. \quad (13)$$

Соответствующий анализ всех остальных столбцов рассматриваемой матрицы позволяет записать обратное преобразование (11) в виде системы булевых функций (конъюнкций):

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = S_1 S_4; \\ x_2 = S_2 S_9 S_{10}; \\ x_3 = S_2 S_9; \\ x_4 = S_2 S_5 S_9; \\ x_5 = S_2 S_6 S_9; \\ x_6 = S_1 S_2; \\ x_7 = S_3 S_5 S_7 S_9; \\ x_8 = S_2 S_5 S_7 S_8 S_9; \\ x_9 = S_1 S_6 S_7; \\ x_{10} = S_2 S_5 S_7; \\ x_{11} = S_3 S_5 S_7 S_8 S_9. \end{array} \right. \quad (14)$$

Как следует из этого примера, процесс постановки диагноза на основе модели больного при диагностировании, выраженной в виде диагностической матрицы, состоит из следующих этапов. Сначала путем соответствующих измерений и преобразования (14) устанавливаются значения всех диагностических параметров:

$$S_1, S_2, \dots, S_n. \quad (15)$$

Затем их значения подставляются в систему булевых функций (8). После этого вычисляются значения всех булевых функций болезней  $x_i (i = 1, 2, \dots, m)$ , причем если  $x_i = 1$ , то в объекте имеется  $i$ -я болезнь.

Конечная цель разработки всякой модели объекта диагностирования — возможность решения диагностической задачи. Поэтому вопрос осуществимости диагноза на основе разработанной модели имеет принципиальное значение. Под осуществимостью диагноза

следует понимать получение однозначного ответа о состоянии пациента в рамках принятых допущений о возможных состояниях при наличии любой непротиворечащей физическим представлениям комбинации значений диагностических параметров. Применительно к рассматриваемой модели это означает, что в системе булевых функций (14) нет ни одной пары равных функций.

Возвращаясь к приведенной блок-схеме преобразования множеств, можно в общем виде сформулировать условие осуществимости диагноза следующим образом: для осуществимости диагноза достаточно, чтобы обратное преобразование множества диагностических параметров во множество структурных параметров (болезней) пациента было однозначным.

Если при синтезе диагностической матрицы не выполнено это условие и в системе (14) имеются две или более двух равных функций, то перечень диагностических параметров необходимо дополнить таким новым параметром, который вошел бы в качестве дополнительного аргумента только в одну из рассматриваемых равных функций.

Минимальное проверяющее множество целесообразно построить в два этапа: сначала сформировать все возможные проверяющие множества (в том числе и минимальные), а затем из заданной совокупности всех проверяющих множеств выделить множество минимальной длины. Такой метод синтеза позволяет получить не только минимальное проверяющее множество, но и ряд множеств, близких по длине к минимальному, что дает возможность выбора оптимального множества с учетом различных критериев оптимальности. Изложенные выше положения легли в основу методики построения проверяющих, локализирующих и диагностических множеств, которую можно проиллюстрировать на примере обобщенной диагностической матрицы кровообращения головного мозга (табл. 1).

*На первом этапе* в исходной матрице проверяют выполнение условия различимости болезней. При невыполнении условия различимости все строки матрицы разбиваются на группы, включающие строки с одинаковыми комбинациями единиц и нулей. Затем в каждой из этих групп оставляется одна любая строка, объединяющая все неразличимые заболевания данной группы, а остальные строки вычеркиваются. В дальнейшем, если в процессе постановки диагноза наблюдается комбинация значений диагностических симптомов (единиц и нулей), соответствующая строке из какой-либо группы, то следует иметь в виду, что в этом случае в объекте диагностирования возможно существование любой болезни из данной группы. В рассматриваемом примере условие различимости болезней выполняется.

*На втором этапе* множество диагностических симптомов исходной матрицы разбивают на группы, включающие столбцы с одинаковыми комбинациями единиц и нулей по вертикали. В каждой такой

Таблица 1

**Обобщенная диагностическая матрица**

Отклонения	Диагностические симптомы												
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{13}$
$x_1$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
$x_2$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$x_3$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
$x_4$	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1
$x_5$	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
$x_6$	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1
$x_7$	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
$x_8$	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1
$x_9$	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1

группе оставляется один столбец, а остальные вычеркиваются. В рассматриваемом примере (14) есть две такие группы:  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_5$  и  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ , поэтому оставляем в матрице симптомы  $S_1$  и  $S_{11}$ .

