

Заклучение

Рассмотренные алгоритмы предварительной обработки и классификации на основе дискриминантного и кластерного анализа дают возможность автоматического принятия решений о различии масс-спектров без визуального анализа информации, представленной в графическом виде. Такое автоматическое принятие решений может быть полезным при массовых экспресс-анализах. При незначительных отклонениях вычисленных значений дискриминантных функций целесообразным является повторение измерений с дополнительным анализом информации. Кроме того, данные методы целесообразно использовать параллельно с другими методами анализа патологий.

Рассмотренные алгоритмы просты в реализации, дают возможность автоматического принятия решения о принадлежности проверяемого сигнала к определенному классу.

Алгоритмы имеют практическое значение для специализированных малогабаритных бюджетных масс-спектрометров, в которых особенно целесообразно использовать автоматизированную классификацию по группам здоровья математическими методами.

Работа поддержана государственным заданием № 075-00780-19-00.

Список литературы:

1. Кузьмин А.Г. Квадрупольный масс-спектрометр / Патент на полезную модель № 94763. РФ. 27.05.2010 г.
2. Кузьмин А.Г., Титов Ю.А. Малогабаритные масс-спектрометры для динамических исследований состава выдыхаемого воздуха / Труды I Международной научно-практической конференции «Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования в физиологии и медицине», СПб., 23-26 ноября 2010 г. Ч. 3. С. 266-270.
3. Кузьмин А.Г., Ткаченко Е.И., Орешко Л.С., Титов Ю.А. Перспективы метода масс-спектрометрической ароматодиагностики по составу выдыхаемого воздуха / Тезисы докладов X Евразийской научной конференции «ДОНОЗОЛОГИЯ-2014». СПб., 18-19 декабря 2014 г. С. 229-231.
4. Новиков Л.В., Куркина В.В. Метод оценки параметров спектральных пиков // Научное приборостроение. 2017. Т. 27. № 3. С. 99-106.
5. Vivó-Truyols G., Torres-Lapasió J.R., van Nederkassel A.M., van der Heyden Y.V., Massart D.L. Automatic program for peak detection and deconvolution of multi-overlapped chromatographic signals. Part I: Peak detection // Journal of Chromatography A. 2005. Vol. 1096. PP. 133-145.

6. Манойлов В.В., Кузьмин А.Г., Заруцкий И.В., Титов Ю.А., Самсонова Н.С. Методы обработки и исследование возможностей масс-спектров выдыхаемых газов // Научное приборостроение. 2019. Т. 29. № 1. С. 106-109.
7. Fredriksson M.J., Petersson P., Axelsson B.-O., Bylund D. An automatic peak finding method for LC-MS data using Gaussian second derivative filtering // J. Sep. Sci. 2009. Vol. 32. PP. 3906-3918.
8. Gregoire J.M., Dale D., Bruce van Dover R. A wavelet transform algorithm for peak detection and application to powder x-ray diffraction data // Review of Scientific Instruments. 2011. Vol. 82. PP. 015105-015112.
9. Du P., Kibbe W.A., Lin S.M. Improved peak detection in mass spectrum by incorporating continuous wavelet transform-based pattern matching // Bioinformatics. 2006. Vol. 22. PP. 2059-2065.
10. Манойлов В.В., Титов Ю.А., Кузьмин А.Г., Заруцкий И.В. Алгоритмы дискриминационного анализа для классификации масс-спектров выдыхаемых газов // Научное приборостроение. 2017. Т. 27. № 3. С. 33-57.
11. Новиков Л.В., Куркина В.В. Многомерная обработка данных масс-спектрометрического анализа состава выдыхаемого воздуха / Сб. трудов XXIX Междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-29»; в 12 т. Т. 9. Под общ. ред. А.А. Большакова. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т; СПб.: СПбГТИ(ТУ), СПбПУ, СПИИРАН; Самара: Самарск. гос. техн. ун-т, 2016. С. 32-38.
12. Бериков В.Б., Лбов Г.С. Современные тенденции кластерного анализа / Институт математики им. С.Л. Соболева СОРАН, 2008. 26 с / <https://reslib.org/books/642840>.

