МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение

Научный журнал

Том 9 № 2 / 2019

Proceedings

of the Soutwest State University. Series: Control, Computer engineering, Information science. Medical instruments engineering

Scientific Journal

Vol. 9 № 2 / 2019

2019. Т. 9, № 2
Научный рецензируемый журнал

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение

Основан в 2011 г.

Выходит четыре раза в год

Учредитель: ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ №ФС77-44620 от 15.04.11).

Журнал «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» включен в перечень ведущих научных журналов ВАК Минобрнауки России по следующим научным специальностям:

05.11.01 – Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки);

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий (технические науки);

05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки);

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки);

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки).

Редакционная коллегия

С. Г. Емельянов (главный редактор), д-р техн. наук, профессор;
Р. А. Томакова (заместитель главного редактора), д-р техн. наук, профессор;
Р. М. Алгулиев, д-р техн. наук, профессор;
Ю. С. Бехтин, д-р техн. наук, профессор;
А. А. Бурмака, д-р техн. наук, профессор;

СОДЕРЖАНИЕ

Зуев А. Л., Мишланов В. Ю., Судаков А. И., Шакиров Н. В.
Автоматизированный приборный комплекс для измерения электрического импеданса биологических сред……..……..6

Мухин А. И., Пучкова И. А., Коптев Д. С.
Альтернативный способ мониторинга судов для обеспечения безопасного мореплавания при отсутствии радиоизлучений от AIS-транспондеров……..22

Плесконос Л. В., Ефремов М. Ю.
Электрическое поле линий электропередач постоянного тока……..35

Григоренко В. В., Еськов В. М., Микшина В. С., Назина Н. Б.
Информационно-аналитическая система научных исследований сложных нестационарных систем с хаотической динамикой……..47

Кирильчук И. О., Юшин В. В., Коткина М. В.
Моделирование и анализ геоэкологических систем Курской области, определяющие особенности эксплуатации объектов размещения отходов……..61

Кореневский Н. А., Григоров И. Ю., Разумова К. В.
Метод прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний по энергетическому разбалансу меридианных структур организма……75

Никитаев В. Г., Проничев А. Н., Поляков Е. В., Чернышева О. А., Серебрякова И. Н., Тупицын Н. Н.
Формирование выборок клеток в системе компьютерной микроскопии для проведения исследований методов диагностики острых лимфобластных лейкозов……..91

В. Н. Гридин, д-р техн. наук, профессор;
А. Л. Жизняков, д-р техн. наук, профессор;
Ж. Т. Жусубалиев, д-р техн. наук, профессор;
С. А. Зинкин, д-р техн. наук, доцент;
Зо Зо Тун, канд. техн. наук, профессор;
И. В. Зотов, д-р техн. наук, профессор;
Н. А. Кореневский, д-р техн. наук, профессор;
Е. Н. Коровин, д-р техн. наук, профессор;
А. Н. Пылькин, д-р техн. наук, профессор;
Риад Таха Аль-Касасбех, д-р техн. наук, профессор;
В. Г. Рубанов, д-р техн. наук, профессор;
С. П. Серегин, д-р мед. наук, профессор;
А. С. Сизов, д-р техн. наук, профессор;
В. С. Титов, д-р техн. наук, профессор;
С. А. Филист, д-р техн. наук, профессор;
А. В. Филонович, д-р техн. наук, профессор;
А. А. Ханова, д-р техн. наук, доцент

Адрес редакции:
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.
Телефоны: (4712) 22-25-26
Факс: (4712) 50-48-00.
E-mail: rio_kursk@mail.ru

Оригинал-макет подготовлен А. Е. Серебряковой

Подписано в печать 20.05.19. Формат 60×84/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 18,4.
Тираж 1000 экз. Заказ 54. Цена свободная.
Юго-Западный государственный университет
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Публикация статей для авторов бесплатна.

Журнал распространяется по подписке. Подписной индекс журнала «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» 44288 в объединенном каталоге «Пресса России»

Серегин С. П., Кореневский Н. А., Истомина К. А., Челебаева Ю. А.
Математическая модель нечеткого прогнозирования рецидивов инфаркта миокарда……..101

Рапаков Г. Г., Горбунов В. А., Абдалов К. А.
Использование метода функций ядра в задаче анализа риска смертности……...112

Кореневский Н. А. , Мясоедова М. А., Разумова К. В., Серебровский А. В.
Метод синтеза математических моделей прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний работников предприятий электроэнергетики……127

Родионова С. Н., Мельник О. В.
Контроль динамики развития критической ишемии нижних конечностей по энергетической реакции биологически активных точек……144

К сведению авторов……..158

© Юго-Западный государственный университет, 2019

2019. Volume 9, no 2
Scientific journal

Proceedingss of the Southwest State University. Series Control, Computer engineering, Information science. Medical instruments engineering

Foundel in 2011.
Publication fregnency: four times a year

Founder: Southwest State University

Registered in the Registar of the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technologies, and Mass Media (Roskomnadzor) (Certificate of mass media registration № FS77-44620 of April 15, 2011).

Included in the official list of top scientific journals of the Higher Attestation Commission of the RF Ministry of Science and Education. Scientific Specialities:
05.11.01; 05.11.13; 05.11.17; 05.12.13; 05.13.01

Editors

S. G. Yemelianov (Editor-in-Chief), Doctor of Engineering, Professor;
R. F. Tomakova (Deputy Editor-in-Chief), Doctor of Engineering, Professor;

R. M. Alguliyev, Doctor of Engineering, Professor;

Y. S. Bekhtin, Doctor of Engineering, Professor;
A. A. Burmaka, Doctor of Engineering, Professor;
V. N. Gridin, Doctor of Engineering, Professor;

CONTENT

Zuev A. L., Mishlanov V. Y., Sudakov A. I., Shakirov N. V.
Automated Instrument Complex for Electric Impedance Measurements in Biological Media…… 6

Mukhin A. I., Puchkova I. A., Koptev D. S.
Alternative Method of Monitoring of Ships for Ensuring Safe Safety in the Absence of Radio Emissions from AIS Transpondents…… 22

Pleskonos L. V., Efremov M. Y.
Electric Field Linesdc Transmission…….. 35

Grigorenko V. V., Eskov V. M., Mikshina V. S., Nazina N. B.
Information and Analytical System of Scientific Researches of Complex Nonstationary Systems with Chaotic Dynamics….. 47

Kiril'chuk I. O., Yushin V. V., Kotkina M. V.
Modeling and Analysis of Geoecological Systems of the Kursk Region Defining Features of the Operation of Waste Disposal Facilities…… 61

Korenevsky N. A., Grigorov I. Yu., Razumova K. V.
Method for Predicting and Diagnostics of Professional Diseases on Energetic Balance of Meridian Structures of the Organism…… 75

Nikitaev V. G., Pronichev A. N., Polyakov E. V., Chernysheva O. A., Serebryakova I. N., Tupitsyn N. N.
A method of Forming of Cells Samples in the Computer Microscopy System for Studies of Methods of Diagnosis of Acute Lymphoblastic Leukemia…… 91

Seregin S. P., Korenevskiy N. A., Istomina K. A., Chelebajeva J. A.
Mathematical Model of Fuzzy Forecasting of Recurrences of Myocardial Infarction…….. 101

A. L. Zhiznyakov, Doctor of Engineering, Professor;
Zh. T. Zhusubaliyev, Doctor of Engineering, Professor;
S. A. Zinkin, Doctor of Engineering, Associate Professor;
Zo Zo Thun, Candidate of Engineering, Professor;
I. V. Zotov, Doctor of Engineering, Professor;
N. A. Korenevsky, Doctor of Engineering, Professor;
E. N. Korovin, Doctor of Engineering, Professor;
A. N. Pylkin, Doctor of Engineering, Professor;
Riad Taha Al-Kasasbeh, Doctor of Engineering, Professor;
V. G. Rubanov, Doctor of Engineering, Professor;
S. P. Seryogin, Doctor of Medical, Professor;
A. S. Sizov, Doctor of Engineering, Professor;
V. S. Titov, Doctor of Engineering, Professor;
S. A. Filist, Doctor of Engineering, Professor;
A. V. Filonovich, Doctor of Engineering, Professor;
A. A. Khanova, Doctor of Engineering, Associate Professor

Rapakov G. G., Gorbunov V. A., Abdalov K. A.
Mortality Risk Analysis by the Kernel Function Method……. 112

Korenevsky N. A., Myasoedova M. A., Razumova K. V., Serebrovsky A. V.
Method for Synthesis of Mathematical Models for Predicting and Diagnostics of Professional Diseases of Workers of Electronics Enterprises…… 127

Rodionova S. N., Melnik O. V.
The Method and Fuzzy Models for Evaluating the Dynamics of Development and the Degree of the Critical Ischemia of the Lower Extremities…… 144

For authors' information……**158**

© Southwest State University, 2019

УДК 05.11.17

Автоматизированный приборный комплекс для измерения электрического импеданса биологических сред

А. Л. Зуев[1,2] ✉, В. Ю. Мишланов[3], А. И. Судаков[1], Н. В. Шакиров[1]

[1] ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук», Российская Федерация, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1

[2] ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29

[3] Пермский государственный медицинский университет им. академика Е. А. Вагнера, Российская Федерация, 614990, г. Пермь, ул. Петропавловская, 26

✉ e-mail: zal@icmm.ru

Резюме

Цель исследования *заключается в разработке и создании методик, аппаратуры и программного обеспечения специализированного аппаратно-программного приборного комплекса, предназначенного для высокоточного измерения электрического импеданса и угла фазового сдвига между током и напряжением в биологических средах в широком диапазоне изменения зондирующей частоты.*

Методы*. Измерения параметров электрического импеданса производятся портативным прибором, работающим совместно с персональным компьютером (ноутбуком). Прибор состоит из отдельных модулей, несущих определенное функциональное назначение. В качестве датчиков могут быть использованы различные типы измерительных ячеек и любые электроды для импедансометрии, как стандартные, так и собственной разработки.*

Результаты*. Программное обеспечение прибора позволяет без участия оператора провести серию опытов с заранее заданными параметрами, указанными в текстовом файле управления, обработать полученные данные и вывести их в виде таблиц и графиков с указанием номера канала, частоты зондирования, количества точек усреднения данного канала за все время измерения в опыте.*

Заключение*. Предлагаемый автоматизированный комплекс значительно уменьшает время измерения электрического импеданса исследуемых биологических сред и обработку проведенных испытаний. Возможность быстро и объективно измерять и обрабатывать большие массивы экспериментальных данных при использовании недорогой элементной базы электронного оборудования является весьма актуальной для развития клинического применения импедансометрии в медицинской практике.*

Ключевые слова*: электрический импеданс; биологические среды; приборный комплекс.*

Благодарности*: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 16-48-590003 р_урал_а).*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: Автоматизированный приборный комплекс для измерения электрического импеданса биологических сред / А. Л. Зуев, В. Ю. Мишланов, А. И. Судаков, Н. В. Шакиров // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 2. С. 6–21.

© Зуев А. Л., Мишланов В. Ю., Судаков А. И., Шакиров Н. В., 2019

UDC 05.11.17

Automated Instrument Complex for Electric Impedance Measurements in Biological Media

A. L. Zuev[1,2] ✉, V. Y. Mishlanov[3], A. I. Sudakov[1], N. V. Shakirov[1]

[1] Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 1, Akademika Koroleva str., Perm, 614013, Russian Federation

[2] Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky prospect, Perm, 614990, Russian Federation

[3] Perm State Medical University named after Academician E. A. Wagner, 26, Petropavlovskaya str., Perm, 614990, Russian Federation

✉ e-mail: zal@icmm.ru

Abstract

Purpose of research. *The purpose of the study is to develop and create methods, equipment and software of specialized hardware/software instrumentation complex designed for high-precision measurement of electrical impedance and a phase shift between current and voltage in biological media in a wide range of changes in the probe frequency.*

Methods*. Measurements of electrical impedance parameters are made by a portable device that works in conjunction with a personal computer (laptop). The device consists of separate modules carrying a certain functional purpose. As sensors, various types of measuring cells and any electrodes for impedance measurement, both standard and proprietary, can be used.*

Results*. Software of the apparatus makes it possible to perform, without operator intervention, a series of experiments with the prescribed parameters specified in a text administrative file, to process the obtained data and to present findings in tabular and graphical form, indicating channel number, probe frequency, number of averaging points in the channel over the full measurement testing period.*

Conclusion*. The proposed automated complex significantly reduces the time of measuring the electrical impedance of the studied biological media and the processing of the performed tests. The ability to quickly and objectively measure and process large amounts of experimental data using inexpensive electronic components is very important for the progress in clinical application of impedancemetry in medical practice.*

Keywords*: electrical impedance; biological media; instrument complex.*

Acknowledgements: *the Study was supported by the grant of Russian Foundation for basic Research (project No. 16-48-590003 rurala).*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: A. L. Zuev, V. Yu. Mishlanov, A. I. Sudakov, N. V. Shakirov. Automated instrument complex for electric impedance measurements in biological media. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, 9(2): 6–21 (In Russ.).

***

Введение

В современной медицине анализ молекулярного состава и физико-химических свойств биологических тканей является одним из важнейших инструментов для диагностики и контроля за состоянием организма и течением патологических процессов. К сожалению, большинство методов лабораторной диагностики (биохимический, иммуноферментный, иммунофлюоресцентный, радиоимунный и др.) весьма дороги и требуют продолжительного времени, наличия хорошо оснащенных лабораторий, сложного оборудования, дефицитных и дорогостоящих реагентов и материалов, высоко-квалифицированного медицинского персонала. По сравнению с ними биоимпедансные методы, основанные на регистрации изменения полного электрического сопротивления биологических сред переменному току, являются несравненно более простым и дешевым методом неинвазивного инструментального исследования человеческого организма, приобретающим все большую популярность для диагностики заболеваний внутренних органов [1-4]. Областями их современного применения являются исследование состояния сердечно-сосудистой системы (реокардиография), изучение водных секторов организма человека, определение жировой и костно-мышечной массы тела; дифференциальная диагностика заболеваний паренхиматозных органов (печень и пр.), кондуктометрическая диагностика клеточного состава крови и многие другие. В частности, торакальная реокардиография позволяет оценить ряд характеристик работы сердца (например, ударный объем сердечного выброса и др.), необходимых для диагностики нарушений гемодинамики и сердечной недостаточности.

Однако в настоящее время достоверность импедансометрических методов оказывается все еще недостаточной для их широкого внедрения в медицинскую практику. Несмотря на многолетнюю историю своего развития, получаемые такими методами медицинские показатели и практические результаты, тем не менее, не вполне удовлетворяют практикующих врачей в виду своей недостаточной надежности, большой погрешности, плохой повторяемости и крайней вариабельности у разных пациентов. Основная причина этого заключается в сложности и неоднозначности интерпретации полученных данных ввиду зависимости электрического импеданса от слишком большого числа разнообразных факторов как биологического, так и физического плана; высокой степени неопределенности реальных путей прохождения тока через тело человека, состоящего из элементов с самыми разными электрическими и геометрическими характеристиками, а также в слабой теоретической изученности механизмов формирования биоэлектрического импеданса для ионных, молекулярных и клеточных составляющих биологических жидкостей и тканей.

Принципиальная особенность биологических тканей заключается в том, что они представляют собой весьма сложные по составу многокомпонентные среды, значительно различающиеся по своим физическим и химическим характеристикам, в том числе по электропроводным и диэлектрическим свойствам. Поэтому различные ткани могут оказывать существенно отличное сопротивление прохождению через них переменного электрического тока, что и было положено в основу идеи метода импедансометрии. Так, наиболее выраженные токопроводящие свойства характерны для биологических внеклеточных жидкостей, основу которых составляют растворы электролитов. Прежде всего это кровь, содержащая 0,85 % раствор NaCl и, в меньшей концентрации, соли других одновалентных и двухвалентных металлов. Поскольку основная часть крови заключена в сосудах, активная составляющая сопротивления (модуль импеданса) зависит от длины и диаметра сосудистого русла, и мониторинг изменения проводимости в зависимости от фазы сердечного цикла хорошо отражает динамику состояния сердечно-сосудистой системы. По этой причине наиболее эффективно импедансометрия применяется в настоящее время в клинической кардиологии, гепатологии, в том числе для определения тактики хирургического лечения органов гепато-биллиарной системы, гинекологии и стоматологии. Изучение биоимпеданса в различных участках одного органа организма человека может дать информацию о состоянии кровообращения этого органа, очагах его усиления или ослабления, т.е. позволяет провести сканирование сосудистого русла того или иного органа.