На третьем этапе выявляют, что все симптомы имеют единицы во всех строках матрицы, которые не несут какой-либо информации о конкретных болезнях диагностируемого пациента, и их можно вычеркнуть. В связи с этим в рассматриваемом примере вычеркивается симптом  $S_4$  (табл. 2).

Таблица 2

**Обобщенная диагностическая матрица после преобразований**

Отклонения	Диагностические симптомы									
	$S_1$	$S_3$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11}$	$S_{13}$	
$x_1$	1	1	1	1	1	1	1	0	0	
$x_2$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
$x_3$	1	1	1	1	1	1	1	0	1	
$x_4$	1	1	0	1	1	1	0	0	1	
$x_5$	1	1	0	0	0	1	0	0	0	
$x_6$	1	1	0	1	0	1	0	1	1	

Отклонения	Диагностические симптомы								
	$S_1$	$S_3$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11}$	$S_{13}$
$x_7$	0	1	0	0	0	0	1	0	1
$x_8$	1	1	0	0	0	0	1	0	1
$x_9$	1	1	0	1	0	1	0	0	1

На четвертом этапе для построения проверяющих множеств записывают выражения для всех булевых функций болезней:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = S_1 S_3 S_6 S_7 S_8 S_9 S_{10}; \\ x_2 = S_{10}; \\ x_3 = S_1 S_3 S_6 S_7 S_8 S_{10} S_{13}; \\ x_4 = S_1 S_3 S_7 S_8 S_9 S_{13}; \\ x_5 = S_1 S_3 S_9; \\ x_6 = S_1 S_3 S_7 S_9 S_{11} S_{13}; \\ x_7 = S_3 S_{10} S_{13}; \\ x_8 = S_1 S_3 S_{10} S_{13}; \\ x_9 = S_1 S_3 S_7 S_9 S_{13}. \end{array} \right. \quad (16)$$

Поскольку объект работоспособен только тогда, когда отсутствуют все возможные болезни, функция работоспособности будет иметь вид

$$F_p = \overline{x_1 + x_2 + \dots + x_9}. \quad (17)$$

Используя известную теорему булевой алгебры  $A + AB = A$ , можно провести предварительные преобразования с учетом системы (16):

$$x_2 + x_1 + x_3 + x_7 + x_8 = x_2; \quad (18)$$

$$x_5 + x_4 + x_9 + x_6 = x_5. \quad (19)$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} F_p &= \overline{x_2 + x_5} = \overline{S_{10} + S_1 S_3 S_9} = \overline{S_{10}} (\overline{S_1} + \overline{S_3} + \overline{S_9}) = \\ &= \overline{S_{10}} \overline{S_1} + \overline{S_{10}} \overline{S_3} + \overline{S_{10}} \overline{S_9} = T_{n1} + T_{n2} + T_{n3}. \end{aligned} \quad (20)$$

В итоге получены три минимальных проверяющих множества одинаковой длины. Окончательный выбор проверяющего множества выполняется при построении диагностического множества.

**Заключение.** Представлена модель диагностирования пациентов для получения однозначного ответа о состоянии (в рамках принятых допущений о возможных состояниях) при наличии любой непротиворечащей физическим представлениям комбинации значений диагностических параметров. Сформулированы в общем виде условия осуществимости диагноза следующим образом: для реализации диагноза достаточно, чтобы обратное преобразование множества диагностических параметров во множество структурных параметров (болезней) пациента было бы однозначным. Получена диагностическая матрица как модель больного при диагностировании, которая позволяет отметить ряд ее существенных преимуществ. Диагностическая матрица дает содержательное описание всех видов взаимосвязей между структурными и диагностическими параметрами больного (аналитические функции, статистические зависимости, качественные логические связи, таблицы, графики, графы и т. д.) на одном математическом уровне в виде систем булевых функций, и поэтому может служить универсальной моделью любого сложного больного при диагностировании.