*Владимир Владимирович Манойлов,
д-р техн. наук, доцент,
гл. научный сотрудник, зав. лабораторией,
Лев Васильевич Новиков,
д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник,
Игорь Вячеславович Заруцкий,
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,
Алексей Георгиевич Кузьмин,
канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник,
Юрий Алексеевич Титов,
научный сотрудник,
ФГБУН «Институт аналитического
приборостроения» РАН,
г. С.-Петербург,
e-mail: manoilov_vv@mail.ru*

*С.П. Серегин, Т.Н. Говорухина, С.Н. Родионова, И.М. Холименко,
С.В. Петров, Г.В. Сипливый, В.В. Дмитриева*

Система поддержки принятия решений при дифференциальной диагностике форм пиелонефрита у беременных женщин на основе иммунного и оксидантного статусов

Аннотация

Приведены современные математические методы и информационные технологии, которые на основе показателей иммунного и оксидантного статусов позволяют точно проводить дифференциальную диагностику форм пиелонефрита у беременных. Проверка результатов срабатывания полученных решающих правил на контрольной выборке, показал, что диагностическая эффективность предлагаемого метода достигает 93 %, что приемлемо для использования в медицинской практике.

Введение

Заболеваемость пиелонефритом, в том числе гестационным, в течение последних лет неуклонно увеличивается. Часто наблюдается атипичное течение пиелонефрита. Несмотря на высокоинформативные методы диагностики, применяемые при

выявлении пиелонефрита, дифференциальная диагностика серозных и гнойных форм пиелонефрита остается неразрешенной проблемой. Многочисленные исследования и опыт практической медицины свидетельствуют о том, что показатели иммунного и оксидантного статусов больных пиелонефритом могут служить информативными тестами для оценки формы

Функционально-метаболическая активность нейтрофилов периферической крови при остром пиелонефрите

Показатель	Единица измерения	Здоровые женщины	С серозным пиелонефритом	С гнойным пиелонефритом
x_{12} : активность и интенсивность фагоцитоза (ФИ)	%	$79,1 \pm 3,1$	$46,8 \pm 3,2$	$57,8 \pm 4,2$
x_{13} : активность кислородозависимых систем (НСТ)	%	$3,8 \pm 0,3$	$20,4 \pm 1,1$	$14,3 \pm 1,0$

На втором этапе исследований были сформированы таблицы экспериментальных данных с пространством информативных признаков x_1, \dots, x_{13} для двух классов: $\omega_{СП}$ – серозный пиелонефрит и $\omega_{ГП}$ – гнойный пиелонефрит – по 30 человек на каждый класс. В ходе разведочного анализа, проведенного в соответствии с рекомендациями [5], было установлено, что на малых объемах выборки структура данных имеет нечеткий характер со значительной и неформализуемой зоной пересечения классов $\omega_{СП}$ и $\omega_{ГП}$ между собой и с контрольным классом относительно здоровых людей.

В этих условиях, согласно рекомендациям [6]-[8], в качестве базового математического аппарата была выбрана методология синтеза гибридных нечетких решающих правил, базовым элементом которой являются функции принадлежности к классам ω_C с базовыми переменными по информативным признакам x_i . Применительно к решаемой задаче первоначально определяются две группы функций принадлежности: к классу $\omega_{СП} - \mu_{СП}(x_i)$ и к классу $\omega_{ГП}(x_i)$. В ходе математического моделирования и дополнительного разведочного анализа было установлено, что между классами $\omega_{СП}$ и $\omega_{ГП}$ выделяется дополнительный класс – мы назвали его переходной формой (на границе серозного и гнойного пиелонефрита) – класс $\omega_{ПС}$, для которого определяется набор функций принадлежности $\mu_{ПС}(x_i)$.

Анализ характера выбранных лабораторных показателей позволил сделать вывод, что учет каждого из них увеличивает уверенность в принимаемых решениях. При таких свойствах информативных признаков, в качестве которых выступают отбираемые лабораторные показатели в соответствии с рекомендациями [8], в качестве базовых формул расчета частных KY_{rl} и финальных коэффициентов уверенности KY_{0l} в классах ω_l ($l = СП, ГП, ПС$) выбраны итерационные выражения вида

$$KY_{rl}(q+1) = KY_{rl}(q) + \mu_{rl}(x_{j+1})[1 - KY_{rl}(q)]; \quad (1)$$

$$KY_{0l}(p+1) = KY_{0l}(q) + KY_{rl}(r+1)[1 - KY_{0l}(p)], \quad (2)$$

где KY_{rl} – коэффициент уверенности в классе ω_l по группе лабораторных показателей с номером r ; $r = 1$ – для показателей оксидантного статуса плазмы крови; $r = 2$ – цитокиновый спектр плазмы крови; $r = 3$ – функционально-метаболическая активность нейтрофилов периферической крови; KY_{0l} – финальный коэффициент уверенности в классе ω_l ; $l = СП, ГП, ПС$; $KY_{0l}(1) = KY_{rl}(1)$; q и p – соответствующие номера итераций.