Часть тканей являются, напротив, плохо электропроводными. Это относится к кожным покровам, соединительной ткани, фиброзно и склеротически измененным тканям. В том числе, стенка сосудистого русла обладает высоким электрическим сопротивлением, и изменения ее структуры в ходе патологического процесса влияют на результат измерения импеданса на данном участке сосудистого русла. Низкой электропроводностью обладают воздушные ткани легких. Электропроводность мембран клеток организма человека может существенно различаться в зависимости от изменения их состава, содержания жирных кислот, белков, состава окружающих электролито-содержащих жидкостей, процессов биологического возбуждения и торможения. Это характерно как для клеток фиксированных тканей, так и для клеток крови, которые выполняют к тому же и функцию переносчиков электрических зарядов.

Большое влияние на электропроводность тканей оказывает частота зондирующего тока. Проводимость возрастает с увеличением частоты переменного тока и уменьшением емкостного со-

противления тканей, определяемого их структурой – наличием, расположением и состоянием клеточных элементов и мембран, обладающих диэлектрическими свойствами. Известно, что токи с частотой до 20 кГц практически не проникают через клеточные мембраны. Ток с частотой более 150-200 кГц уже не встречает сопротивления клеточных мемб-ран. При нарушении проницаемости биологических мембран импеданс тканей уменьшается. Однако клиническое значение зондирования тканей токами разной частоты в настоящее время изучено недостаточно. Изменение силы и частоты тока, а также формы и расположения электродов зачастую приводит к настолько сильному изменению импедансометрических данных, что их количественный разброс оказывается недопустимо велик. Недостаточно изученными остаются также вопросы изменения биоэлектрического импеданса окружающих тканей организма в зависимости от состояния их кровоснабжения, биохимического и клеточного состава крови, температурных колебаний, частотного спектра зондирующего переменного тока, которые могли бы быть использованы при диагностике нарушений их функционального состояния, таких, как ишемия, повреждение, нарушение электролитного баланса, замещение соединительной тканью, жировой тканью и др. Решение этих задач будет способствовать получению точных диагностических критериев различных клинических состояний и откроет перспективы более широкого применения методов регистрации биоэлектрического импеданса в практической медицине.

Другая проблема заключается в отсутствии простой для использования в клинических условиях, и в то же время высокоточной импедансометрической аппаратуры. Основная трудность заключается в необходимости измерять величину активного сопротивления в достаточно широком диапазоне значений (до десятков и сотен кОм), т. е. при предельно низких значениях величины протекающего электрического тока. Вместе с тем, величина динамических изменений значений импеданса в исследуемых медицинских процессах, как правило, варьируется от десятков и сотен Ом, что составляет менее 1% от величины сигнала и лежит в области погрешности измерений. Также подавляющее большинство промышленных биоимпедансных анализаторов, основанных на компьютерном анализе получаемых данных, предназначены для измерения только модуля электрического импеданса и не позволяют регистрировать угол фазового сдвига тока и напряжения, необходимый для расчета емкостной составляющей импеданса. Точность же тех некоторых приборов, которые способны определять вклад емкостного сопротивления (например, [5]), слишком мала (~1% для активной

составляющей и ~2% для реактивной составляющей), а диапазон измерения сопротивления не превышает 1 кОм.

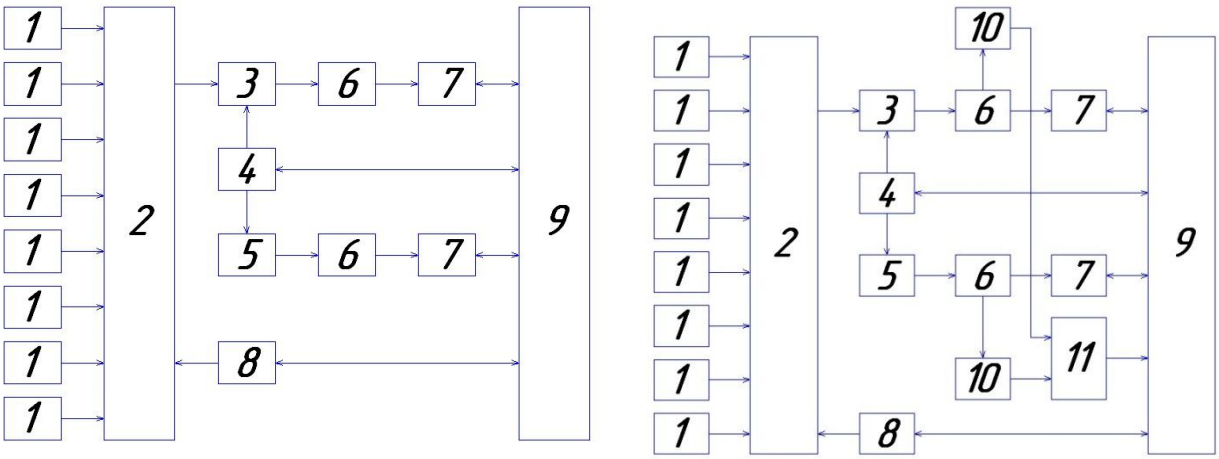
Измерение омической и емкостной составляющих комплексного импеданса в широком диапазоне частот (10 Гц – 100 кГц) позволяет подобрать эквивалентные схемы замещения (ЭС), под которыми понимаются модельные электрические схемы, составленные из резисторов, конденсаторов и более сложных структурных элементов. Достоверность расчетных формул, устанавливающих количественную связь между параметрами импеданса и электрофизическими свойствами реальной биологической среды, существенно зависит от тождественности подобранной эквивалентной модели [6-7]. Для получения достаточно полной информации об импедансном спектре необходимо выполнять измерения не менее чем на 10 частотах [8]. Измерение активной и реактивной составляющих импеданса требует использования сложных электронных блоков, что влечет за собой усложнения электронной схемы прибора и сложной калибровки каналов измерения. Применение сложных электронных блоков, подключенных к компьютеру, предполагает наличие соответствующего программного обеспечения. Таким образом, актуальной и имеющей большое практическое значение задачей является разработка методик, аппаратуры и программного обеспечения для одновременной регистрации в широком диапазоне частот модуля и фазы импеданса биологических тканей, обеспечивающих достаточно высокую точность измерений (~0,05-0,1 %), что может быть достигнуто увеличением количества проводимых за один опыт измерений (до 1000-100000 измерений в секунду) и, таким образом, соответствующим уменьшением среднеквадратичной погрешности.

Материалы и методы

Статья посвящена вопросам принципиального характера –возможности быстро и качественно измерять и обрабатывать полученные данные импедансометрии при использовании недорогой элементной базы электронного оборудования. Разработаны и созданы опытные образцы автоматизированного приборного комплекса для высокоточного измерения полного сопротивления (импеданса) и угла фазового сдвига тока и напряжения в биологических средах в широком диапазоне изменения зондирующей частоты.

Измерительный комплекс создан в двух модификациях, отличающихся диапазоном зондирующих частот: низкочастотным (до 30 кГц) и высокочастотным (50-250 кГц), что обусловлено гораздо более существенными трудностями и усложнением схемы прибора при измерениях на высоких частотах. Комплекс выполнен в виде законченного прибора, работающего совместно с персональным компьютером (ноутбу-

ком). Прибор состоит из отдельных модулей, несущих определенное функциональное назначение. Для оцифровки сигнала использован промышленно выпускаемый ЗАО "Электронные технологии и метрологические системы" (Россия, г. Зеленоград) модуль аналого-цифрового (АЦП) и цифро-аналогового (ЦАП) преобразования «ZetLab 210», подключаемый через порт USB-2 к персональному компьютеру. Скоростной АЦП позволяет в реальном времени обрабатывать большие массивы данных с передачей этих данных в компьютер для последующей обработки. Встроенный ЦАП прибора позволяет параллельно процессу приема данных осуществлять генерацию зондирующей частоты в и мультиплексирование данных с измерительных ячеек. Для этого входы и выходы АЦП-ЦАП «ZetLab 210» соединены с электронными платами усилителей, генераторов, фазоанализаторов и мультиплексоров аналоговых сигналов прибора. Усилитель – формирователь синусоидального напряжения и дешифратор-мультиплексор выполнены на отечественной элементной базе операционных усилителей К544УД1А и 155КП1 и 155ИД4. В качестве датчиков могут быть использованы различные типы измерительных ячеек, применяемых в медицине [9-10] и любые электроды для импедансометрии, как стандартные, так и собственной разработки. Структурно-функциональные схемы прибора соответственно первой и второй модификаций показаны на рис. 1.



а б

Рис. 1. Блок схема прибора: 1 – измерительные ячейки (каналы); 2 – мультиплексор аналоговых сигналов; 3 – измерительный полумост; 4 – генератор зондирующей частоты; 5 – эталонный полумост; 6 – усилитель напряжения; 7 – вход АЦП; 8 – генератор сигнала опроса ячеек; 9 – компьютер (ноутбук); 10 – усилитель-ограничитель; 11 – фазовый анализатор

Результаты и их обсуждение

Описание прибора, основные технические характеристики

Разрядность АЦП – 16 бит. Разрядность ЦАП – 14 бит. Питание прибора +5 В от порта USB-2 с током потребления менее 500 мА. Количество каналов (ячеек) регистрации импеданса и фазового угла – 8. Диапазон измерения величины импеданса – от 10 Ом до 100 кОм (разбит на 2 и 5 поддиапазонов в зависимости от модификации прибора). Диапазон измерения угла фазового сдвига – от 0 до 90 градусов. Диапазон зондирующих частот – от 10 Гц до 30 кГц прибора 1-й модификации и от 50 кГц до 250 кГц прибора 2-й модификации. Величина зондирующего тока – от 0,05 до 5 мА и зависит от величины импеданса (при малой величине импеданса ток больше, при большой – ток меньше). Погрешность прибора – от 0,01% до 2 % в зависимости от диапазона измерения импеданса и угла.

Установка параметров измерения: зондирующей частоты, тока, времени измерения ячейки (1-60 сек.), общего времени измерения (время измерения ячейки, умноженное на 8 ячеек, 8-480 сек.), частоты регистрации (5-40 точек регистрации в сек.) производится программно с помощью файла управления, созданного до начала опытов. Измерительные ячейки (каналы) прибора выполнены на основе стандартного иммунологического планшета на 96 ячеек. Используется первая группа из 8-ми ячеек. На крышке планшета жестко закреплены 8 пар электродов из нихромового провода. Применение нихромовой проволоки в качестве электродов наиболее рационально, так как этот материал дешевый, доступный и не вступает в химические реакции с исследуемым биоматериалом, что повышает достоверность полученных данных. Электроды при закрытой крышке планшета опускаются на всю высоту ячеек планшета. Данная конструкция позволяет исследовать электрические параметры различных биологических жидкостей, помещенных в ячейки планшета. Возможно также использование стандартных электродов, применяемых для реографических исследований. Это позволяет применить прибор для исследования не только биологических жидкостей, но и биологических тканей и органов человека.

Посредством гибкого экранированного кабеля ячейки (каналы) подключены к мультиплексору аналоговых сигналов 2, поочередно коммутирующего каждую ячейку с входом измерительного полумоста 3 прибора. Эталонный полумост 5 прибора снабжен переключателем диапазонов измерения импеданса и совместно с измерительным полумостом соединен с генератором зондирующей частоты 4 синусоидальной формы, параметры которого (амплитуда и частота) определяются заданными настройками первого канала ЦАП модуля «ZetLab 210». Его параметры задаются программой управления через компью-

тер 9. Последовательный перебор измерительных ячеек (каналов) через мультиплексор осуществляется вторым каналом ЦАП модуля «ZetLab 210» – генератором сигналов опроса ячеек 8, который также программно управляется компьютером 9. Усиленные по напряжению блоками 6 сигналы эталонного и измеряемого сопротивлений поступают на два канала входов 7 АЦП модуля «ZetLab 210», оцифровываются и передаются в компьютер для записи в массивах данных.

Полученные данные с каналов АЦП обрабатываются далее оригинальной компьютерной программой. Программа по отношению амплитуд измеряемого сигнала сопротивления к эталонному сигналу в каждый из моментов времени вычисляет величину полного сопротивления. При заданной зондирующей частоте определяются параметры низкочастотного фильтра с выделением точек перехода сигнала через амплитудное значение. Времена прохождения точек амплитудного значения по первому и второму каналу запоминаются, и по их разности рассчитывается фазовый сдвиг между сигналами эталонного и измерительного полумостами. Модуль АЦП «ZetLab 210» позволяет передавать данные в компьютер со скоростью 166 000 точек в секунду. Необходимо отметить, что хорошие скоростные свойства АЦП, его высокая разрядность (16 бит) не сочетаются с его повышенными шумами и помехами, достигающими 6-10 мВ при входном напряжении 2-3 В. Шумы и помехи вносят значительную погрешность измерения (до 5-6 %), что ухудшает точность всего измерительного комплекса. Для борьбы с помехами полученные полезные сигналы подвергаются двойной обработке. Большая скорость передачи данных модуля АЦП позволяет отфильтровать сбойные точки, не попадающие в средний разброс данных, эти точки удаляются. Время измерения каждого канала фиксировано и составляет 1 сек. Поскольку суммарная частота преобразования (дискретизации) по всем каналам для АЦП «ZetLab 210» равняется 500 кГц, то количество проанализированных экспериментальных точек составляет 250 000 по каждому входу. За счет такого большого количества измерений (и, как следствие, существенного уменьшения величины суммы среднеквадратичного отклонения измеренного сопротивления от среднего значения) обеспечивается высокая точность измерения сопротивления в широком диапазоне частот, токов и фазовых сдвигов входного сигнала.

После такой обработки полезных сигналов минимальная погрешность измерения с учетом корректирующих поправок, рассчитываемых и вносимых компьютером по результатам нормировочных тестовых измерений, импеданса и фазового сдвига, может быть сведена к 0,01% при малых значениях импеданса (до 500 Ом) и к 2% – при больших значениях импеданса (около 100 кОм).

При необходимости точность измерения может быть повышена путем применения более сложных и совершенных программ фильтрации, сглаживания флуктуаций и статистической обработки данных, что, однако, приводит к увеличению времени обработки результатов измерений.

Высокочастотные измерения

Второй вариант прибора с частотой зондирования до 250 кГц выполнен на той же элементной базе, но с гальванической развязкой с помощью высокочастотного ферритового трансформатора. Зондирующая частота 50-250 кГц формируется специальным генератором, управляемым ступенчато по частоте по командам ЦАП «ZetLab 210». Измерения проводятся на нескольких фиксированных частотах с шагом 50 кГц: 50, 100, 150, 200, 250 кГц. Мультиплексирование ячеек выполнено аналогично первому варианту прибора. Измерительные ячейки (каналы) прибора (см. рис. 1,б) 1 подключены к мультиплексору аналоговых сигналов 2, поочередно коммутирующего каждую ячейку со входом гальванической развязки 3, выполненной на основе высокочастотных импульсных трансформаторов. Гальваническая развязка необходима, чтобы обезопасить пациента от случайного попадания высокого напряжения на тело человека при неисправности аппаратуры. Гальваническая развязка может отсутствовать, если прибор подключен к переносному компьютеру (ноутбуку), работающему без сетевого блока питания на аккумуляторах. Однако гальваническая развязка такого типа имеет еще и неоспоримое преимущество – она обеспечивает большую помехозащищенность прибора от наводок питающей сети, работы компьютера и сотовых телефонов. Выходной трансформатор гальванической развязки является измерительным полумостом, аналогичным измерительному полумосту 3 прибора первой модификации, и совместно с эталонным полумостом 5 образует два канала измерения входных сигналов, полученных с измерительных ячеек, питающихся от генератора зондирующей частоты 4 синусоидальной формы. Далее сигналы усиливаются блоками 6 до необходимого уровня и поступают на входы АЦП 7 и далее на компьютер 9. Последовательный перебор измерительных ячеек (каналов) через мультиплексор осуществляется генератором сигналов опроса ячеек – вторым каналом ЦАП модуля «ZetLab 210» 8, который также программно управляется компьютером. Поскольку прибор второй модификации работает на высоких частотах (50-250 кГц), усилители выполнены на высокочастотных транзисторах и имеют отрицательную обратную связь по постоянному току. Это обеспечивает их стабильную работу в большом интервале окружающей температуры. Обработка сигнала импеданса в компьютере сводится к анализу амплитудных значений сигналов первого

и второго канала без учета фазовых сдвигов. Обработка сигнала фазового сдвига осуществляется следующим образом: сигналы первого и второго канала обработки дополнительно усиливаются блоками усилителей-ограничителей 10, и в виде прямоугольных импульсов зондирующей частоты поступают на блок фазового анализатора 11. Блок фазового анализатора выполнен на основе логического элемента "Исключающее ИЛИ" и интегратора. По измеренному интегратором разностному временному промежутку и известной зондирующей частоте в компьютере вычисляется фазовый сдвиг между каналами.