Определен примерный состав множества диагностических симптомов, которые определяются в результате исследований конкретного больного при диагностировании, в том числе:

- априорно выбирается возможно более полная совокупность параметров выходных процессов, подлежащих контролю с учетом доступности измерений и наличия необходимой измерительной аппаратуры;

- измеряются значения всех диагностических сигналов априорно выбранной совокупности состояний при отсутствии в пациенте болезней для определения зоны допустимых значений каждого сигнала;

- в обследуемом пациенте поочередно моделируется каждая из возможных болезней и фиксируется реакция каждого диагностического сигнала на наличие каждой болезни;

- по результатам устанавливаются предельные значения каждого диагностического сигнала, и проводится их квантование для обеспечения допускового контроля;

- корректируется, если это необходимо, априорная совокупность параметров, подлежащих измерению: из совокупности удаляются параметры, нечувствительные к появлению болезней (симптомов) в исследуемом объекте;

- составляется диагностическая матрица.

Изложенный метод определения совокупности диагностических сигналов, подлежащих контролю при диагностировании пациента, дает возможность синтезировать достаточно представительную диагностическую матрицу, с помощью которой можно успешно решать задачу определения действительного физического состояния пациента в рамках заданного перечня болезней.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Каленова И.Е., Шмырев В.И., Бояринцев В.В., Четкарев Ю.Э., Ардашев В.Н. Прогнозирование возникновения ишемического инсульта. *Клиническая медицина*, 2013, т. 91, № 9, с. 48–52.
- [2] Ozaltin O., Coskun O., Yeniay O., Subasi A. A deep learning approach for detecting stroke from brain CT images using OzNet. *Bioengineering*, 2022, vol. 9, no. 12, p. 783.
- [3] Мухаметзянов А.М., Шарафутдинова Н.Х., Ижбульдина Г.И., Усманов З.Н. Первичная профилактика инсульта в условиях многопрофильной поликлиники. *Современные проблемы науки и образования*, 2015, № 3, с. 213. URL: <https://s.science-education.ru/pdf/2015/3/459.pdf>
- [4] Мартынов Е.В. Дифференциальная диагностика инсультов в молодом возрасте. Клинический случай. *Вселенная мозга*, 2019, т. 1, № 2, с. 27–29.
- [5] Zihni E., Madai V.I., Livne M., Galinovic I., Khalil A.A., Fiebach J.B., Frey D. Opening the black box of artificial intelligence for clinical decision support: A study predicting stroke outcome. *PLoS One*, 2020, vol. 15, no. 4, e0231166.
- [6] Федоренко Е.И., Сысоев О.М., Фарманян Х.А. Профилактика инсульта в молодом возрасте. *Интеллектуальный и научный потенциал XXI века: сборник статей Международной научно-практической конференции (22 мая 2017 г., г. Волгоград)*. В 4 ч. Уфа, МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2017, ч. 4, с. 116–117.
- [7] Ляшенко Е.А. Роль калия и магния в профилактике инсульта. *РМЖ*, 2012, т. 20, № 19, с. 960–962.
- [8] Мешкова К.С., Гудкова В.В., Стаховская Л.В. Факторы риска и профилактика инсульта. *Земский врач*, 2013, № 2 (19), с. 16–19.
- [9] Гунькин А.М., Пономарев И., Примаченко Г.К. Разработка системы оповещения о предынсультном состоянии человека. *Гагаринские чтения-2017*. Москва, МАИ, 2017, с. 941–942.
- [10] Xu W., Lin J., Gao M., Chen Y., Cao J., Pu J., Qian K. Rapid computer-aided diagnosis of stroke by serum metabolic fingerprint based multi-modal recognition. *Advanced Science*, 2020, vol. 7, no. 21, p. 2002021.
- [11] Yang C.C. Explainable artificial intelligence for predictive modeling in healthcare. *Journal of Healthcare Informatics Research*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 228–239.
- [12] Кычкин А.В. Интеллектуальная информационно-диагностическая система для исследований кровеносных сосудов. *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*, 2013, № 3, 114 с.
- [13] Березников А.И., Шевякин В.Н., Солошенко С.В., Крюков А.А. Прогнозирование, дифференциальная диагностика и управление комбинированной терапией тромбозов центральной вены сетчатки и ее ветвей. *Системный анализ и управление в биомедицинских системах*, 2008, т. 7, № 4, с. 999–1004.
- [14] Котов С.В., Исакова Е.В. Инсульт: диагностика, лечение. *Альманах клинической медицины*, 2004, № 7, с. 275–294.
- [15] Кандыба Д.В. Инсульт. *Российский семейный врач*, 2016, т. 20, № 3, с. 5–15.
- [16] Джаубаева З.К., Джанибекова Т.Т. Исследование математических моделей. *III Всерос. науч.-практич. конф. «Современные проблемы математического образования»*. Карачаевск, 2018, с. 110–113.
- [17] Сайлаубеков Н.Т. Принципы разработки аналитических моделей. *Вестник КазЭУ*, 2009, № 1, с. 291–294.
- [18] Братусь А., Новожилов А., Платонов А. *Динамические системы и модели в биологии*. Москва, Litres, 2022, 390 с.
- [19] Гадалов В.Н., Корневский Н.А., Снопков В.Н. Математические модели рефлекторных систем организма человека и их использование для прогно-