Синтез решающих правил для диагностики классов $\omega_{СП}$ и $\omega_{ГП}$ проводится с учетом высококвалифицированных экспертов (8 человек, согласованность действий которых проверялась по коэффициенту конкордации) по технологии Делфи.

В соответствии с рекомендациями [9] эксперты под руководством инженера по знаниям построили графики необходимых функций принадлежности, по которым были определены соответствующие аналитические выражения.

пиелонефрита, прогноза течения и эффективности лечения. Однако многочисленность показателей и их неоднозначная трактовка при различных формах пиелонефрита затрудняют оценку показателей и снижают их диагностическую надежность [1]-[3].

Материалы и методы исследования

Под наблюдением находились беременные женщины с диагнозами острый серозный и гнойный пиелонефрит. Проведено комплексное обследование 120 беременных, у 51 беременной, которые составили первую группу, был диагностирован острый серозный необструктивный пиелонефрит, во второй группе были беременные с острым гнойным пиелонефритом (39 беременных), остальные 30 составили контрольную группу (здоровые беременные). Обследование проводилось на сроке беременности от 32 до 34 недель. Обследуемые пациентки были в возрасте 22...29 лет, все беременности были одноплодные и завершились своевременным рождением живых детей без отклонений.

Критериями включения пациенток в группы было отсутствие органической патологии органов мочевыделительной системы, острой инфекционной патологии, специфической инфекции, передающейся половым путем. Исключались женщины с хроническими экстрагенитальными очагами воспалительной патологии в стадии обострения, пациентки с наличием иммунодефицитных состояний и сахарного диабета.

Обследование беременных включало в себя: выявление клинико-anamnestических характеристик течения беременности, лабораторную диагностику воспалительной патологии почек и исследование показателей иммунитета. Исследовался оксидантный статус плазмы крови, цитокиновый спектр плазмы крови, функционально-метаболическая активность нейтрофилов при остром пиелонефрите.

Для решения задач дифференциальной диагностики форм пиелонефрита на экспертном уровне на первом этапе было отобрано 42 лабораторных показателя. В ходе разведочного анализа, проведенного с помощью интерактивного пакета RUMM2020 в соответствии с рекомендациями [4], было отобрано 13 нижеследующих информативных лабораторных показателей.

Таблица 1

Показатели оксидантного статуса плазмы крови больных острым и гнойным пиелонефритом

Показатель	Единица измерения	Серозный пиелонефрит (до лечения)	Гнойный пиелонефрит (до лечения)
x_1 : МДА	мкмоль/л	$0,75 \pm 0,08$	$4,4 \pm 0,2$
x_2 : АГП	у. е.	$0,38 \pm 0,03$	$1,3 \pm 0,06$
x_3 : СОД	у. е.	$16,6 \pm 0,5$	$8,3 \pm 0,4$
x_4 : Каталаза	мкат/л	$15,4 \pm 0,5$	$8,6 \pm 0,3$

МДА – малоновый диальдегид; АГП – ацетил гидроперекись; СОД – супероксиддисмутаза.

Таблица 2

Цитокиновый спектр плазмы крови у больных острым пиелонефритом

Показатель	Единица измерения	Здоровые женщины	С серозным пиелонефритом	С гнойным пиелонефритом
x_5 : TNF±	пкг/мл	$5,8 \pm 0,7$	$36,8 \pm 1,9$	$23,6 \pm 1,6$
x_6 : IL-1±	пкг/мл	$3,8 \pm 0,3$	$20,4 \pm 1,1$	$14,3 \pm 1,0$
x_7 : IL-6	пкг/мл	$1,7 \pm 0,2$	$14,1 \pm 1,5$	$8,2 \pm 0,5$
x_8 : IL-8	пкг/мл	$24,7 \pm 1,9$	$52,6 \pm 2,3$	$55,2 \pm 3,6$
x_9 : IFN±	пкг/мл	$6,2 \pm 0,8$	$27,3 \pm 1,7$	$167,3 \pm 5,1$
x_{10} : IL-10	пкг/мл	$2,9 \pm 0,05$	$11,9 \pm 1,1$	$11,3 \pm 0,09$
x_{11} : IL-1RA	пкг/мл	$450 \pm 12,7$	$123,4 \pm 2,1$	$326,4 \pm 13,3$