Работа программы обслуживания автоматизированного приборного комплекса второй модификации осуществляется аналогично прибору первой модификации, за исключением того, что в нее введены модули управления высокочастотным транзисторным генератором зондирующей частоты и модули управления коэффициентами усиления усилителей 6 и 10 с целью автоматического выбора предела измерения импеданса во всем диапазоне частот и величин импеданса.

Проведение и обработка измерений

После загрузки управляющего файла проведения опыта автоматически, без участия оператора проводится серия экспериментов с заданными параметрами. Результаты каждого опыта последовательно записываются в текстовый файл с возможностью дальнейшего представления их в виде графиков. Программа обработки отфильтровывает сбойные точки, восстанавливает первоначальный вид синусоидальных колебаний зондирующей частоты в первой модификации прибора, либо определяет амплитудные значения напряжений и токов зондирующей частоты во второй модификации прибора. По сдвигу фаз амплитудных значений первого и второго каналов АЦП в первой модификации прибора рассчитывается угол сдвига фаз тока и напряжения при заданной зондирующей частоте. Во второй модификации прибора угол сдвига фаз тока и напряжения определяется фазоанализатором. По завершению программы измерений полученные в опыте данные записываются в выходной текстовый файл. В нем хранятся все данные по всем опытам, его имя соответствует времени и дате начала опытов.

Калибровка приборных комплексов проводилась в два этапа. Для калибровки активного сопротивления применялся набор безиндуктивных резисторов, обеспечивающих тарировку прибора во всех диапазонах. Емкостную составляющую калибровали наборами безиндукционных конденсаторов, совмещенных с эталонными резисторами, включаемых либо параллельно, либо последовательно для обеспечения тарировки по фазовому углу. Для сравнения использовались и цепочки из

трех элементов (два резистора и конденсатор, включенные по трехэлементной схеме) и более элементов. Расчеты цепочек осуществлялись по программам расчета лестничных фильтров и номограммам с учетом входных сопротивлений прибора на разных диапазонах его работы. Все калибровочные данные использовались в программе обработки результатов измерений с использованием линейных и нелинейных интерпретаций.

На рис. 2 и рис. 3 показаны варианты вывода данных после измерений импеданса и фазового угла модельных сред в виде текстовой и графической информации. В качестве модельных сред использовались наборы постоянных резисторов (рис. 2) и наборы цепочек из резисторов и конденсаторов (рис. 3).

Канал	Частота,гц	Импеданс,ом	Фаз.сдвиг,гр	Точек
1	500	124.048	0.000	43
2	500	214.591	0.000	55
3	500	347.896	0.000	54
4	500	425.101	0.000	24
5	500	504.089	0.000	29
6	500	641.226	0.000	26
7	500	736.660	0.000	27
8	500	804.364	0.000	29
Канал	Частота,гц	Импеданс,ом	Фаз.сдвиг,гр	Точек
1	2000	121.435	0.000	55
2	2000	211.588	0.000	53

Рис. 2. Пример выходного файла данных в текстовом формате

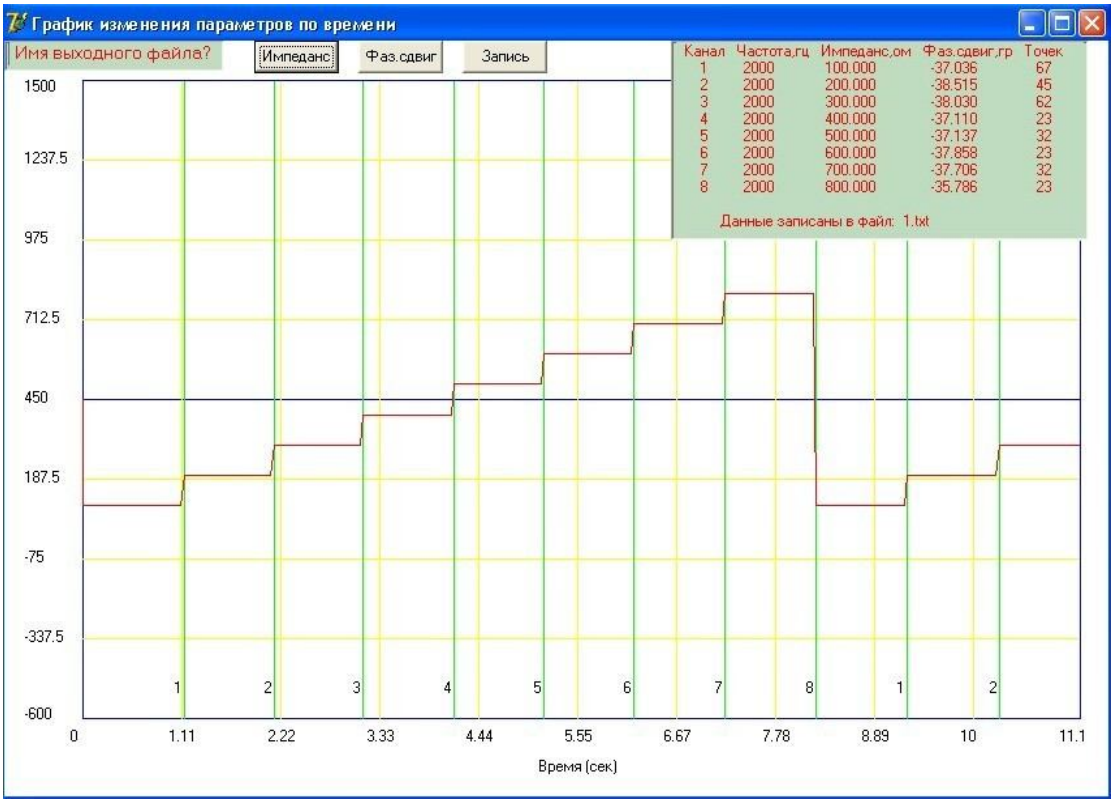


Рис. 3. Пример выходного файла изменения импеданса (фазового угла сдвига) по ячейкам во времени в графическом формате

На рис. 2 видно, что при достаточно большом заданном общем времени измерения (например, 1 мин) число точек усреднения по каждой ячейке (каналу) колеблется от 24 до 55, что позволяет существенно повысить достоверность измерения.

На рис. 3 показаны диаграммы измерения импеданса восьми модельных резисторов номиналами от 100 до 800 Ом. Вертикальные линии с номерами (1-8) соответствуют номеру измерительной ячейки или канала. В верхней правой части рисунка выведен пример текстового файла измерения импеданса при наличии фазового сдвига.

Программа обслуживания автоматизированного приборного комплекса написана на языке "Delphi" и имеет модульную структуру. Каждый отдельный модуль обслуживает части программы, ответственные за работу генераторов ЦАП, каналов АЦП, графических подпрограмм и подпрограмму обработки данных. В целом выполнение программы производится автоматически, без вмешательства оператора, по сценарию, записанному в командном файле. Командный файл является текстовым, каждая строка определяет параметры текущего опыта: величину зондирующей частоты, ее амплитуду, которая задает величину зондирующего тока, время измерения каждой ячейки, общее время измерения, что позволяет усреднять значения измеренных параметров каждой ячейки при ее многократном повторе измерений.

Выводы

Предлагаемый автоматизированный комплекс значительно уменьшает время измерения электрического импеданса исследуемых биологических сред и обработку проведенных испытаний и может найти применение в клинической практике. Программное обеспечение прибора позволяет без участия оператора провести серию опытов с заранее заданными параметрами, указанными в текстовом файле управления, обработать полученные данные и вывести их в виде таблиц и графиков с указанием номера канала, частоты зондирования, точек усреднения данного канала за все время измерения в опыте. Для удобства оператора файл управления можно набрать в любом текстовом редакторе на компьютере, сохранить его, использовать в серии опытов, и при необходимости подредактировать для новой серии опытов. При запуске программа считывает файл управления и проверяет его на возможные ошибки (например, отличие общего времени измерения в опыте от суммарного времени опроса всех измерительных ячеек, несоответствие возможному диапазону зондирующих частот и т. д.).

Схемная электронная реализация включает в себя некоторые узлы, являющиеся достаточно оригинальными по своему техническому решению. Это, например, узел мультиплексирования входных сигналов с датчиков. На разъеме датчиков предусмотрено включение измерительной ячейки с нулевым номе-

ром. Эта ячейка может быть выполнена как на базе обычной ячейки иммунологического планшета, так и на базе стандартных электродов, применяемых в импедансометрии. При наличии такой ячейки, измеренные значения импеданса по остальным 8-ми ячейкам будут являться сравнительными данными по отношению к нулевой ячейке. Также оригинальным является узел генератора синусоидальных колебаний, выполненный программно на базе ЦАП блока генераторов прибора «ZetLab 210». Программное обеспечение автоматизированного приборного комплекса позволяет синхронизировать частоту синусоидального генератора с частотой обработки входных сигналов датчиков, тем самым позволяя понизить влияние внешних помех на процесс измерения. Оригинальным также является узел получения данных об угле фазового сдвига. В приборе 1-ой модификации фазовый сдвиг вычисляется программно путем непосредственного измерения текущих амплитуд эталонного и измерительного каналов. Это стало возможным благодаря достаточному быстродействию АЦП прибора «ZetLab 210» и разработанной программе обработки данных всего комплекса.

Список литературы

1. Биоимпедансный анализ состава тела человека / Д. В. Николаев, А. В. Смирнов, И. Г. Бобринская, С. Г. Руднев. М.: Наука, 2009. 392 с.

2. Grimnes S., Martinsen O. G. Bioimpedance and bioelectricity basics. Second edition. Amsterdam: Elsevier Science & Technology Books, 2008. 471 p.

3. Мишланов В.Ю. Исследование функции внешнего дыхания путем измерения электрического импеданса легких и дыхательных путей на различных частотах зондирующего переменного электрического тока // Вестник современной клинической медицины. 2011. Т.4, № 4. С.24-28.

4. Исследование функции внешнего дыхания методом электроимпедансной спирометрии: экспериментально-клинические параллели / А. Л. Зуев, В. Ю. Мишланов, Т. Л. Устьянцева, Я. В. Мишланов, В. В. Савкин // Российский физиологический журнал им. И. М.Сеченова. 2013. Т. 99, № 12. С. 1425–1434.

5. Биоимпедансный анализатор АВС-01 "Медасс". Техническое описание, Руководство пользователя, Паспорт / А. В. Смирнов, В. А. Колесников, Д. В. Николаев, Т. А. Ерюкова. М.: НТЦ "Медасс", 2009.

6. Эквивалентные электрические модели биологических объектов / А. Л. Зуев, В. Ю. Мишланов, Н. В. Шакиров, А. И. Судаков, А. В. Фролов // Российский журнал биомеханики. 2012. Т. 16, № 1 (55). С. 110–120.

7. Зуев А. Л., Судаков А. И., Шакиров Н. В. Тождественные электрические модели биологических объектов // Российский журнал биомеханики. 2014. Т.18, №4. С.491-497.

8. Смирнов А. В., Цветков А. А., Туйкин С. А. Методы и аппаратура электроимпедансной спектроскопии // Диагностика и лечение нарушений регуляции сердечно-сосудистой системы. 2006. №8. С.26-30.

9. Pop G. A. M., de Backer T. L. M. On-line electrical impedance measurement for monitoring blood viscosity during on-pump heart surgery// European surgical research. 2004. №3. P.259-265.

10. Электрофизические параметры экспериментальных моделей биологических жидкостей / О. С. Добрынина, Б. А. Зон, Г. И. Козинец, А. Н. Лихолет, Г. В. Пахомов, В. М. Погорелов, В. И. Двуреченский // Конденсированные среды и межфазные границы. 2013. № 3. С. 272–278.

Поступила в редакцию 01.02.2019

Подписана в печать 08.04.2019

References

1. Nikolaev D. V., Smirnov A. V., Bobrinskaya I. G., Rudnev S. G. Bioimpedansnyj analiz sostava tela cheloveka. Moscow, Nauka Publ., 2009. 392 p. (In Russ.).

2. Grimnes S., Martinsen O. G. Bioimpedance and bioelectricity basics. Second edition. Amsterdam: Elsevier Science & Technology Books, 2008. 471 p.

3. Mishlanov V. Yu. Issledovaniye funktsii vneshnego dykhaniya putem izmereniya elektricheskogo impedansa legkikh i dykhatel'nykh putey na razlichnykh chastotakh zondiruyushchego peremennogo elektricheskogo toka. *Vestnik sovremennoy klinicheskoy meditsiny*, 2011, vol. 4, no. 4, pp. 24-28 (In Russ.).

4. Zuev A. L., Mishlanov V. Yu., Ust'yantseva T.L., Mishlanov Ya.V., Savkin V.V. Issledovaniye funktsii vneshnego dykhaniya metodom elektroimpedansnoy spirometrii: eksperimental'no-klinicheskiye paralleli. *Rossiyskiy fiziologicheskiy zhurnal im. I. M. Sechenova*, 2013. vol. 99, no. 12, pp. 1425-1434 (In Russ.).

5. Smirnov A. V., Kolesnikov V. A., Smirnov A. V., Erukova T. A. Bioimpedansnyj analizator ABC-01 "Medass". Tekhnicheskoe opisanie, Rukovodstvo pol'zovatelya, Pasport. Moscow, 2009 (In Russ.).

6. Zuev A. L., Mishlanov V. Yu., Sudakov A. I., Shakirov N. V., Frolov A. V. Equivalent electrical models of biological objects. *Russian Journal of Biomechanics,* 2012, vol. 16, no. 1 (55), pp. 98–107 (In Russ.).

7. Zuev A. L., Sudakov A. I., Shakirov N. V. Identical electrical models of biological objects. *Russian Journal of Biomechanics*, 2014, vol. 18, no. 4, pp. 427-432 (In Russ.).

8. Smirnov A. V., Cvetkov A. A., Tujkin S. A. Metody i apparatura ehlektroimpedansnoj spektroskopii. *Diagnostika i lechenie narushenij regulyacii serdechno-sosudistoj sistemy*, 2006, no. 8, pp.26-30 (In Russ.).

9. Pop G. A. M., de Backer T. L. M. On-line electrical impedance measurement for monitoring blood viscosity during on-pump heart surgery. *European surgical research*, 2004, no. 3, pp. 259-265.

10. Dobrynina O. S., Zon B. A., Kozinec G. I., Liholet A. N., Pahomov G. V., Pogorelov V. M., Dvurechenskij V. I. EHlektrofizicheskie parametry ehksperimental'nyh modelej biologicheskih zhidkostej. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granicy*, 2013, no.3, pp. 272-278 (In Russ.).