- зирования и диагностики заболеваний. *Системный анализ и управление в биомедицинских системах*, 2012, т. 11, № 2, с. 515–521.
- [20] Кортузов Д.Е., Горбенко А.Ю., Павлова А.И. Исследование операций с нечеткими множествами. *Современные материалы, техника и технологии*, 2016, № 1 (4), с. 98–103.
- [21] Антонова Г.М. Эволюция терминов «черный ящик» и «серый ящик». *Вестник Московского финансово-юридического университета*, 2012, № 1, с. 16–19.
- [22] Ермаков А.Д., Евтушенко Н.В. К синтезу адаптивных проверяющих последовательностей для недетерминированных автоматов. *Труды Института системного программирования РАН*, 2016, т. 28, № 3, с. 123–144.
- [23] Артеменко М.В. Синтез диагностических матриц при скрининге. *Успехи современного естествознания*, 2004, № 12, с. 33–34.
- [24] Раджабов А.Г., Хайдаров А.Х. Применение программируемых логических матриц для медицинских исследований. *Цифровой регион: опыт, компетенции, проекты*, 2018, с. 403–406.
- [25] Шевелев С.С., Кобелев Н.С., Кобелев В.Н. Устройство выполнения логических операций. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*, 2011, № 2, с. 50–56.

Статья поступила в редакцию 19.06.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сидняев Н.И., Гаража В.В. Математические модели автоматизации процессов диагностирования больных при предынсультном состоянии. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 8. EDN LQSGXK

**Сидняев Николай Иванович** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика» научно-учебного комплекса «Фундаментальные науки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Научные интересы: математическое моделирование, аэродинамика пространственных тел и крыльев при сверх- и гиперзвуковых скоростях, теория конических сверхзвуковых течений газа, взаимодействие ударных волн с пограничным слоем. e-mail: Sidnyaev@bmstu.ru

**Гаража Владислав Владленович** — инженер кафедры «Высшая математика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Научные интересы: статистическая оценка, математическое моделирование, языкознание. e-mail: garazha@bmstu.ru

## Mathematical models to automate diagnostic processes with patients in a pre-stroke condition

© N.I. Sidnyaev, V.V. Garazha

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

*This study objective is to define a mathematical model that could underlie automation of the diagnostic processes with patients in a pre-stroke condition. The paper proposes to use a “black box” representation of a person being diagnosed. It shows that this approach could be used to assess the patient's condition and accumulate information from several examinations. A diagnostic matrix is used to identify relationship between the diagnostic parameters and the person's physical condition. The work applied a number of stages to obtain a testing set and a localizing set, which implies reducing the distinguishability function using a table. After removing unnecessary lines according to the membership principle, the Boolean product of the remaining functions was obtained to determine the minimum diagnostic set. The considered diagnostic matrices are the deterministic models of objects of diagnosing patients in the pre-stroke condition, where each possible physical state is assigned with a well-defined rigid combination of the conditional parameter values. The paper considers advantages of the proposed analytical model, which includes obtaining specific numerical values of a person's physical state making it possible to identify the person's function state for its further prediction. The diagnostic matrix provides an opportunity to receive a description of all types of relationships between the physical states of a person and the diagnostic parameters. The resulting model could be called illustrative and relatively simple, which helps in facilitating the diagnostics process. The Boolean function used systems are based on the diagnostic matrices and serve as the foundation in synthesizing logical automata for diagnostics capable of simplifying the diagnostics process and carrying it out not only in the clinical settings.*