Для показателей оксидантного статуса плазмы крови

$$\mu_{\text{СП}}(x_1) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_1 < 0,25; \\ 0,4x_1 - 0,1, & \text{если } 0,25 \leq x_1 < 0,75; \\ -0,058x_1 + 0,24, & \text{если } 0,75 \leq x_1 < 4,2; \\ 0, & \text{если } x_1 \geq 4,2; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{ГП}}(x_1) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_1 < 0,75; \\ 0,082x_1 - 0,06, & \text{если } 0,75 \leq x_1 < 4,4; \\ 0,3, & \text{если } x_1 \geq 4,4; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{СП}}(x_2) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_2 < 0,22; \\ 0,667x_2 - 0,147, & \text{если } 0,22 \leq x_2 < 0,37; \\ -0,435x_2 + 0,261, & \text{если } 0,37 \leq x_2 < 0,6; \\ 0, & \text{если } x_2 \geq 0,6; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{ГП}}(x_2) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_2 < 0,37; \\ 0,322x_2 - 0,12, & \text{если } 0,37 \leq x_2 < 1,3; \\ 0,3, & \text{если } x_2 \geq 1,3; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{СП}}(x_3) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_3 < 16,1; \\ 0,667x_3 - 10,73, & \text{если } 16,1 \leq x_3 < 16,4; \\ -0,167x_3 + 2,93, & \text{если } 16,4 \leq x_3 < 17,6; \\ 0, & \text{если } x_3 \geq 17,6; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{ГП}}(x_3) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_3 < 16,6; \\ 0,4x_3 - 6,64, & \text{если } 16,6 \leq x_3 < 17,6; \\ 0,4, & \text{если } x_3 \geq 17,6; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{СП}}(x_4) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_4 < 11,4; \\ 0,065x_4 - 0,74, & \text{если } 11,4 \leq x_4 < 16; \\ -0,15x_4 + 2,7, & \text{если } 16 \leq x_4 < 18; \\ 0, & \text{если } x_4 \geq 18; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{ГП}}(x_4) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_4 < 16,5; \\ 0,2x_4 - 3,3, & \text{если } 16,5 \leq x_4 < 18; \\ 0,3, & \text{если } x_4 \geq 18. \end{cases}$$

Частные коэффициенты уверенности по данной группе признаков ($r = 1$) по классам $\omega_{\text{СП}}$ и $\omega_{\text{ГП}}$ определяются выражениями

$$\text{КУ}_{\text{СП}}(q+1) = \text{КУ}_{\text{СП}}(q) + \mu_{\text{СП}}(x_{i+1})[1 - \text{КУ}_{\text{СП}}(q)]; \quad (3)$$

$$\text{КУ}_{\text{ГП}}(q+1) = \text{КУ}_{\text{ГП}}(q) + \mu_{\text{ГП}}(x_{i+1})[1 - \text{КУ}_{\text{ГП}}(q)], \quad (4)$$

где $\text{КУ}_{\text{СП}}(1) = \mu_{\text{СП}}(x_1)$; $\text{КУ}_{\text{ГП}}(1) = \mu_{\text{ГП}}(x_1)$; $i = 1, 2, 3$; $q = 1, 2, 3$.

Для показателей цитокинового спектра плазмы крови ($r = 2$)