Received 01.02.2019

Accepted 08.04.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Андрей Леонидович Зуев, доктор физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук», г. Пермь, Российская Федерация, профессор кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: zal@icmm.ru

Andrey L. Zuev, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Senior Scientific Researcher of Perm Federal Research Center UB RAS; Professor of Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, e-mail: zal@icmm.ru

Виталий Юрьевич Мишланов, доктор медецинских наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой пропедевтики внутренних болезней ФГБОУ ВО «Пермский государственный медицинский университет им. акад. Е. А.Вагнера Министерства здравоохранения Российской Федерации», г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: permmed@hotmail.com

Vitaly Yu. Mishlanov, Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding member of Russian Academy of Sciences, Head of Internal Diseases Propedeutics Chair, Acad. Wagner Perm State Medical University, Perm, Russian Federation, e-mail: permmed@hotmail.com

Андрей Иванович Судаков, ведущий инженер ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук», г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: sudakov@icmm.ru

Andrey I. Sudakov, lead engineer, Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation, e-mail: sudakov@icmm.ru

Нагим Вагизович Шакиров, ведущий инженер ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук», г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: shakirov @icmm.ru

Nagim V. Shakirov, N. V. Shakirov, lead engineer, Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation, e-mail: shakirov @icmm.ru

УДК 613.6: 615.9: 623.74

Альтернативный способ мониторинга судов для обеспечения безопасного мореплавания при отсутствии радиоизлучений от AIS-транспондеров

А. И. Мухин[1] ✉, И. А. Пучкова[1], Д. С. Коптев[2]

[1] Военный институт (научно-исследовательский) Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Российская Федерация, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13

[2] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Российская Федерация, 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

✉ e-mail: tolik516@yandex.ru

Резюме

Цель исследования *заключается в разработке альтернативного способа мониторинга судов при отсутствии радиоизлучений от AIS-транспондеров. Способ заключается в оценке энергетической доступности корабельных радиоэлектронных средств для современных и перспективных коммуникационных спутников. Оценка базируется на расчетах энергетического соотношения сигнал/шум, обеспечиваемого на входе демодулятора низкоорбитального спутника – ретранслятора.*

Методы*. Для реализации способа и получения искомой энергетической оценки радиоизлучения корабельных радиоэлектронных средств представлен математический аппарат, позволяющий оценить мощность сигнала на входе радиоприёмного устройства спутника. Приведены математические зависимости для расчёта энергетических потерь сигнала, возникающих на трассе «корабельное судно – космический аппарат» для двух разных случаев: благоприятных и неблагоприятных условий. Также отражена формула для расчёта чувствительности приёмной аппаратуры космического аппарата.*

Результаты*. Итогом проведенных исследований является разработка альтернативного способа мониторинга судов с помощью низкоорбитального спутника. На основе представленного математического аппарата сформулированы критерии оценки возможности обнаружения и анализа сигналов корабельных радиоэлектронных средств. Построены зависимости ослабления мощности сигнала РЭС при увеличении наклонной дальности КА с учётом БУ и НБУ, а также возможность приема по главному (ГЛ) и боковому лепестку (БЛ).*

Заключение*. В статье рассмотрена неэффективность автоматической идентификационной системы в случаях отсутствия радиоизлучений от AIS-транспондеров. При возникновении таких ситуаций, с целью обеспечения безопасного мореплавания, предложен альтернативный способ мониторинга судов, основанный на составлении радиоэлектронного портрета объекта по результатам приема радиосигналов, излучаемых от других бортовых радиоэлектронных средств. Анализ полученных зависимостей позволяет делать вывод о том, что существующие низкоорбитальные спутники в большинстве случаев способны принимать радиосигналы от корабельных радиоэлектронных средств. В результате анализа принятых радиоизлучений осуществляется идентификация объекта и занесение его в базу данных судов и портов.*

Ключевые слова*: автоматическая идентификационная система; корабельное судно; низкоорбитальный спутник; мониторинг радиоизлучений; математический аппарат.*

© Мухин А. И., Пучкова И. А., Коптев Д. С., 2019

***Конфликт интересов**: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: Мухин А. И., Пучкова И. А., Коптев Д. С. Альтернативный способ мониторинга судов для обеспечения безопасного мореплавания при отсутствии радиоизлучений от AIS-транспондеров // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 2. С. 22–34.

UDC 613.6: 615.9: 623.74

Alternative Method of Monitoring of Ships for Ensuring Safe Safety in the Absence of Radio Emissions from AIS Transpondents

A. I. Mukhin[1] ✉, I. A. Puchkova[1], D. S. Koptev[2]

[1] Military Institute (research) of the Federal State Treasury of Higher Education “Military Space Academy named after A. F. Mozhaiskogo”, Russian Federation, 197198, St. Petersburg, Zhdanovskaya St., 13

[2] Southwest State University, 94, 50 Let Oktyabrya str., Kursk, 305040, Russian Federation

✉ e-mail: tolik516@yandex.ru

Abstract

***Purpose of research** is to develop an alternative method of monitoring ships in the absence of radio emission from AIS transponders. This method consists in estimating the energy availability of shipboard radio electronic equipment for modern and future communication satellites. The estimate is based on calculations of the signal-to-noise energy ratio provided at the input to the demodulator of a low-orbit satellite –transmitter.*

***Methods**. To implement the method and obtain the desired energy estimate of radio emission from shipborne radio electronic equipment, a mathematical apparatus is presented that allows one to estimate the signal power at the input of a satellite receiver. Mathematical dependences are given for calculating the energy loss of a signal arising on the route “ship vessel "spacecraft" for two different cases: favorable and unfavorable conditions. Also reflected is a formula for calculating the sensitivity of the receiving apparatus of the spacecraft.*

***Results**. The result of the research is the development of an alternative method of monitoring ships using a low-orbit satellite. On the basis of the presented mathematical apparatus, the criteria for assessing the possibility of detecting and analyzing signals of shipboard radio electronic equipment are formulated. The dependences of the attenuation of the power of the RES signal with increasing the slope range of the spacecraft taking into account the CU and the NBU, as well as the possibility of receiving the main (GL) and side lobe (BL) are constructed.*

***Conclusion**. The article considers the inefficiency of the automatic identification system in cases of absence of radio emission from AIS transponders. In the event of such situations, in order to ensure safe navigation, an alternative method for monitoring ships was proposed, based on the compilation of an electronic portrait of an object based on the results of receiving radio signals emitted from other on-board radio electronic means. The analysis of the obtained dependences suggests that the existing low-orbit satellites in most cases are capable of receiving radio signals from ship radio electronic means. As a result of the analysis of the received radio emissions, the object is identified and entered into the database of ships and ports.*

***Keywords**: automatic identification system; ship vessel; low-orbit satellite; radio emission monitoring; mathematical apparatus.*

Conflict of interest. *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Mukhin A. I., Puchkova I. A., Koptev D. S. Alternative Method of Monitoring of Ships for Ensuring Safe Safety in the Absence of Radio Emissions from AIS Transpondents. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, 9(2): 22–34 (In Russ.).

***

Введение

Для уменьшения риска столкновения судов, начиная с 2000 года, была разработана и внедрена на многие плавательные средства автоматическая идентификационная система (АИС). Данная система предназначена для мониторинга судов, их идентификации, оценивания габаритов, местоположения, курса и в результате – отображения надводной обстановки на цифровой карте движения судов. Информация о судне транслируется в эфир с помощью бортового АИС – транспондера, который автоматически отправляет сообщения на радиочастотах 161,975 МГц и 162,025 МГц.

Сообщения транспондера принимаются экипажами других судов, береговыми службами, отвечающими за безопасность на акватории, службами поиска и спасения, коммуникационными спутниками типа Orbcomm-G2, а также обычными радиолюбителями, которых с каждым годом становится все больше. Рост радиолюбителей обусловлен тем, что для приема сигналов АИС могут быть использованы дешевые DVB-T/T2 ресиверы, реализованные на базе чипсета RTL2832U. Принятые сообщения заносятся в базу данных судов и портов, в результате чего формируется актуальная карта надводной обстановки.

В соответствии с Международной конвенцией по охране человеческой жизни на море (SOLAS) все суда валовой вместимостью более 300 регистрационных тонн должны быть оборудованы АИС [1]. Причем это требование распространяется не только на гражданские суда, но и на военные корабли. Однако в случаях захвата судна пиратами, возникновения аварий, выхода корабля на боевое дежурство или по иным причинам, может произойти отключение (поломка) AIS-транспондеров, что создает предпосылки к столкновениям и катастрофам. Так, например, 21 августа 2017 г. американский эсминец «Джон С. Маккейн» (DDG-56) класса «Арли Бёрк» столкнулся с либерийским нефтяным танкером «Алник», 16 июня 2017 г. в эсминец «Фицджеральд» (DDG-62) врезался филиппинский контейнеровоз. Результатом всех этих происшествий являлись человеческие жертвы [2].

Таким образом, разработка и применение альтернативного способа мониторинга судов при отсутствии радиоизлучений от AIS-транспондеров позволит существенно повысить безопасное мореплавание. Для реализации способа необходимо провести анализ излучений от других бортовых радиоэлектронных средств.

Постановка задачи

На гражданских судах и на военных кораблях, помимо AIS-транспондеров устанавливаются дополнительные радиоэлектронные средства (РЭС).

Полный список судовых станций (The List of Ship Stations – List V) ежегодно публикуется в виде специального справочника. За актуальность указанного списка станций отвечает Международный союз электросвязи. Справочник издается на трех языках: английском, испанском и французском [3].

Все представленные в справочнике судовые станции отвечают требованиям Регламента радиосвязи [4]. В целях распределения радиочастот, земной шар разделен на несколько районов (рис. 1).

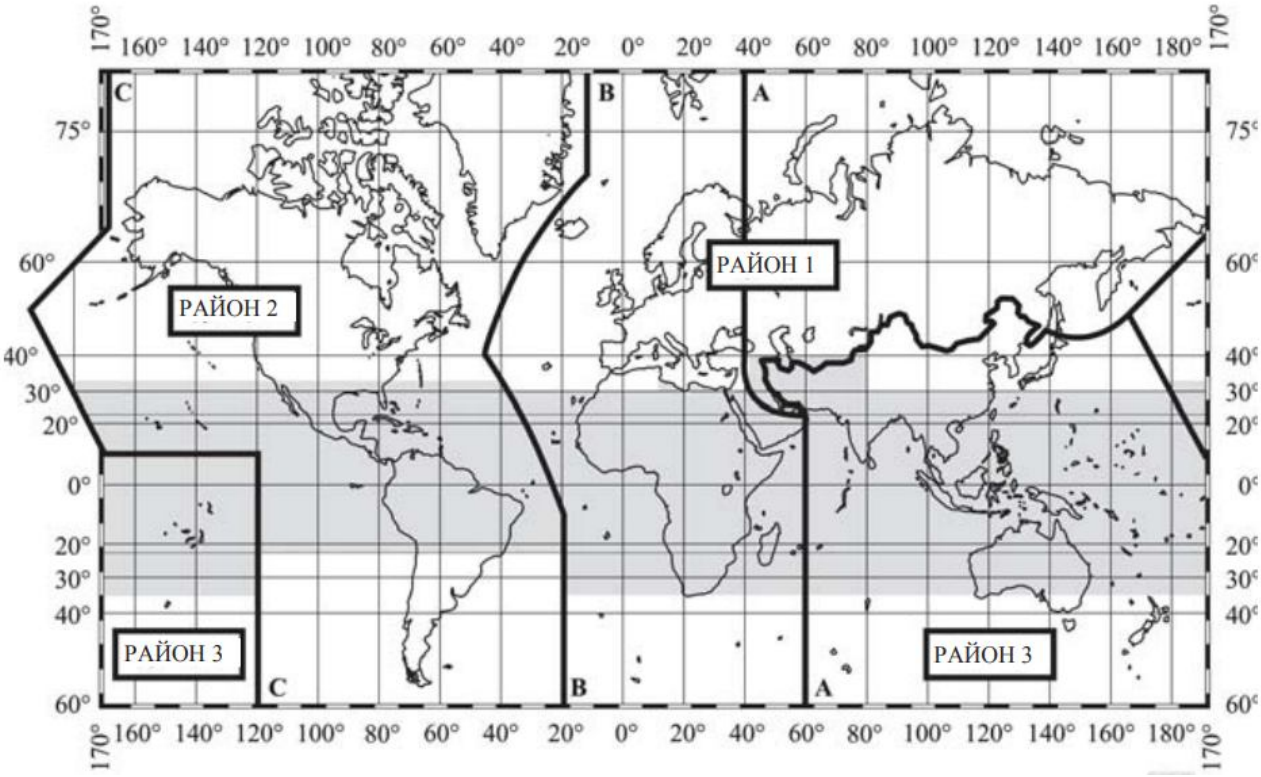


Рис. 1. Районы распределения радиочастот

На карте затененная часть представляет собой Тропическую зону.

Район 1 включает в себя зону, ограниченную на востоке линией А и на западе линией В.

Район 2 включает в себя зону, ограниченную на востоке линией B и на западе линией C.

Район 3 включает в себя зону, ограниченную на востоке линией C и на западе линией A.

Весь список судовых станций классифицирован на следующие категории: рыболовецкое судно, торговое, речное, спасательное, вспомогательное, лихтер, контейнеровоз, платформа, подводная лодка.

В справочнике указано количество судов, оснащенных различной спасательной аппаратурой, такой как:

– A-радиобуй (в случае бедствия излучает на частоте 2182 кГц);

– B-радиобуй (121,5 МГц);

– C-радиобуй (243 МГц);

– D-радиобуй (156,525 МГц);

– E-спутниковый радиобуй (функционирует в диапазоне 406-406,1 МГц);

– F-спутниковый радиобуй (функционирует в диапазоне 1645,5-1646,5 МГц);

– G-радиолокационный маяк-ответчик (функционирует в диапазоне 9200-9500 МГц);

– BC1-радиобуй (излучает на двух частотах 121,5 и 243 МГц);

– A1BC1-радиобуй (излучает на нескольких частотах: 2182 кГц, 121,5 и 243 МГц).

Представлены суда, на которых установлены связные и метеорологические РЭС:

– C-радиотелефон;

– D-радиотелекс;

– O-передача метеосводок;

– P-факсимильная связь;

– R-радиотелеграммы.

Гражданские суда, по желанию их владельцев, могут быть оснащены навигационными РЛС. Навигационные РЛС предназначены для обнаружения и сопровождения таких надводных объектов, как: суда, корабли, айсберги, острова, береговые линии.

В настоящее время существует множество радионавигационных РЛС как отечественного, так и зарубежного производства.

К отечественным производителям РЛС относятся:

– ЗАО «Морские комплексы и системы», г. Санкт-Петербург (РЛС «Нева-М»);

– ОАО «Равенство», г. Санкт-Петербург (РЛС «Ряд»);

– ОАО «Саратовский радиоприборный завод», г. Саратов (РЛС «Иртыш-2РМ», «Терса»);

– ОАО «Горизонт», г. Ростов-на-Дону (РЛС «Наяда-25М1», «Наяда-25МЕ», «Наяда-25М1Р», «Наяда-34М», «Лиман-18М1», «Галс», «Горизонт-25»).

К иностранным фирмам, производящим радионавигационные РЛС, относятся [5]:

– «Kelvin Hughes», «Raymarine» (Великобритания);

– «Icom Incorporated», «Koden Electronics», «JRC», «Furuno» (Япония);

– «Raytheon Marine GmbH» (Германия, США);

– «SAM Electronics GmbH» (Германия);

– «Simrad», «Sea Hawk», «Kongsberg Maritime ship system» (Норвегия);

– «Northrop Grumman» (США, Великобритания);

– «Samyung ENC» (Южная Корея);

– «Terma radar system» (Дания);

– «Radio Holland Marine B.V.» (Нидерланды).

Анализ характеристик радионавигационных РЛС позволил сделать следующие выводы:

– излучение радиосигналов происходит на трех несущих частотах: X-диапазон 9,375 ГГц, S-диапазон 3,05 ГГц, K-диапазон 33,2 ГГц (как правило, используется береговыми РЛС);

– мощность излучений составляет от 2 до 12 кВт,

– точность измерения углов 1–3°;

– разрешающая способность по углу 1–3°;

– разрешающая способность по дальности 30-100 м;

– дальность действия от 10 до 40 морских миль;

– одновременное отслеживание до 10 судов.

Выбор для радиолокационного излучения X, S и K-диапазонов частот не случаен и обоснован тем, что именно на этих частотах происходит меньшее затухание электромагнитной волны в слое тропосферы, особенно при неблагоприятных условиях – в случаях дождя высокой интенсивности.

Приблизительное значение дальности обнаружения надводных объектов (в милях) при нормальном состоянии атмосферы (атмосферное давление 760 мм, температура воздуха 15 С°, относительная влажность 60%) рассчитывается по формуле

$$D = 2{,}39\left(\sqrt{h_a} + \sqrt{h_0}\right), \qquad (1)$$

где h_a – высота антенны РЛС над уровнем моря, м;

h_0 – высота отражающей части объекта над уровнем моря, м.

Помимо дальности обнаружения надводных объектов, радионавигационные РЛС обладают следующими техническими характеристиками:

– однозначная дальность действия;

– разрешающая способность по скорости;

– разрешающая способность по углу.

Однозначная дальность действия оценивается по формуле

$$D_{одн} = \frac{c \cdot T}{2}, \qquad (2)$$

где T – период следования импульсов.

Разрешающая способность РЛС по радиальной скорости рассчитывается:

$$\Delta\vartheta_r = \frac{\lambda}{2 \cdot \tau_и}, \qquad (3)$$

где λ – длина радиоволны;

$\tau_и$ – длительность импульса.

Разрешающая способность по углу (или по направлению) в горизонтальной плоскости – минимальный угол а между направлениями на два равноудален-

ных точечных объекта, при котором отраженные сигналы от этих целей принимаются и отображаются на индикаторе (мониторе) раздельно.

Существуют такие понятия, как реальная разрешающая способность ар, потенциальная ап (приблизительно равна ширине диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости) и индикаторная аи.

Реальная разрешающая способность РЛС оценивается:

$$ар = ап + аи. \quad (4)$$

Потенциальная разрешающая способность вычисляется как:

$$a_n \approx \frac{\lambda}{l_a}, \quad (5)$$

где la – линейный размер антенны (в метрах).

Индикаторная разрешающая способность определяется выражением

$$a_u = 57{,}3\left(\frac{d_n}{r}\right), \quad (6)$$

где dn – диаметр яркостного пятна на экране монитора,

r – расстояние от центра развертки до цели.