**Keywords:** mathematical simulation, matrix, automaton, Boolean algebra, attack automatic detection, stroke

### REFERENCES

- [1] Kalenova I.E., Shmyrev V.I., Boyartsev V.V., Chetkarev Yu.E., Ardashev V.N. Prognostirovanie vozniknoveniya ishemicheskogo insulta [Prognostication of the probability of ischemic stroke]. *Klinicheskaya meditsina — Clinical Medicine*, 2013, vol. 91, no. 9, pp. 48–52.
- [2] Ozaltin O., Coskun O., Yeniay O., Subasi A. A Deep Learning Approach for Detecting Stroke from Brain CT Images Using OzNet. *Bioengineering*, 2022, vol. 9, no. 12, p. 783.
- [3] Mukhametzianov A.M., Sharafutdinova N.Kh., Izbul'dina G.I., Usmanov Z.N. Pervichnaya profilaktika insulta v usloviyakh mnogoprofil'noy polikliniki [Primary prevention of stroke in multidisciplinary clinic]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya — Modern Problems of Science and Education*, 2015, no. 3, p. 213. Available at: <https://s.science-education.ru/pdf/2015/3/459.pdf>
- [4] Martynev E.V. Differentsial'naya diagnostika insultov v molodom vozraste. Klinicheskiy sluchay [Differential diagnostics of strokes in young age. Clinical case]. *Vselennaya mozga — Brain Universe*, 2019, vol. 1, no. 2, pp. 27–29.
- [5] Zihni E., Madai V.I., Livne M., Galinovic I., Khalil A.A., Fiebach J.B., Frey D. Opening the black box of artificial intelligence for clinical decision support: A study predicting stroke outcome. *PLoS One*, 2020, vol. 15, no. 4, p. e0231166.



- [6] Fedorenko E.I., Sysoev O.M., Farmanian Kh.A. Profilaktika insulta v molodom vozraste [Stroke prevention at a young age]. *Intellektualnyi i nauchnyi potentsial XXI veka: sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konf. (mai 22, 2017 Volgograd)* [Intellectual and scientific potential of the 21st century: Collection of papers of the Int. research and practical conf. (May 22, 2017, Volgograd)]. In 4 parts. Ufa, MTsII Omega Science, 2017, part 4, pp. 116–118.
- [7] Lyashenko E.A. Rol kaliya i magniya v profilaktike insulta [The role of potassium and magnesium in stroke prevention]. *RMZh — Russian Medical Inquiry*, 2012, vol. 20, no. 19, pp. 960–962.
- [8] Meshkova K.S., Gudkova V.V., Stakhovskaya L.V. Faktory riska i profilaktika insulta [Risk factors and prevention of stroke]. *Zemskiy vrach*, 2013, no. 2 (19), pp. 16–19.
- [9] Gunkin A.M., Ponomarev I., Primachenko G.K. Razrabotka sistemy opovesheniya o predinsultnom sostoyanii cheloveka [Development of a system for warning about a person's pre-stroke condition]. In: *Gagarinskie chteniya* [Gagarin Readings]. Moscow, MAI Publ., 2017, pp. 941–942.
- [10] Xu W., Lin J., Gao M., Chen Y., Cao J., Pu J., Qian K. Rapid computer-aided diagnosis of stroke by serum metabolic fingerprint based multi-modal recognition. *Advanced Science*, 2020, vol. 7, no. 21, p. 2002021.
- [11] Yang C.C. Explainable artificial intelligence for predictive modeling in healthcare. *Journal of healthcare informatics research*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 228–239.
- [12] Kychkin A.V. Intellektualnaya informatsionno-diagnosticheskaya sistema dlya issledovaniy krovenosnykh sosudov [Intelligent information and diagnostic system for examining blood vessels]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya — Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2013, no. 3, p. 114.
- [13] Berezников A.I., Shevyakin V.N., Soloshenko S.V., Kryukov A.A. Prognozirovanie, differentsialnaya diagnostika i upravlenie kombinirovannoy terapiy trombozov tsentralnoy veny setchatki i ee vetvey [Forecasting, differential diagnostics and management of combined therapy of thrombosis of the central retinal vein and its branches]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh — System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2008, vol. 7, no. 4, pp. 999–1004.
- [14] Kotov S.V., Isakova E.V. Insult: diagnostika, lechenie [Stroke: diagnostics, treatment]. *Almanakh klinicheskoy meditsiny — Almanac of Clinical Medicine*, 2004, no. 7, pp. 275–294.
- [15] Kandyba D.V. Insult [Stroke]. *Rossiyskiy semeyniy vrach — Russian Family Doctor*, 2016, vol. 20, no. 3, pp. 5–15.
- [16] Dzhaubaeva Z.K., Dzhaniybekova T.T. Issledovanie matematicheskikh modeley [Research of mathematical models]. *Sovremennyye problemy matematicheskogo obrazovaniya: materialy III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern problems of mathematical education: materials of the III All-Russian. research and practical conf.]. Karachaevsk, 2018, pp. 110–113.
- [17] Saylaubekov N.T. Printsipy razrabotki analiticheskikh modeley [Principles of development of analytical models]. *Vestnik KazEU — Central Asian Economic Review*, 2009, no. 1, pp. 291–294.
- [18] Bratus A., Novozhilov A., Platonov A. *Dinamicheskie sistemy i modeli v biologii* [Dynamic systems and models in biology]. Moscow, Litres Publ., 2022, 390 p.
- [19] Gadalov V.N., Korenevskiy N.A., Snopkov V.N. Matematicheskie modeli reflektornykh sistem organizma cheloveka i ikh ispolzovanie dlya prognoziro-