$$\mu_{\text{СП}}(x_5) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_5 < 34; \\ 0,08x_5 - 2,72, & \text{если } 34 \leq x_5 < 39; \\ 0,4, & \text{если } x_5 \geq 39; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{ГП}}(x_5) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_5 < 6,5; \\ 0,02x_5 - 0,126, & \text{если } 6,5 \leq x_5 < 22; \\ 0,3, & \text{если } 22 \leq x_5 < 25; \\ -0,023x_5 + 0,877, & \text{если } 25 \leq x_5 < 38; \\ 0, & \text{если } x_5 \geq 38; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{СП}}(x_6) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_6 < 15,3; \\ 0,075x_6 - 1,15, & \text{если } 15,3 \leq x_6 < 19,3; \\ 0,3, & \text{если } x_6 \geq 19,3; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{ГП}}(x_6) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_6 < 4,1; \\ 0,043x_6 - 0,18, & \text{если } 4,1 \leq x_6 < 13,3; \\ 0,4, & \text{если } 13,3 \leq x_6 < 15,3; \\ -0,1x_6 + 1,93, & \text{если } 15,3 \leq x_6 < 19,3; \\ 0, & \text{если } x_6 \geq 19,3; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{СП}}(x_7) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_7 < 10; \\ 0,1x_7 - 1, & \text{если } 10 \leq x_7 < 14; \\ 0,4, & \text{если } x_7 \geq 14; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{ГП}}(x_7) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_7 < 2; \\ 0,067x_7 - 0,133, & \text{если } 2 \leq x_7 < 8; \\ 0,4, & \text{если } 8 \leq x_7 < 8,5; \\ -0,114x_7 + 1,37, & \text{если } 8,5 \leq x_7 < 12; \\ 0, & \text{если } x_7 \geq 12; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{СП}}(x_8) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_8 < 26; \\ 0,015x_8 - 0,4, & \text{если } 26 \leq x_8 < 52; \\ -0,125x_8 + 6,9, & \text{если } 52 \leq x_8 < 55,2; \\ 0, & \text{если } x_8 \geq 55,2; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{ГП}}(x_8) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_8 < 54; \\ 0,33x_8 - 18, & \text{если } 54 \leq x_8 < 55,2; \\ 0,4, & \text{если } x_8 \geq 55,2; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{СП}}(x_9) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_9 < 7; \\ 0,016x_9 - 0,11, & \text{если } 7 \leq x_9 < 26; \\ 0,3, & \text{если } 26 \leq x_9 < 29; \\ -0,014x_9 + 0,71, & \text{если } 29 \leq x_9 < 50; \\ 0, & \text{если } x_9 \geq 50; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{ГП}}(x_9) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_9 < 29; \\ 0,0031x_9 - 0,09, & \text{если } 29 \leq x_9 < 172; \\ 0,45, & \text{если } x_9 \geq 172; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{СП}}(x_{10}) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_{10} < 3; \\ 0,033x_{10} - 0,1, & \text{если } 3 \leq x_{10} < 12; \\ 0,3, & \text{если } x_{10} \geq 12; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{ГП}}(x_{10}) = \begin{cases} 0,2, & \text{если } x_{10} < 1,3; \\ -0,13x_{10} + 0,37, & \text{если } 1,3 \leq x_{10} < 2,8; \\ 0, & \text{если } x_{10} \geq 2,8; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{СП}}(x_{11}) = \begin{cases} 0,3, & \text{если } x_{11} < 121; \\ -0,0015x_{11} + 0,48, & \text{если } 121 \leq x_{11} < 320; \\ 0, & \text{если } x_{11} \geq 320; \end{cases}$$

$$\mu_{\text{ГП}}(x_{11}) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_{11} < 121; \\ 0,002x_{11} - 0,243, & \text{если } 121 \leq x_{11} < 320; \\ 0,4, & \text{если } 320 \leq x_{11} < 340; \\ -0,042x_{11} + 1,83, & \text{если } 340 \leq x_{11} < 435; \\ 0, & \text{если } x_{11} \geq 435. \end{cases}$$

Частные коэффициенты уверенности по второй группе лабораторных показателей определяются выражениями

$$КУ_{2СП}(q+1) = КУ_{2СП}(q) + \mu_{СП}(x_{i+1})[1 - КУ_{2СП}(q)]; \quad (5)$$

$$КУ_{2ГП}(q+1) = КУ_{2ГП}(q) + \mu_{ГП}(x_{i+1})[1 - КУ_{2ГП}(q)], \quad (6)$$

где $КУ_{2СП}(1) = \mu_{СП}(x_5)$; $КУ_{2ГП}(1) = \mu_{ГП}(x_5)$; $i = 5, \dots, 10$; $q = 1, \dots, 10$.