Для разных шкал дальностей в радионавигационных радарах применяются определенные длительности и частоты следования импульсов. В таблице представлены соотношения между дальностями действия (морские мили), длительностями импульсов и частотами следования импульсов

Параметры радионавигационных радаров для определенных шкал дальности

Шкалы дальности, мм	Длительность импульса, мкс	Частота следования импульсов, Гц
0,25…1,5	0,08…0,12	1800…2200
2,0…3,0	0,3	1200…1300
4,0…48,0	0,8	600
72,0…120,0	1,2	450…500

Анализ технических характеристик современных радионавигационных РЛС, позволяет сделать вывод о том, что реальная разрешающая способность по дальности на шкалах 1-2 мили составляет 15-25 м, а по направлению – 0,8°–1,5°, что является относительно неплохими показателями.

Однако при сильной качке судна, а также в условиях выпадения обильных гидрометеоров (града, снега, ливня) у навигационных РЛС может значительно снизиться точность обнаружения объектов (на 30-50%), что не удовлетворяет требованиям безопасного судовождения. Также, в условиях шторма, из-за больших волн может резко увеличиться число ложных обнаружений. На военных кораблях устанавливаются специфические РЭС, позволяющие выпол-

нять характерную для определенного типа корабля боевую задачу. Поэтому, по излучениям РЭС существует возможность распознания типов кораблей.

Корабельные РЭС периодически подвергаются модернизации. Модернизация может заключаться в изменении вида антенн и параметров излучаемых радиосигналов. В силу разных причин модернизация РЭС на всех классах кораблей проходит не одновременно. Поэтому анализ радиоэлектронного портрета объекта в ряде случаев позволяет распознавать не только тип корабля, но и осуществлять их распознавание по экземплярам.

Для составления радиоэлектронного портрета объекта могут быть использованы в том числе данные, полученные от РЭС применяемых самолетов палубной авиации, например:

– AN/APS-145 самолета ДРЛО Грумман E-2C в диапазоне частот 410-460 МГц (минимальная длительность импульса 5 мкс);

– РЛС AN/APY-9 самолета ДРЛО E-2D в диапазоне частот 0,3-3 ГГц;

– РЛС AN/APY-10 самолета ДРЛО P-8A «Посейдон» в диапазоне частот 8-12 ГГц [6-8].

Анализ источников позволяет сделать вывод о том, что все специфические РЭС (посадки ЛА, воздушного обзора, управления огнем, навигации и т.п.) излучают в строго определенном и отличном друг от друга диапазоне радиочастот.

Частотное распределение излучений типовых РЭС ВМС США наглядно представлено на рисунке 2.

Материалы и методы

Перед тем, как распознать корабль по радиоизлучениям его бортовых РЭС, необходимо оценить энергетическую доступность излучений для коммуникационных спутников [9].

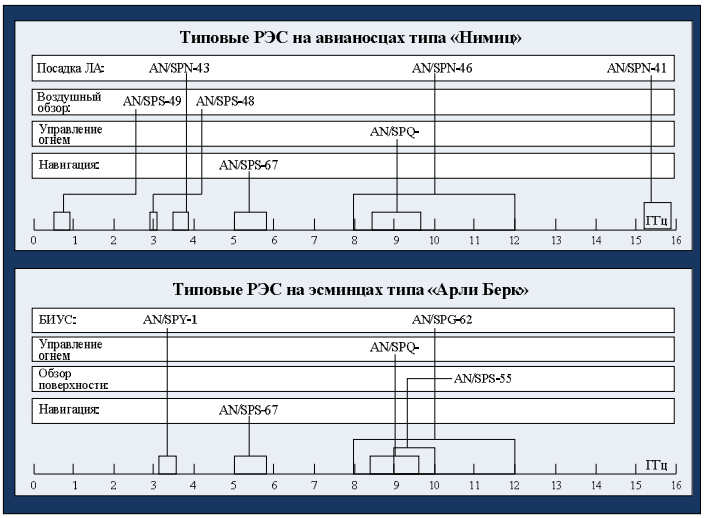


Рис. 2. Частотное распределение излучений типовых РЭС

Мощность сигнала на входе РПУ спутников может быть рассчитана по формуле

$$P_{пр_КА} = \frac{P_{пер} \cdot G_{пер} \cdot G_{пр} \cdot \eta_{пер} \cdot \eta_{пр} \cdot \lambda^2}{16 \cdot \pi^2 \cdot d^2 \cdot L_{доп}}, \quad (7)$$

где Рпер – мощность излучаемого радиосигнала РЭС;

Gпер, Gпр – коэффициент усиления передающей/приемной антенны;

$\eta_{пер}, \eta_{пр}$ – коэффициент передачи волноводного тракта;

λ – длина волны радиосигнала РЭС;

d – наклонная дальность (расстояние между целью и КА РЭР;

Lдоп – дополнительные потери на радиолинии.

Коэффициент усиления передающей/приемной антенны оценивается по формуле

$$G_{пер} = \frac{4 \cdot \pi \cdot S_a \cdot \eta}{\lambda^2}, \quad (8)$$

где Sa – эффективная площадь антенны.

Для РСА эффективная площадь антенны составляет

$$Sa = Dx \cdot Dy \cdot \eta_{PCA}, \quad (9)$$

где Dx и Dy – длина и ширина физической антенны, соответственно;

η_{PCA} – коэффициент полезного действия РСА (обычно 0,8-0,9).

Для зеркальной антенны эффективная площадь антенны составляет

$$Sa = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \eta_{ЗА}}{4}, \quad (10)$$

где D – диаметр зеркальной антенны;

$\eta_{ЗА}$ – коэффициент использования поверхности зеркальной антенны (обычно 0,5-0,6).

Дополнительные потери на радиолинии определяются формулой

$$L_{доп} = L_a \cdot L_д \cdot L_н \cdot L_п, \quad (11)$$

где La – коэффициент поглощения энергии сигнала в нижнем слое атмосферы;

Lд – коэффициент поглощения энергии сигнала в гидрометеорах;

Lн – коэффициент, характеризующий потери из-за неточности наведения антенны;

Lп – коэффициент, характеризующий потери из-за несогласованности поляризаций передающей и приемной антенн.

Дополнительные потери на радиолинии земля-космос необходимо рассчитывать с учетом благоприятных условий (БУ) и неблагоприятных условий (НБУ). При благоприятных условиях прием радиосигналов осуществляется в ясную погоду с точным наведением антенн и при полной согласованности поляризаций. При неблагоприятных условиях учитываются максимальные потери в гидрометеорах, потери при неточности наведения антенны и несогласованности поляризаций антенн.

Дополнительные потери рассчитываются следующим образом:

– потери в атмосфере La присутствуют при любых условиях, вычислялись исходя из того, что этот слой в среднем составляет 100 км;

– потери в дожде Lд, а именно в слое тропосферы, где могут образовываться гидрометеоры, составляют 3 км. Причем, при НБУ необходимо рассматривать потери при дожде высокой интенсивности;

– потери из-за неточности наведения антенны;

– потери из-за несогласованности поляризации.

Оценить чувствительность приемной аппаратуры КА РЭР можно с помощью формулы

$$P_Ч = k \cdot T_Ш \cdot \Delta f, \qquad (12)$$

где k – постоянная Больцмана ($k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\, Дж / К$);

ТШ – эквивалентная суммарная шумовая температура всей приемной системы с учетом внутренних и внешних шумов (1000 К);

Δf – полоса пропускания РПУ (12 МГц).

Численное моделирование (эксперимент)

Оценка отношения сигнал/шум на выходе РПУ проводится исходя из выражения

$$\left(\frac{P_C}{P_Ш}\right) = \left(P_{пр_КА} - P_Ч\right). \qquad (13)$$

Если значения отношения сигнал/шум находится в пределах $10 < \left(\frac{P_C}{P_Ш}\right) < 15$ дБ, то существует возможность только обнаружения радиосигналов РЭС.

Если $\left(\frac{P_C}{P_Ш}\right) \geq 15$, то существует возможность обнаружения и технического анализа сигналов РЭС.

На рисунке 3 представлены полученные зависимости ослабления мощности сигнала РЭС при увеличении наклонной дальности КА низкоорбитального спутника. При расчетах использовалась самая маломощная РЭС AN/SPQ-9, со средней мощностью излучения 1 кВт. В расчетах, результаты которых представлены на рисунке 3, учитывались БУ и НБУ, а также возможность приема по главному (ГЛ) и боковому лепестку (БЛ).

Анализ рисунка позволяет сделать вывод о том, что существующие и перспективные низкоорбитальные коммуникационные спутники практически всегда способны принимать излучения от корабельных РЭС.

Результаты и их обсуждение

Таким образом, в статье рассмотрен альтернативный способ мониторинга судов для обеспечения безопасного мореплавания при отсутствии радиоизлу-

чений от АИС транспондеров. Внедрение способа в общую систему идентификации судов позволит:

– составлять радиоэлектронные портреты кораблей на основе принятых радиоизлучений;

– осуществить распознавание и идентификацию кораблей с последующим занесением объектов в базу данных судов и портов;

– обеспечить безопасное мореплавание.

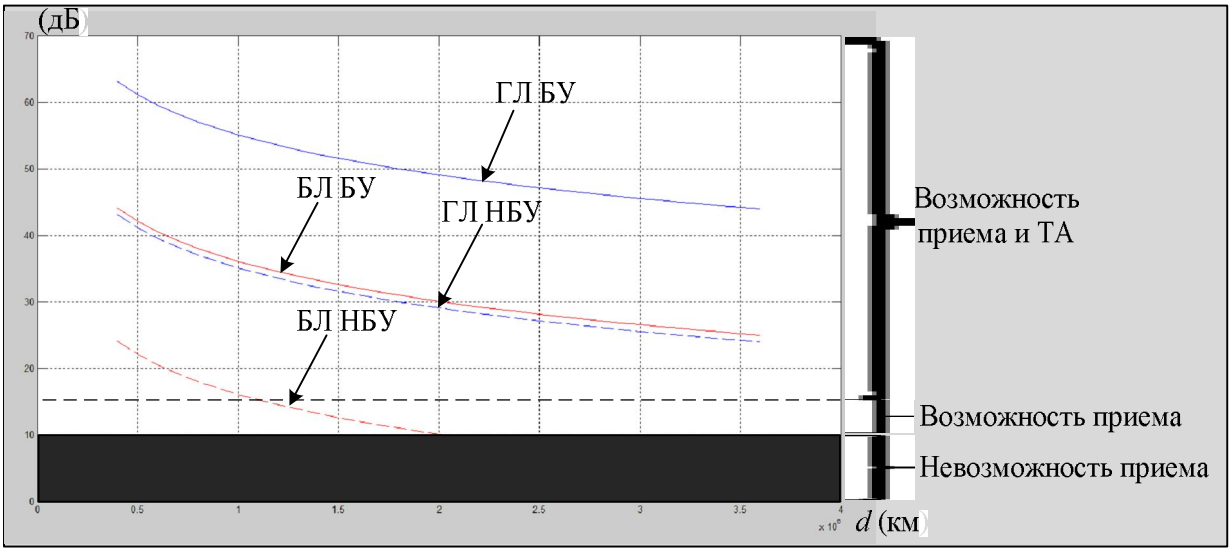


Рис. 3. Зависимости ослабления мощности сигнала РЭС AN/SPQ-9 при увеличении наклонной дальности КА низкоорбитального спутника

В статье проведен анализ параметров радиоизлучений корабельных РЭС и рассчитана их энергетическая доступность для современных и перспективных коммуникационных спутников. По результатам исследования сделан вывод, что указанные спутники практически всегда способны принимать рассматриваемые радиоизлучения.

Список литературы

1. Консолидированный текст конвенции СОЛАС–74. URL: http://www.sur.ru/ upload/legislation/Solas_74_file_5_37_4078.pdf (дата обращения: 18.03.2019).

2. Как современный эсминец может столкнуться с гражданским судном? URL: https://news.tut.by/world/557016.html?crnd=64736 (дата обращения: 12.02.2019).

3. АИС – Транспондер. URL: https://seacomm.ru/dokumentacija/5031/ (дата обращения: 11.04.2019).

4. Современные судовые и береговые радиолокационные станции (радары) отечественных и зарубежных фирм / А.Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю.М. Устинов,

В. С. Кан, А. В. Безумов, О. Л. Сокач. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2012. 166 с.

5. Корабельный состав ВМС США на 01.01.2018. URL: https://aftershock.news/?q=node/643454 (дата обращения: 11.01.2019).

6. Бобков А. Авиационные средства дальнего радиолокационного обнаружения и управления иностранных государств (E-2C) // Зарубежное военное обозрение. 2006. № 1. С. 15–16.

7. Нечаев Е.Е., Дерябин К.С. Современные бортовые радиолокационные станции и антенные решетки многофункциональных авиационных комплексов военного назначения // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. С. 33–37.

8. Сомов А. М., Корнев С. Ф. Спутниковые системы связи. М.: Горячая Линия – Телеком, 2015. 244 с.

9. Сомов А. М. Распространение радиоволн и антенны спутниковых систем связи. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 456 с.

10. Мухин И. Е., Хмелевская А. В., Бабанин И. Г. Методологические основы синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средствами радиомониторинга современных систем телекоммуникаций. Курск, 2015. 255 с.

Поступила в редакцию 18.02.2019
Подписана в печать 22.03.2019

Reference

1. Konsolidirovannyi tekst konventsii SOLAS–74. URL: http://www.sur.ru/ upload/legislation/Solas_74_file_5_37_4078.pdf (accessed 18.03.2019).

2. Kak sovremennyi esminets mozhet stolknut'sya s grazhdanskim sudnom? URL: https://news.tut.by/world/557016.html?crnd=64736 (accessed 12.02.2019).

3. AIS – Transponder. URL: https://seacomm.ru/dokumentacija/5031/ (accessed 11.04.2019).

4. Marinich A. N., Pripotnyuk A. V., Ustinov Yu. M., Kan V. S., Bezumov A. V., Sokach O. L. Sovremennye sudovye i beregovye radiolokatsionnye stantsii (radary) otechestvennykh i zarubezhnykh firm. Petropavlovsk-Kamchatskii, KamchatGTU Publ., 2012. 166 p. (In Russ.).

5. Korabel'nyi sostav VMS SShA na 01.01.2018. URL: https://aftershock.news/?q=node/643454 (accessed 11.01.2019).

6. Bobkov A. Aviatsionnye sredstva dal'nego radiolokatsionnogo obnaruzheniya i upravleniya inostrannykh gosudarstv (E-2S). *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2006, no. 1, pp. 15–16 (In Russ.).

7. Nechaev E. E., Deryabin K. S. Sovremennye bortovye radiolokatsionnye stantsii i antennye reshetki mnogofunktsional'nykh aviatsionnykh kompleksov voennogo naznacheniya. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*, 2015, pp. 33–37 (In Russ.).

8. Somov A. M., Kornev S. F. Sputnikovye sistemy svyazi. Moscow, 2015. 244 p. (In Russ.).

9. Somov A. M. Rasprostranenie radiovoln i antenny sputnikovykh sistem svyazi. Moscow, 2015. 456 p. (In Russ.).

10. Mukhin I. E., Khmelevskaya A. V., Babanin I. G. Metodologicheskie osnovy sinteza sistem obespecheniya elektromagnitnogo dostupa sredstvami radiomonitoringa sovremennykh sistem telekommunikatsii. Kursk, 2015. 255 p. (In Russ.).

Received 18.02.2019
Accepted 22.03.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Анатолий Иванович Мухин,
кандидат технических наук, начальник 372 лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: tolik516@yandex.ru

Anatoly I. Mukhin, Candidate of Technical Sciences, Head of the 372 laboratory of the Military Institute (research) of the Federal State Treasury of Higher Education “Military Space Academy named after A. F. Mozhaiskogo ”, St. Petersburg, Russian Federation,
e-mail: tolik516@yandex.ru

Ирина Александровна Пучкова, научный сотрудник 372 лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: poutchova@mail.ru

Irina A. Puchkova, a researcher at 372 laboratories of the Military Institute (Research) of the Federal State Treasury Military Educational Institution of Higher Education Mozhaiskogo, St. Petersburg, Russian Federation,
e-mail: poutchova@mail.ru

Дмитрий Сергеевич Коптев, преподаватель кафедры космического приборостроения систем связи Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Dmitry S. Koptev, Lecturer, Department of Space Instrument Engineering of Communication Systems of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: d.s.koptev@mail.ru

УДК 621.317.733.621.314.34

Электрическое поле линий электропередач постоянного тока

Л. В. Плесконос ✉, М. Ю. Ефремов

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Российская Федерация, 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

✉ e-mail: plieskonos@mail.ru

Резюме

***Цель исследования**: Исследование посвящено изучению и определению электромагнитного поля (ЭМП) линий электропередач постоянного тока различных схем и напряжений в определённых точках окружающей среды и сравнению с ЭМП линий электропередач переменного тока.*

Целью работы является определение электромагнитного поля линий электропередач постоянного тока различных схем и различного напряжения в определённых точках окружающей среды и сравнение его с ЭМП линий переменного тока.