- vaniya i diagnostiki zabolevaniy [Mathematical models of reflex systems the body uefa rights and use them for prediction and diagnosis of diseases]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh — System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2012, vol. 11, no. 2, pp. 515–521.
- [20] Kortuzov D.E., Gorbenko A.Yu., Pavlova A.I. Issledovanie operatsiy s nechetkimi mnozhestvami [Research of operations of fuzzy sets]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii — Modern Materials, Equipment and Technologies*, 2016, no. 1(4), pp. 98–103.
- [21] Antonova G.M. Evoliutsiya terminov “chernyi yashchik” i “seryi yashchik” [The evolution of terms “black box” and “grey box”]. *Vestnik Moskovskogo finansovo-yuridicheskogo universiteta — Bulletin of the MFUA*, 2012, no. 1, pp. 16–19.
- [22] Ermakov A.D., Evtushenko N.V. K sintezu adaptivnykh proveryayushchikh posledovatelnostey dlya nedeterminirovannykh avtomatov [Deriving adaptive checking sequence for nondeterministic Finite State Machines]. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN — Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*, 2016, vol. 28, no. 3, pp. 123–144.
- [23] Artemenko M.V. Sintez diagnosticheskikh matrits pri skrininge [Synthesis of diagnostic matrices in screening]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya — Advances in current natural sciences*, 2004, no. 12, pp. 33–34.
- [24] Radzhabov A.G., Khaydarov A.Kh. Primenenie programmiruemykh logicheskikh matrits dlya meditsinskikh issledovaniy [Using programmable logic matrices in medical research]. *Tsifrovoy region: opyt, kompetentsii, proekty — Digital region: experience, competences, projects*, 2018, pp. 403–406.
- [25] Shevelev S.S., Kobelev N.S., Kobelev V.N. Ustroystvo vypolneniya logicheskikh operatsiy [Device of the execution logical operation]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroyeniye — Proceedings of the Southwest State University. Series: IT Management, Computer Science, Computer Engineering. Medical Equipment Engineering*, 2011, no. 2, pp. 50–56.

**Sidnyaev N.I.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Higher Mathematics, Scientific and Educational Complex “Fundamental Sciences”, Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests: mathematical simulation, aerodynamics of spatial bodies and wings at the super- and hypersonic speeds, theory of conical supersonic gas flows, interaction of shock waves with the boundary layer.  
e-mail: Sidnyaev@bmstu.ru

**Garazha V.V.**, Engineer, Department of Higher Mathematics, Scientific and Educational Complex “Fundamental Sciences”, Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests: statistical evaluation, mathematical simulation, linguistics.  
e-mail: garazha@bmstu.ru