Для показателей функционально-метаболической активности нейтрофилов периферической крови ($r = 3$)

$$\mu_{СП}(x_{12}) = \begin{cases} 0,4, & \text{если } x_{12} < 50; \\ -0,033x_{12} + 2,07, & \text{если } 50 \leq x_{12} < 62; \\ 0, & \text{если } x_{12} \geq 62; \end{cases}$$

$$\mu_{ГП}(x_{12}) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_{12} < 50; \\ 0,025x_{12} - 1,25, & \text{если } 50 \leq x_{12} < 62; \\ -0,018x_{12} + 1,39, & \text{если } 62 \leq x_{12} < 79; \\ 0, & \text{если } x_{12} \geq 79; \end{cases}$$

$$\mu_{СП}(x_{13}) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_{13} < 27; \\ 0,0086x_{13} - 0,23, & \text{если } 27 \leq x_{13} < 62; \\ 0,3, & \text{если } 62 \leq x_{13} < 66; \\ -0,05x_{13} + 3,6, & \text{если } 66 \leq x_{13} < 72; \\ 0, & \text{если } x_{13} \geq 72; \end{cases}$$

$$\mu_{ГП}(x_{13}) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_{13} < 66; \\ 0,067x_{13} - 44, & \text{если } 66 \leq x_{13} < 72; \\ 0,4, & \text{если } x_{13} \geq 72. \end{cases}$$

Частные решающие правила для этой группы признаков имеют вид

$$КУ_{3СП} = \mu_{СП}(x_{12}) + \mu_{СП}(x_{13}) - \mu_{СП}(x_{12}) \cdot \mu_{СП}(x_{13}); \quad (7)$$

$$КУ_{3ГП} = \mu_{ГП}(x_{12}) + \mu_{ГП}(x_{13}) - \mu_{ГП}(x_{12}) \cdot \mu_{ГП}(x_{13}). \quad (8)$$

Финальные решающие правила определения уверенности в классах $\omega_{СП}$ и $\omega_{ГП}$ в соответствии с выражением (2) определяются по формулам

$$\begin{aligned} КУ_{СП} &= КУ_{1СП} + КУ_{2СП} + КУ_{3СП} - \\ &- КУ_{1СП} \cdot КУ_{2СП} - КУ_{1СП} \cdot КУ_{3СП} - \\ &- КУ_{2СП} \cdot КУ_{3СП} + КУ_{1СП} \cdot КУ_{2СП} \cdot КУ_{3СП}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} КУ_{ГП} &= КУ_{1ГП} + КУ_{2ГП} + КУ_{3ГП} - \\ &- КУ_{1ГП} \cdot КУ_{2ГП} - КУ_{1ГП} \cdot КУ_{3ГП} - \\ &- КУ_{2ГП} \cdot КУ_{3ГП} + КУ_{1ГП} \cdot КУ_{2ГП} \cdot КУ_{3ГП}. \end{aligned} \quad (10)$$

Анализ полученных графиков функций принадлежности к классам $\omega_{СП}$ и $\omega_{ГП}$ показал, что между графиками различных классов существует ярко выраженная переходная группа, определяемая как класс $\omega_{ПС}$.

Для этого класса развития пиелонефрита и его формы были определены соответствующие функции принадлежности:

$$\mu_{ПС}(x_1) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_1 < 0,75; \\ 0,18x_1 - 0,13, & \text{если } 0,75 \leq x_1 < 2,14; \\ -0,12x_1 + 0,51, & \text{если } 2,14 \leq x_1 < 4,2; \\ 0, & \text{если } x_1 \geq 4,2; \end{cases}$$

$$\mu_{ПС}(x_2) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_2 < 0,37; \\ 1,92x_2 - 0,71, & \text{если } 0,37 \leq x_2 < 0,5; \\ -2,5x_2 + 1,5, & \text{если } 0,5 \leq x_2 < 0,6; \\ 0, & \text{если } x_2 \geq 0,6; \end{cases}$$

$$\mu_{ПС}(x_3) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_3 < 16,6; \\ x_3 - 16,6, & \text{если } 16,6 \leq x_3 < 16,9; \\ -0,43x_3 + 7,54, & \text{если } 16,9 \leq x_3 < 17,6; \\ 0, & \text{если } x_3 \geq 17,6; \end{cases}$$

$$\mu_{ПС}(x_4) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_4 < 16,5; \\ 0,5x_4 - 8,25, & \text{если } 16,5 \leq x_4 < 17,1; \\ -0,33x_4 + 6, & \text{если } 17,1 \leq x_4 < 18; \\ 0, & \text{если } x_4 \geq 18; \end{cases}$$