***Методы**. Основным преимуществом линий электропередач(ЛЭП) постоянного тока является возможность передавать большие объемы электроэнергии, чем у распространённых линий электропередач переменного тока. Она допускает передачу электроэнергии между несинхронизированными системами переменного тока, а также эффективна при передаче энергии по подводному кабелю из-за его большой ёмкости. Наиболее распространённые типы схем это – монополярная и биополярная. Опоры линий электропередач постоянного тока (HVDC) разработаны так, чтобы нести два проводника, даже если второй проводник не используется или используется параллельно с другим. В настоящее время ЛЭП постоянного тока распространены по всему миру. Большими темпами HVDC строятся в Китае. ЛЭП при работе создают в окружающем пространстве электромагнитное поле, дальность распространения и его величина зависит от напряжения и является очень сильным фактором влияния на состояние всех биологических объектов, попадающих в зону воздействия. В работе произведён расчёт напряжённости электрического поля на поверхности земли и на уровне роста человека, в монополярной и биополярной HVDC при различных напряжениях методом зеркальных изображений.*

***Результаты**. Сравнивая напряжённость электрического поля в зоне ЛЭП переменного и постоянного тока видим, что при одном и том же напряжении, электрическое поле в HVDC ниже и при удалении от проводов уменьшается быстрее.*

***Заключение**. В настоящее время в литературе нет данных по расчёту электрического поля HVDC и сравнительного анализа с полем ЛЭП переменного тока. Предлагаемая методика расчёта ЭМП позволяет путём сравнительного анализа для конкретной ситуации оценить преимущества использования ЛЭП переменного или постоянного тока. С учётом развития преобразовательной техники и принимая во внимание достоинства HVDC, можно сделать вывод о больших перспективах развития линий передач постоянного тока. Размещать HVDC необходимо с учётом зоны действия и величины их электромагнитного поля, чтобы не принести вред окружающей среде и жизни человека.*

***Ключевые слова**: линии электропередач постоянного тока; монополярная; биполярная схема; напряженность электрического поля.*

***Конфликт интересов**: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

© Плесконос Л. В., Ефремов М. Ю., 2019

Для цитирования: Плесконос Л. В., Ефремов М. Ю. Электрическое поле линий электропередач постоянного тока // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 2. С. 35–46.

UDC 621.317.733.621.314.34

Electric Field Linesdc Transmission

L. V. Pleskonos ✉, M. Y. Efremov

Southwest State University, 94, 50 Let Oktyabrya str., Kursk, 305040, Russian Federation

✉ e-mail: plieskonos@mail.ru

Abstract

Purpose of research. *The purpose of the study: the Study is devoted to the study and definition of the electromagnetic field (EMF) of power lines of direct current to various circuits and voltages at certain points of the environment and comparison with EMFs of power lines of the alternating current. The study is devoted to the study of determining the Purpose of the work and it is to determine the electromagnetic field (EMF) of direct current power lines of different circuits and different voltages at certain points in the environment and compare it with the EMF of alternating current.*

Methods*. the Main advantage of direct current power lines is the ability to transmit large amounts of electricity than common alternating current power lines (transmission lines). It allows the transmission of electricity between non-synchronized alternating current systems, and is also effective in the transmission of energy through underwater cables because of its large capacity. The most common types of schemes are monopolar and biopolar. The HVDC supports are designed to carry two conductors, even if the second conductor is not used or is used in parallel with the other. Currently, direct current power lines are distributed worldwide. HVDC is being built in China at a high rate, power lines create an electromagnetic field in the surrounding space, the range of propagation and its value depends on the voltage and is a very strong factor in the influence on the state of all biological objects falling into its zone of influence. The paper calculates the electric field strength on the earth's surface and at the level of human growth, in the monopolar and biopolar HVDC at different voltages by the method of mirror images.*

Results*. Comparing the electric field strength in the area of alternating current and direct current power lines, we see that at the same voltage, the electric field in the HVDC is lower and at a distance from the wires decreases faster.*

Conclusion*. At present, there is no data on the calculation of the electric field HVDC And comparative analysis with the field of alternating current power lines in the literature. The proposed method of calculation of EMF allowed by comparative analysis for a specific situation to assess the benefits of using alternating current or direct current power lines. Taking into account the development of Converter technology and taking into account the advantages of HVDC, it can be concluded that there are great prospects for the development of direct current transmission lines. HVDC must be placed taking into account the area of action and the magnitude of their electromagnetic field, so as not to harm the environment and human life.*

Keywords*: direct current power Lines; monopolar; bipolar circuit; electric field intensity.*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Pleskonos L. V., Efremov M. Y. Electric Field Linesdc Transmission. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie*

= *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, 9(2): 35–46 (In Russ.).

***

Введение

Передача электроэнергии от электростанции к потребителям – одна из важнейших задач энергетики. Электроэнергия передается по воздушным линиям электропередачи (ЛЭП) переменного и постоянного тока, электромагнитное поле (ЭМП) которых изменяет естественное ЭМП земли, резко повышая его воздействие на окружающую среду. Напряжённость электрического поля Е под ЛЭП может достигать десятков тысяч В/м, представляя опасность для человека и окружающей среды [1]. Целью работы является определение электромагнитного поля ЛЭП постоянного тока различного напряжения, различных схем в определённых точках окружающей среды и сопоставление с ЭМП ЛЭП переменного тока.

Линии электропередачи постоянного тока (HVDC) передают постоянный ток. Основным их преимуществом является возможность передавать большие объёмы электроэнергии на большие расстояния, чем у распространённых ЛЭП переменного тока [2]. HVDC допускает передачу энергии между несинхронизированными системами переменного тока, что увеличивает устойчивость системы, отсутствие генерации реактивной мощности, она эффективна при передаче энергии по подводному кабелю, из-за его большой ёмкости [3]. Всё это делает HVDC привлекательными при использовании на межнациональном уровне [4].

Конфигурация линии – это две преобразовательные станции инвертор/ выпрямитель, связанные воздушной линией (рис. 1.).

Рис. 1. Схема передачи электроэнергии к потребителям постоянным током: 1 – синусоидальный генератор; 2 – подстанция с повышающим трёхфазным трансформатором; 3 – подстанция с понижающим трёхфазным трансформатором; 4 – отвод для передачи электроэнергии распределительному устройству; 5 – выпрямитель, преобразующий трёхфазный переменный ток в постоянный; 6 – инверторный блок, формирующий из постоянного напряжения синусоидальное

Fig. 1. The scheme of transmission of electricity to consumers by DC (Direct Current): 1 – Sine-wave generator; 2– Substation with a step-up three-phase generator; 3 – Substation with a step-down three-phase generator; 4 – Branch for power transmission switch gear; 5 – Rectifier converter from three-phase AC current to DC; 6 – Inverter unit that generates from the DC voltage of a sinusoidal

Наиболее распространённые типы схем HVDC – монополярная и биполярная.

В монополярной схеме один из выводов выпрямителя заземляют, другой соединяют с линией электропередачи. При отсутствии второго металлического проводника обратный ток протекает в земле между заземлёнными выводами двух подстанций. При протекании обратного тока в земле возникают проблемы:

– электрическая коррозия трубопроводов;

– выделение хлора и различные изменения морской воды при использовании её в качестве второго проводника.

Это можно устранить установкой металлического обратного проводника. Так как эти выводы заземлены, то обратный провод не изолируют, что делает его менее дорогостоящим. Решение об использовании металлического обратного провода основывается на экономических , технических и экологических факторах.

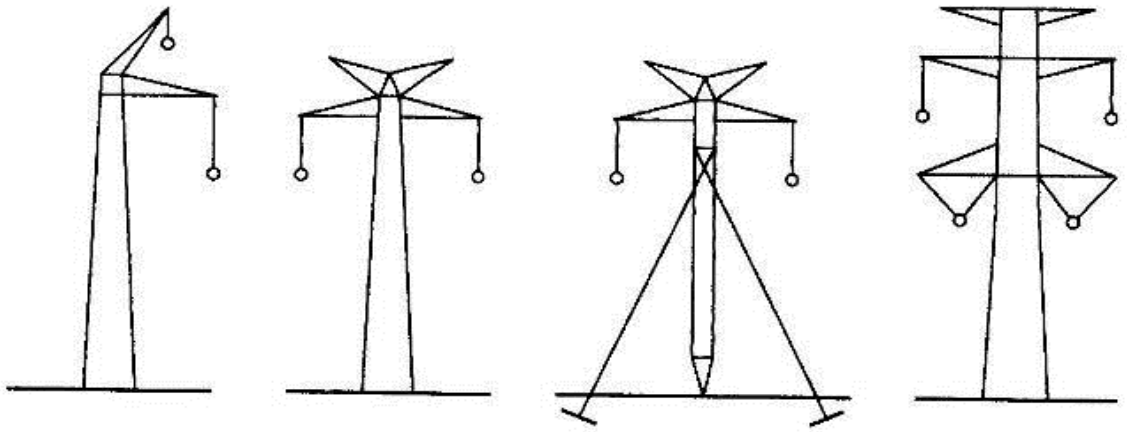
В биполярной схеме используются два проводника противоположной полярности относительно земли. Стоимость биполярной линии выше монополярной с обратным проводом, но биполярная схема более эффективна, чем монополярная. При аварии на одной из линий биполярной системы она может работать, передавая половину номинальной мощности по неповрежденной линии в монополярном режиме с использованием земли в качестве обратного провода. Так как для данной мощности по каждому проводнику биполярной линии протекает только половина тока монополярной линии, стоимость каждого проводника меньше по сравнению с проводником монополярной лини. Биполярные устройства могут передавать до 3200 МВт на напряжение ± 600 кВ.

Конструкции опор для HVDC показаны на рис. 2.

Большинство монополярных систем разработано до будущего расширения до биполярной. Опоры линии электропередачи разработаны так, чтобы нести два проводника, даже если первоначально используется только один в монополярной системе, второй проводник не используется или используется параллельно с другим. В настоящее время ЛЭП постоянного тока распространены по всему миру [4]. Большими темпами HVDC строятся в Китае. В России две ЛЭП постоянного тока: Волгоград – Донбасс и вставка постоянного тока Выборг [5].

Линии электропередач при работе создают в окружающем пространстве электромагнитное поле, распространяющееся от проводов на десятки метров. Дальность распространения электромагнитного поля зависит от величины напряжения ЛЭП и является очень сильным фактором влияния на состояние всех биологических объектов, попадающих в зону его действия. Например, в зоне наибольшего действия элек-

трического поля у насекомых проявляется изменения в поведении, у растений часто встречаются аномальные развития, у человека могут развиваться заболевания сердечнососудистой деятельности и нервной системы.



а) б) в) г)

Рис. 2. Экскизы опор для высоковольтной линии (ВЛ) постоянного тока: а – промежуточная свободностоящая опора для униполярной ВЛ; б – промежуточная свободностоящая опора для биополярной ВЛ; в – промежуточная опора на оттяжках для биополярной ВЛ; г – промежуточная свободностоящая опора для двухцепной ВЛ

Fig. 2. Sketch supports for DC High voltage lines (VL) . a – Intermediate free standing support for unipolar VL; b – Intermediate free-standing support for the bipolar VL; c – Intermediate support braces for the bipolar VL; d – Intermediate free-standing support for the double-circuit overhead line VL

Оценим напряженность электрического поля в зоне HVDC на поверхности земли и на уровне роста человека при монополярной и биполярной схеме. Провода расположены на опоре, изображенной на рис. 3 [6].

Для расчёта электрического поля воспользуемся методом зеркальных изображений [7].

1. Монополярная схема.

Данные для расчёта

Напряжение U = 85 кВ, радиус провода $R = 6{,}75 \cdot 10^{-3}$ м

Потенциал провода

$$\varphi_1 = \tau \cdot \alpha_{11}, \qquad (1)$$

где τ – линейная плотность заряда $\left(\frac{\text{Кл}}{\text{м}}\right)$,

α_{11} – потенциальный коэффициент $\left(\frac{\text{м}}{\text{Ф}}\right)$,

$$\alpha_{11} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0 r} \cdot \ln\frac{2h}{R}. \qquad (2)$$

Напряжённость поля заряжённой оси

$$E = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 r}, \qquad (3)$$

где r – расстояние от заряжённой оси до рассматриваемой точки,

$\varepsilon_0 = 8{,}86 \cdot 10\text{-}12 \left(\frac{\text{Ф}}{\text{м}}\right)$ – электрическая постоянная.

Напряжённость поля в рассматриваемой точке «а»

$$E_a = \frac{\varphi_1}{\ln\frac{2h}{R}\sqrt{h^2+x^2}}, \qquad (4)$$

где x – расстояние до рассматриваемой точки.

По данным построены зависимости $E = f(x)$ на уровни земли (рис. 4.)

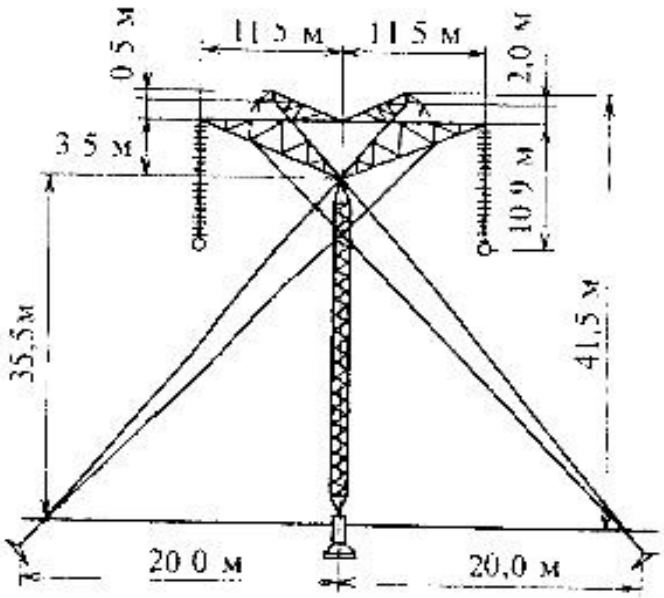


Рис. 3. Промежуточная опора линии электропередачи постоянного тока

Fig.3.Intermediate support of DC power line

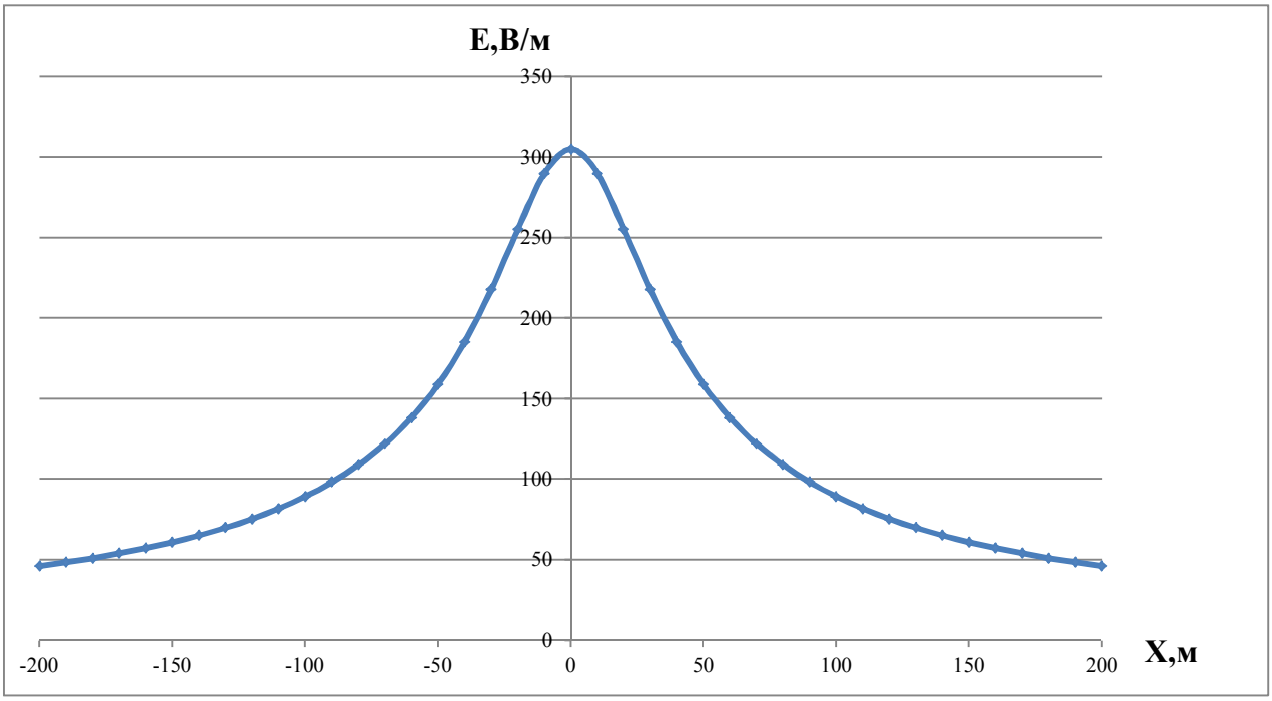


Рис. 4. График зависимости напряженности E от расстояния x до опоры $E = f(x)$, на уровни земли $y = 0$, U = 85 кВ

Fig. 4. Graph the dependence of the intensity E on the distance x to the support

E=f(x) on ground levels y=0, U= 85 kV

2. Биополярная схема.

Расстояние между 1 и 2 проводом D, между проводом и зеркальным изображением d.

$$D_{21} = D_{12} = (x_1 - x_2),$$

$$d_{12} = d_{21} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 + y_2)^2}, \quad (5)$$

где x_k – расстояние от точки отсчёта до k провода,

y_k – высота подвеса k провода над землёй.

Ёмкостные коэффициенты

$$\beta_{kn} = \frac{\Delta_{kn}}{\Delta},$$

где $\Delta = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{vmatrix}$. (6)

Δ_{kn} – это алгебраическое дополнение, которое получается при вычеркивании из Δ n – столбца и k–строки и умножения на (-1)k+n.

Потенциальные коэффициенты α.

$$\alpha_{11} = \alpha_{22} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \ln\frac{2n}{R};$$

$$\alpha_{12} = \alpha_{21} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \ln\frac{d_{12}}{D_{12}}. \quad (7)$$

Заряд на поверхности 1 и 2 провода

$$\tau_1 = U(\beta_{11} - \beta_{12}), \quad (8)$$

$$\tau_2 = U(\beta_{21} - \beta_{22}), \quad (9)$$

$$\tau_1 = -\tau_2.$$

Для случайной точки $P(x_p, y_p)$ потенциал равен

$$\underline{\varphi}_p = \sum_{k=1}^{n} \underline{\varphi}_k, \quad (10)$$

где $\underline{\varphi}_k = \frac{\tau_k}{2\cdot\pi\cdot\varepsilon_0} ln\left(\frac{a_{kp}}{b_{kp}}\right)$;

$$a_{kp} = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y + y_k)^2} - \quad (11)$$

расстояние от т. P до зеркального изображения K провода;

$$b_{kp} = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} - \quad (12)$$

расстояние от т. P до K провода.

Горизонтальная составляющая напряжённости электрического поля

$$\underline{E}_x = -\frac{d\underline{\varphi}_p}{dx}. \quad (13)$$

Вертикальная составляющая

$$\underline{E}_y = -\frac{d\underline{\varphi}_p}{dx}. \quad (14)$$

Модуль напряженности в точке P

$$E_P = \sqrt{\underline{E}_x^2 + \underline{E}_y^2}. \quad (15)$$

Для биополярной линии потенциал

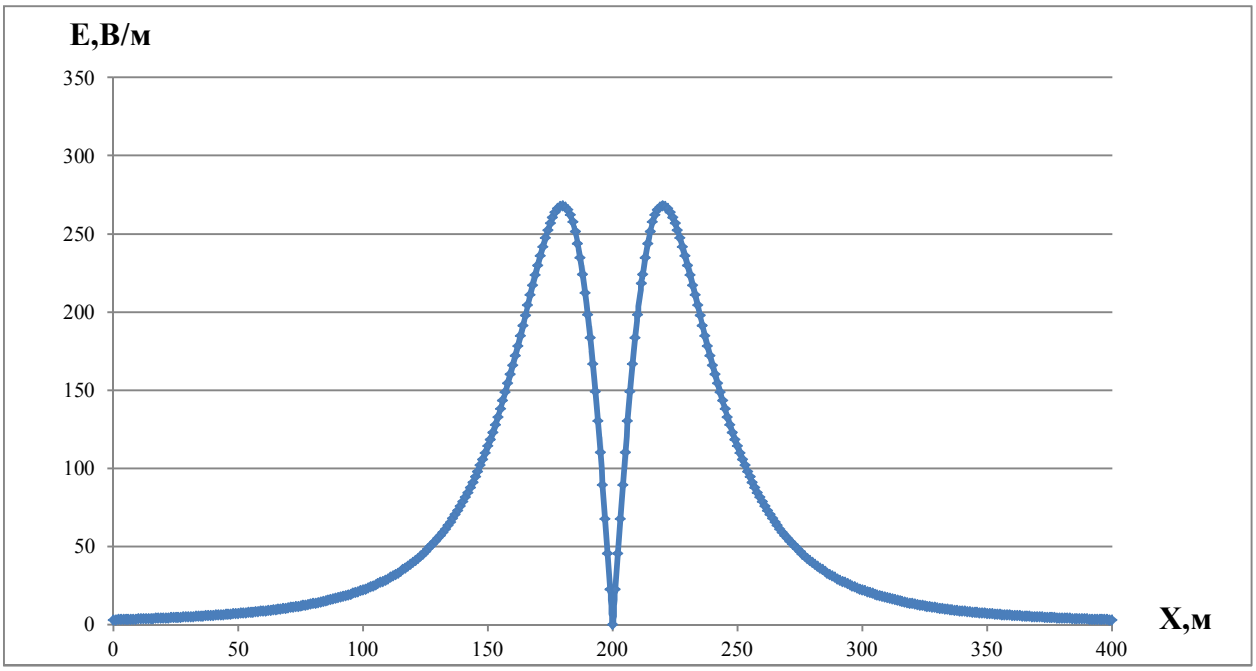
$$\underline{\varphi}_p = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\left[\tau_1 ln\frac{\sqrt{(x-x_1)^2+(y+y_1)^2}}{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}} + \tau_2 ln\frac{\sqrt{(x-x_2)^2+(y+y_2)^2}}{\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}}\right]. \quad (16)$$

$$\underline{E}_y = \frac{-1}{2\pi\varepsilon_0}\left[\tau_1\left(\frac{y + y_1}{(x - x_1)^2 + (y + y_1)^2} - \frac{y - y_1}{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}\right) + \tau_2\left(\frac{y+y_2}{(x-x_2)^2+(y+y_2)^2} - \frac{y-y_2}{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}\right)\right]. \quad (17)$$

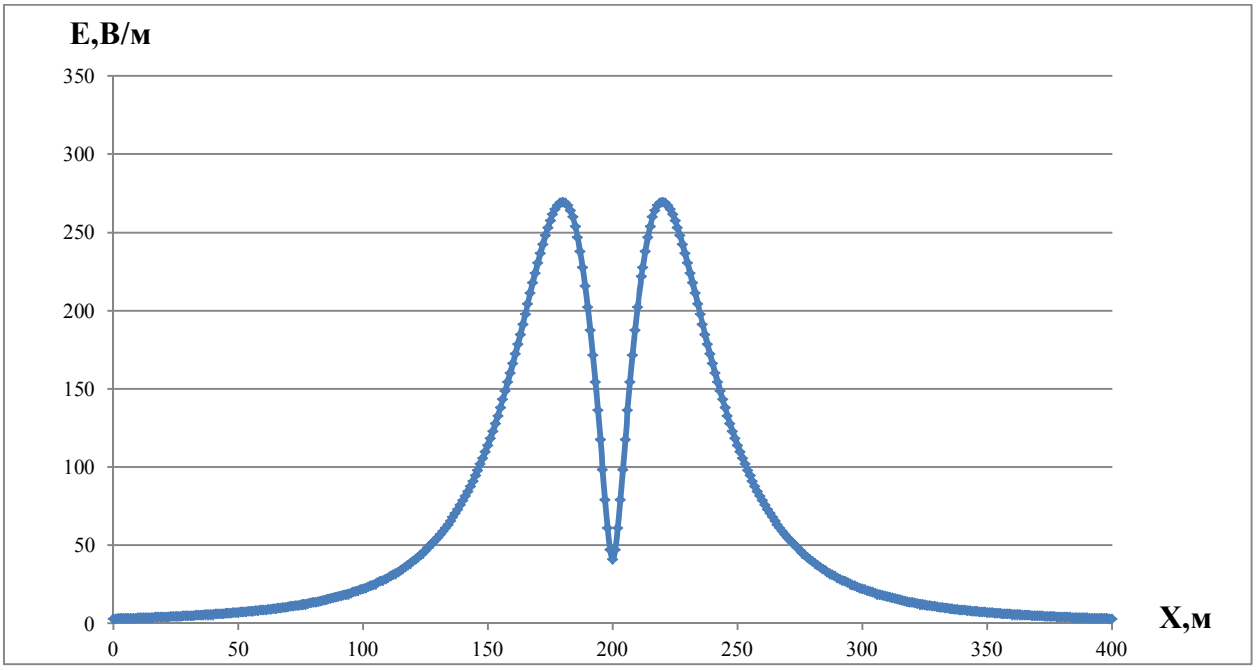
$$E_x = \frac{-1}{2\pi\varepsilon_0}\left[\tau_1\left(\frac{x - x_1}{(x - x_1)^2 + (y + y_1)^2} - \frac{x - x_1}{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}\right) + \tau_2\left(\frac{x-x_2}{(x-x_2)^2+(y+y_2)^2} - \frac{x-x_2}{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}\right)\right]. \quad (18)$$

Построим графики зависимости напряженности E от расстояния x до опоры $E = f(x)$ на уровне земли при $y = 0$ и $E = f(x)$ на уровне роста человека при $y = 1{,}8$ м. с напряжением U = ± 85 кВ и U = ± 400 кВ.

Если точка P находится на поверхности земли, то $E_x = 0$.



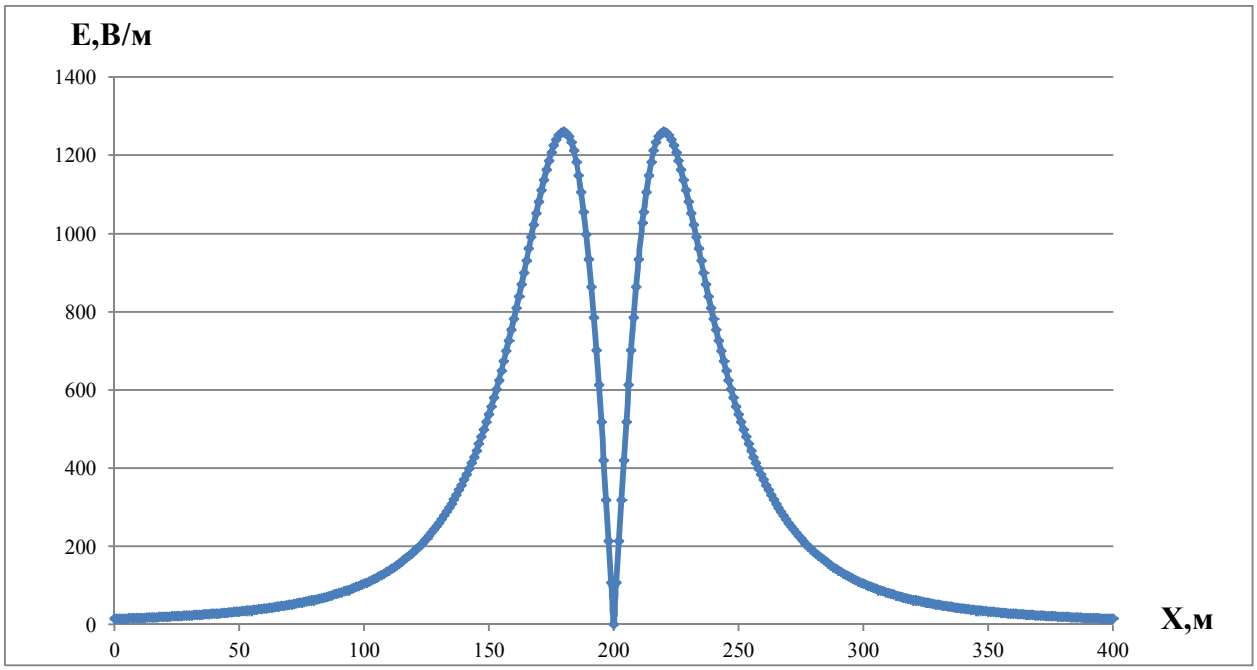
а)



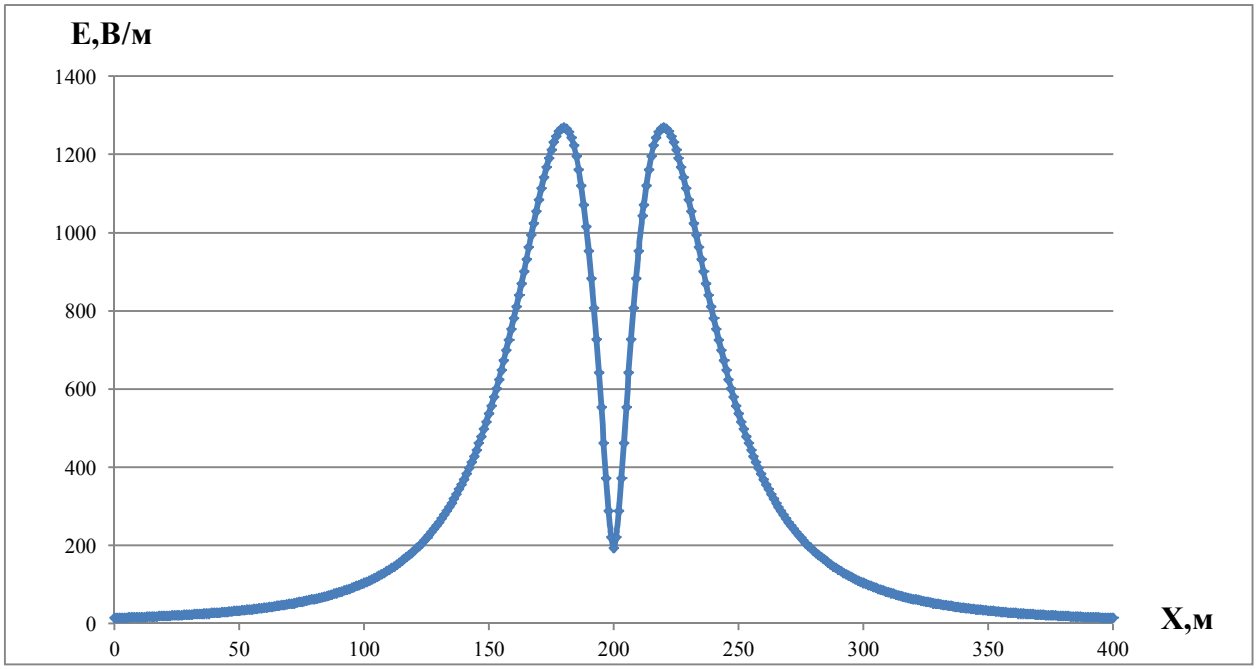
б)

Рис. 5. Графики зависимости напряженности E от расстояния x до опоры $E = f(x)$, а – при $y = 0$, U = ± 85 кВ, б – при $y = 1{,}8$ м,U = ± 85 кВ

Fig.5. Graph the dependence of the intensity E on the distance x to the support E=f(x) a – at y=0, U=+/- 85 kV, b – at y=1,8, U=+/- 85 kV



а)



б)

Рис. 6. График зависимости напряженности E от расстояния x до опоры $E = f(x)$:
а – при $y = 0$, U = ± 400 кВ, б – при $y = 1{,}8$ м,U = ± 400 кВ

Fig.6. Graph the dependence of the intensity E on the distance x to the support E=f(x)
a – at y =0, U=+/- 400 kV, b – at y= 1,8m, U=+/- 400 kV

Из анализа результатов расчётов видно, что графики $E = f(x)$ на уровне земли и на уровни роста человека при одном и том же напряжении практически одинаковые. Максимальная напряженность E_m электрического поля в зоне ЛЭП переменного тока [8, 9] при U = 110 кВ (фазное напряжение 64 кВ) $E_m = 1300\frac{\text{В}}{\text{м}}$.