$$\mu_{ПС}(x_5) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_5 < 34; \\ 0,39x_5 - 13,2, & \text{если } 34 \leq x_5 < 34,9; \\ -0,11x_5 + 4,3, & \text{если } 34,9 \leq x_5 < 38; \\ 0, & \text{если } x_5 \geq 38; \end{cases}$$

$$\mu_{ПС}(x_6) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_6 < 15,3; \\ 0,15x_6 - 2,33, & \text{если } 15,3 \leq x_6 < 17,6; \\ -0,206x_6 + 0,4, & \text{если } 17,6 \leq x_6 < 19,3; \\ 0, & \text{если } x_6 \geq 19,3; \end{cases}$$

$$\mu_{ПС}(x_7) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_7 < 10; \\ 0,35x_7 - 3,5, & \text{если } 10 \leq x_7 < 11; \\ -0,35x_7 + 4,2, & \text{если } 11 \leq x_7 < 12; \\ 0, & \text{если } x_7 \geq 12; \end{cases}$$

$$\mu_{ПС}(x_8) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_8 < 54; \\ 0,57x_8 - 30,86, & \text{если } 54 \leq x_8 < 54,7; \\ -0,8x_8 + 44,16, & \text{если } 54,7 \leq x_8 < 52,2; \\ 0, & \text{если } x_8 \geq 55,2; \end{cases}$$

$$\mu_{ПС}(x_9) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_9 < 29; \\ 0,022x_9 - 0,65, & \text{если } 29 \leq x_9 < 46,8; \\ -0,125x_9 + 6,26, & \text{если } 46,8 \leq x_9 < 50; \\ 0, & \text{если } x_9 \geq 50; \end{cases}$$

$$\mu_{ПС}(x_{11}) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_{11} < 121; \\ 0,004x_{11} - 0,49, & \text{если } 121 \leq x_{11} < 207; \\ -0,0031x_{11} + 0,99, & \text{если } 207 \leq x_{11} < 320; \\ 0, & \text{если } x_{11} \geq 320; \end{cases}$$

$$\mu_{ПС}(x_{12}) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_{12} < 50; \\ 0,05x_{12} - 2,5, & \text{если } 50 \leq x_{12} < 57; \\ -0,07x_{12} + 4,34, & \text{если } 57 \leq x_{12} < 62; \\ 0, & \text{если } x_{12} \geq 62; \end{cases}$$

$$\mu_{ПС}(x_{13}) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_{13} < 66; \\ 0,17x_{13} - 11,55, & \text{если } 66 \leq x_{13} < 68; \\ -0,112x_{13} + 8,1, & \text{если } 68 \leq x_{13} < 72; \\ 0, & \text{если } x_{13} \geq 72. \end{cases}$$

Агрегация функций принадлежности $\mu_{\text{ПС}}(x_i)$ в финальное решающее правило оценки уверенности в форме пиелонефрита (класс $\omega_{\text{ПС}}$) осуществляется с использованием модели (1). Решение о принадлежности к одному из классов состояний $\omega_{\text{СП}}$, $\omega_{\text{ГП}}$ или $\omega_{\text{ПС}}$ определяется по максимальной величине коэффициента уверенности при его превышении порога, выбранного экспертами КУ^П:

$$КУ_1 = \max(KУ_{\text{СП}}, КУ_{\text{ГП}}, КУ_{\text{ПС}}) \geq КУ^{\text{П}}. \quad (11)$$

Рекомендуемая величина порога $КУ^{\text{П}} = 0,6$. При равенстве коэффициентов уверенности по выбранным классам решение принимается в пользу более тяжелой формы заболевания. При $КУ_1 < КУ^{\text{П}}$ принимается решение об отсутствии гнойной формы пиелонефрита. Проверка результатов срабатывания полученных решающих правил на контрольной выборке (100 человек, у которых диагноз подтвержден операцией) показал, что диагностическая эффективность предлагаемого метода достигает 93 %, что приемлемо для использования в медицинской практике.

Заключение

Применение предложенной нами методики дифференциальной диагностики форм пиелонефрита на основе лабораторных показателей с использованием информационных технологий позволяет определять серозную и гнойную формы пиелонефрита, осуществлять дифференциальный подход к выбору тактики лечения этой категории больных. Результаты проведенной работы дают основание для создания интерактивных компьютерных программ, которые помогут при установке диагноза и определении дальнейшей тактики ведения и лечения пациентов.

Список литературы:

1. Серегин С.П., Петров С.В., Корневская С.Н., Новиков А.В., Долженков С.Д., Зубарев Д.А. Применение информационных технологий при оказании медицинской помощи больным пиелонефритом. – Курск: Изд-во Юго-Зап. гос. ун-та, 2015. 216 с.
2. Холименко И.М., Конопля А.И., Братчиков О.И., Быстрова Н.А., Маврин М.Ю., Шатохин М.Н. Оксидантный стресс при остром серозном и гнойном пиелонефрите // Нефрология. 2017. № 21 (1). С. 87-94.
3. Холименко И.М., Братчиков О.И., Джаримок А.Р., Шатохин М.Н., Маврин М.Ю., Быстрова Н.А. Лабораторная эффективность стандартного лечения при остром серозном и гнойном пиелонефрите // Курский научно-практический вестник «Человек и его здоровье». 2016. № 1. С. 62-68.
4. Корневский Н.А., Шуткин А.Н., Бойцова Е.А., Дмитриева В.В. Оценка и управление состоянием здоровья на основе моделей Г. Раша // Медицинская техника. 2015. № 6. С. 37-40.
5. Корневский Н.А., Артеменко М.В., Провоторов В.Я., Новикова Л.А. Метод синтеза нечетких решающих правил на

основе моделей системных взаимосвязей для решения задач прогнозирования и диагностики заболеваний // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2014. № 13 (4). С. 881-886.

6. Корневский Н.А., Серебровский В.И., Коптева Н.А., Говорухина Т.Н. Прогнозирование и диагностика заболеваний, вызываемых вредными производственными и экологическими факторами, на основе гетерогенных нечетких моделей. – Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия, 2012. 231 с.
7. Korenevskiy N.A. Application of fuzzy logic for decision-making in medical expert systems // Biomedical Engineering. 2015. № 49. PP. 46-49.
8. Korenevskiy N.A., Degtyarev S.V., Seregin S.P., Novikov A.V. Use of an Interactive Method for Classification in Problems of Medical Diagnosis // Biomedical Engineering. 2013. № 47 (4). PP. 169-172.
9. Zadeh L.A. Advances in Fuzzy Mathematics and Engineering: Fuzzy Sets and Fuzzy Information-Granulation Theory. – Beijing: Beijing Normal University Press, 2005.

Станислав Петрович Серегин,

д-р мед. наук, профессор,

Татьяна Николаевна Говорухина,

канд. техн. наук, ст. преподаватель,

София Николаевна Родионова,

аспирант,

кафедра биомедицинской инженерии,

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»,

Иван Михайлович Холименко,

аспирант,

кафедра урологии,

Курский государственный медицинский университет,

Сергей Вячеславович Петров,

докторант,

кафедра биомедицинской инженерии,

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»,

Геннадий Вячеславович Сипливый,

д-р мед. наук, профессор,

кафедра урологии,

Курский государственный медицинский университет,

г. Курск,

Валентина Викторовна Дмитриева,

канд. техн. наук, доцент,

кафедра электрофизических установок,

НИЯУ «МИФИ»,

г. Москва,

e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

А.З. Салахов

Численное моделирование поглощения энергии высокочастотного радиоизлучения в тканях головы человека

Аннотация

Рассматривается наиболее актуальный аспект взаимного влияния многослойной модели биологических тканей и вибраторной антенны – распределение поля электрического вибратора в слоях сферической модели.

Особое внимание уделяется сложным моделям, близким к совершенной модели головы пользователя, что дает возможность рассматривать результаты не только как сугубо инженерные, но и как имеющие отношение к потребительскому вопросу о возможном влиянии сотового телефона на организм человека. Более того, расчеты проводились для наиболее широко используемых стандартов сотовой связи – цифровых GSM900 и GSM1800.

Введение

В последнее время во всем мире и во многих сферах деятельности наблюдается значительный рост использования устройств, являющихся источником электромагнитного излуче-

ния. В связи с развитием телевидения, радиовещания и персональных мобильных средств связи население практически постоянно подвергается электромагнитному воздействию.

Экспериментальные исследования электромагнитного взаимодействия тела человека и антенны источника излучения,