E_m в зоне ЛЭП постоянного тока:

• монополярная схема – при U = 85 кВ, $E_m = 300\frac{\text{В}}{\text{м}}$,

• биополярная схема

– при U = ± 85 кВ, $E_m = 270\frac{\text{В}}{\text{м}}$,

– при U = ± 400 кВ, $E_m = 1300\frac{\text{В}}{\text{м}}$.

При более высоком входном напряжении напряжённость электрического поля в HVDC во много раз меньше. Только в ЛЭП переменного тока при Uф =65 кВ и в HVDC при U=± 400 кВ (разница в 6 раз) напряженность электрического поля одинаковая. Кроме того она быстрее уменьшается при удалении от проводов. В настоящее время нет данных сравнительного анализа электромагнитного поля ЛЭП постоянного и переменного тока. Предлагаемая методика расчета позволяет выполнить этот анализ для конкретной ситуации и расположить ЛЭП так, чтобы уменьшить влияние ЭМП на окружающую среду и на человека.

С учётом развития преобразовательной техники и принимая во внимание все перечисленные достоинства ЛЭП постоянного тока по сравнению с ЛЭП переменного тока надо ожидать их перспективного развития и внедрения в систему передачи электрической энергии.

Список литературы

1. Бородин А.С., Волкотруб Л.П., Гудина В.Н. Заболевания населения острым инфарктом на городских территориях с разной степенью электромагнитного загрязнения // Известия ВУЗов. Сер. Физика. 2008. Т. 51, № 9/3. С. 197–199.

2. Зотин О.Т. В предверии возрождения постоянного тока // Энергосовет. 2013. № 1(26). С. 39–42.

3. Ткаченко С. В. Уравнения и схема замещения длинной линии с учётом излучения электромагнитной энергии // Труды Кольского научного центра РАН. 2012 № 3. С. 8–18.

4. Апанич С.С., Мызин А.Л. Схемы замещения и установившиеся режимы электрических сетей. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого президента России Ельцина, 2012. 81 с.

5. Плесконос Л. В., Костюков П. В., Гурин И. В. Линии электропередач постоянного тока // Перспективное развитие техники и технологии: материалы Международ-

ной конференции «Молодежь и системная модернизация страны». Курск, 2017. С. 306–310.

6. Плесконос Л. В., Матвеенко П. Н. Оценка эффективности передачи электроэнергии с использованием линии электропередач постоянного тока // Перспективное развитие науки техники и технологиии : материалы 9-ой Международной молодежной конференции 2019 г. Курск, 2019. С. 330–333.

7. Идельчик В. И. Электрические системы и сети .М.: Высшая школа, 1989. 592 с.

8. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: электромагнитное поле. М.: Высшая школа, 1978. 231 с.

9. Плесконос Л. В., Заичко А. Л., Алейник А. А. Влияние электрических полей воздушных линий электропередач на организм человека // Электрика. 2013. № 2. С. 7–8.

10. Плесконос Л.В., Агибалов С.В., Кудинов С.А. Электромагнитные поля, окружающие воздушные линии электропередач // Электрика. 2014. № 1. С. 5–6.

Поступила в редакцию 26.02.2019
Подписана в печать 18.04.2019

Reference

1. Borodin A. S., Volkotrub L. P., Gudina V. N. Zabolevaniya naseleniya ostrym infarktom na gorodskikh territoriyakh s raznoi stepen'yu elektromagnitnogo zagryazneniya. Izvestiya VUZov. Ser. Fizika, 2008, vol. 51, no. 9/3, pp. 197–199 (In Russ.).

2. Zotin O.T. V predverii vozrozhdeniya postoyannogo toka. *Energosovet*, 2013, no. 1(26), pp. 39–42 (In Russ.).

3. Tkachenko S. V. Uravneniya i skhema zameshcheniya dlinnoi linii s uchetom izlucheniya elektromagnitnoi energii. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2012, no. 3, pp. 8–18 (In Russ.).

4. Apanich S. S., Myzin A. L. Skhemy zameshcheniya i ustanovivshiesya rezhimy elektricheskikh setei. Ekaterinburg, Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo prezidenta Rossii El'tsina Publ., 2012, 81 p. (In Russ.).

5. Pleskonos L. V., Kostyukov P. V., Gurin I. V. Linii elektroperedach postoyan-nogo toka. Perspektivnoe razvitie tekhniki i tekhnologii. Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii “Molodezh' i sistemnaya modernizatsiya strany”. Kursk, 2017, pp. 306–310 (In Russ.).

6. Pleskonos L. V., Matveenko P. N. Otsenka effektivnosti peredachi elektroenergii s ispol'zovaniem linii elektroperedach postoyannogo toka. Perspektivnoe razvitie nauki tekhniki i tekhnologiii. Materialy 9 Mezhdunarodnoi molodezhnoi konferentsii. Kursk, 2019, pp. 330–333 (In Russ.).

7. Idel'chik V. I. Elektricheskie sistemy i seti. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. 592 p. (In Russ.).

8. Bessonov L. A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: elektromagnitnoe pole. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1978, 231 p. (In Russ.).

9. Pleskonos L. V., Zaichko A. L., Aleinik A. A. Vliyanie elektricheskikh polei vozdushnykh linii elektroperedach na organizm cheloveka. *Elektrika*, 2013, no. 2, pp. 7–8 (In Russ.).

10. Pleskonos L. V., Agibalov S. V., Kudinov S. A. Elektromagnitnye polya, okruzhayushchie vozdushnye linii elektroperedach. *Elektrika*, 2014, no. 1, pp. 5–6 (In Russ.).

Received 26.02.2019
Accepted 18.04.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Лидия Владимировна Плесконос, кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: plieskonos@mail.ru

Михаил Юрьевич Ефремов, студент,
ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: mechail.efremob@yandex.ru

Lidia V. Pleskonos, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: plieskonos@mail.ru

Mikhail Y. Efremov, student,
Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: mechail.efremov@yandex.ru

УДК 004.67, 004.942

Информационно-аналитическая система научных исследований сложных нестационарных систем с хаотической динамикой

В. В. Григоренко[1], В. М. Еськов[2], В. С. Микшина[1] ✉, Н. Б. Назина[1]

[1] БУ ВО Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Сургутский государственный университет», Российская Федерация, 628412, Тюменская область, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Сургут, пр. Ленина, 1

[2] Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, Российская Федерация, 117218, Москва, Нахимовский просп., 36, к. 1

✉ e-mail: mikshinavs@gmail.com

Резюме

Целью исследования *является повышение эффективности работы миниатюрных медицинских контрольно-диагностических приборов для неинвазивного измерения частоты сердечных сокращений, а также для диагностики и прогнозирования наступления функциональных изменений в работе сердечно-сосудистой системы за счет обработки информации с помощью информационно-аналитической системы научных исследований (ИАСНИ) сложных нестационарных систем с хаотической динамикой. Такие системы для обработки информации требуют нестандартных решений, которые не ограничиваются традиционными детерминистскими и стохастическими моделями.*

Методы*. Основным методом, используемым в разрабатываемой ИАСНИ, является синтез системного анализа и теории хаоса-самоорганизации (ТХС), как нового направления в естествознании, которое количественно и качественно оценивает состояния сложной нестационарной системы с хаотической динамикой.*

Результаты*. Показано, что повышение эффективности работы миниатюрных медицинских контрольно-диагностических приборов для неинвазивного измерения достигается, во-первых, за счет повышения точности измерений с помощью нестандартных решений, предлагаемых традиционными детерминистскими и стохастическими моделями, а во-вторых, за счет расширения функциональных возможностей, предоставляемых миниатюрным прибором.*

Заключение*. Разработка ИАСНИ поможет осуществить качественный переход к персонифицированной медицине, которая подразумевает использование новых методов, теорий и подходов, направленных на изучение индивидуальных особенностей организма человека. В рамках персонифицированной медицины диагностические признаки должны быть идентифицированы для каждого человека индивидуально, а не на основе значений показателей, полученных с помощью статистического анализа по большим группам больных.*

Ключевые слова*: сложная нестационарная система; хаотическая динамика; информационно-аналитическая система; системный анализ; теория хаоса-самоорганизации.*

Благодарности: *Исследования проводятся в рамках прикладных научных исследований при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по теме: «Математическое моделирование процесса принятия решений сложных динамических систем» (уникальный идентификатор проекта № 18-07-00175 А).*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

© Григоренко В. В., Еськов В. М., Микшина В. С., Назина Н. Б., 2019

Для цитирования: Информационно-аналитическая система научных исследований сложных нестационарных систем с хаотической динамикой / В. В. Григоренко, В. М. Еськов, В. С. Микшина, Н. Б. Назина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 2. С. 47–60.

UDC 004.67, 004.942

Information and Analytical System of Scientific Researches of Complex Nonstationary Systems with Chaotic Dynamics

V. V. Grigorenko[1], V. M. Eskov[2], V. S. Mikshina[1] ✉, N. B. Nazina[1]

[1] Surgut State University, 1, Lenin pr., Surgut, 628412, Russian Federation

[2] Federal Research Center Research Institute of System Studies of the Russian Academy of Sciences, 1, 36, Nakhimov Ave., Moscow, 117218, Russian Federation

✉ e-mail: mikshinavs@gmail.com

Abstract

The aim of the study is to increase the efficiency of miniature medical monitoring and diagnostic devices for non-invasive measurement of heart rate, as well as for diagnosing and predicting the onset of functional changes in the cardiovascular system due to information processing using information-analytical research non-stationary systems with chaotic dynamics (IARS). Such systems for information processing require non-standard solutions that are not limited to traditional deterministic and stochastic models.

The main method used in the developed IARS is the synthesis of systems analysis and the theory of chaos-self-organization (TCS), as a new direction in natural science, which quantitatively and qualitatively evaluates the state of a complex non-stationary system with chaotic dynamics. It is shown that increasing the efficiency of miniature medical monitoring and diagnostic devices for non-invasive measurement is achieved, firstly, by increasing the measurement accuracy using non-standard solutions offered by traditional deterministic and stochastic models, and secondly, by expanding the functionality provided by miniature device. The development of IARS will help to make a qualitative transition to personalized medicine, which involves the use of new methods, theories and approaches aimed at studying the individual characteristics of the human body. Within the framework of personalized medicine, diagnostic signs should be identified for each person individually, and not on the basis of the values of indicators obtained using statistical analysis for large groups of patients.

Keywords*: complex non-stationary system, chaotic dynamics, information-analytical system, system analysis, theory of chaos-self-organization.*

Acknowledgements: *Research is carried out as part of applied research with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research on the topic: «Mathematical modeling of the decision process of complex dynamic systems» (unique project identifier No. 18-07-00175 A).*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Grigorenko V. V., Eskov V. M., Mikshina V. S., Nazina N. B. Information and Analytical System of Scientific Researches of Complex Nonstationary Systems with Chaotic Dynamics. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, 9(2): 47–60 (In Russ.).

Введение

В результате проведенных Всемирной организацией здравоохранения исследований были получены данные, позволяющие говорить о причинах преждевременной смерти жителей нашей планеты. Среди многих причин была выявлена и основная – заболевания сердечно-сосудистой системы (ССС). Ежегодно от болезней сердца умирают около 17 миллионов человек, что составляет примерно 29 % всех случаев смерти. В России с 2000 года ежегодно умирает от болезней сердца и инсульта – 2,3 млн. человек. В пересчете на 100 тыс. населения – в 2 раза больше, чем в Европе и в США, в 1,5 раза больше, чем в среднем по миру [1].

Одним из современных методов оценки взаимосвязи сердца и нервной системы является оценка вариабельности сердечного ритма (ВСР). Данное свойство биологических процессов отражает изменчивость различных параметров, в том числе и ритма сердца, в ответ на воздействие каких-либо факторов. Анализ ВСР становится популярным благодаря своей простоте и тому, что он является неинвазивным, то есть не требует оперативного вмешательства. Это обследование активно используют в функциональной диагностике, так как показатель ВСР позволяет дать общую оценку состояния пациента, отражающую жизненно важные-показатели управления физиологическими функциями организма [2]. В настоящее время разработано множество программных и аппаратных средств, от миниатюрных до стационарных, позволяющих проводить анализ показателей ССС и ВСР.

Однако оценка состояния сложных динамических систем, таких, как сердечно-сосудистая система, является весьма трудоемкой задачей и зависит от возможностей количественного описания протекающих в них процессов в рамках ограниченной информации (в условиях неопределенности за ограниченное время), в условиях большого количества внешних факторов воздействия, а также индивидуальных особенностей исследуемого процесса. Таким образом, можно сделать вывод, что медицина с задачами диагностики и прогнозирования состояний параметров сложных нестационарных биомедицинских систем с хаотической динамикой, полученных с помощью специальных стационарных и миниатюрных приборов медицинского назначения, относится к слабоструктурированным или хаотическим предметным областям.

Повышение эффективности работы медицинских приборов может быть достигнуто за счет разработки информационных систем, в основе которых лежат математические модели, которые могли бы адекватно описывать процессы в таких сложных динамических системах не только в рамках функционального анализа, но и вне расчетов статистических функций распределения

$f(x_i)$, которые имеют разовый характер (для конкретного интервала времени, Δt) и требуют нестандартных решений, которые не ограничиваются традиционными детерминистскими и стохастическими моделями [3, 4], лежащими в основе современных миниатюрных устройств регистрации физиологических параметров человека [5].

Основная причина, по которой крайне сложно создавать модели поведения вектора состояния $x(t)$ сложной динамической системы является именно невоспроизводимость результатов экспериментов. Каждый раз регистрируемые выборки вектора $x(t)$ сложной динамической системы даже при одинаковых условиях эксперимента будут уникальны и более того, уникальностью обладает каждый временной участок регистрируемого динамического сигнала [6].

В настоящее время для решения вышеперечисленной проблемы используют два подхода. Так, с точки зрения детерминистского подхода многократное повторение любого процесса должно обеспечивать идентификацию моделей сложной динамической системы в фазовом пространстве состояний. В стохастическом подходе такой вектор состояния системы должен иметь повторяющееся начальное значение $x(t_0)$ и воспроизводимую функцию распределения $f(x_i)$ для всех конечных состояний. Однако начальное состояние воспроизвести точно невозможно, а, следовательно, применение стохастического подхода уже ограничено [7].

В качестве решения выявленной проблемы предлагается разработка информационно-аналитической системы научных исследований сложных нестационарных систем с хаотической динамикой (ИАСНИ), в основе которой лежит синтез системного анализа и теории хаоса-самоорганизации (ТХС), как нового направления в естествознании, которое количественно и качественно оценивает состояния сложной нестационарной системы с хаотической динамикой. Разработка ИАСНИ поможет осуществить качественный переход к персонифицированной медицине, которая подразумевает использование новых методов, теорий и подходов, направленных на изучение индивидуальных особенностей организма человека. В рамках персонифицированной медицины важные диагностические признаки должны быть идентифицированы для каждого человека индивидуально, а не на основе значений показателей, полученных с помощью статистического анализа по большим группам больных.

Объект исследования

В данном исследовании использовался специальный преобразователь пульсовой волны, позволивший получить наглядную пульсограмму, отражающую функциональное состояние внутренних органов и систем через аналого-цифровой электронный датчик

пульса без искажений – пульсометр Элокс-01М (рис.1, 2). Пульсоксиметр «Элокс-01М» предназначен для непрерывного измерения степени насыщения кислородом SpO2 и частоты пульса [8]. Прибор используется для оперативного контроля состояния испытуемого во время проведения хирургических вмешательств, в послеоперационный период, а также для различных исследований в области медицины и биологии [8].

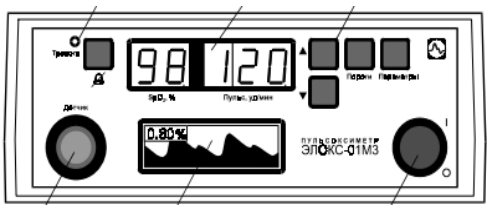


Рис. 1. Пульсометр Элокс-01М

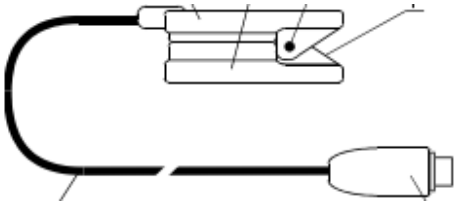


Рис.2. Пальцевой датчик

Пульсоксиметр непрерывно регистрирует измерения, после чего в виде временных рядов передает в специальное программное обеспечение «Элокс eg3-f», которое отображает на экране монитора: гистограмму распределения длительностей кардиоинтервалов (NN-интервалов), которая позволяет оценить ВРС; тенденции ее изменения, а также значения числовых показателей вариабельности визуально в режиме реального времени.

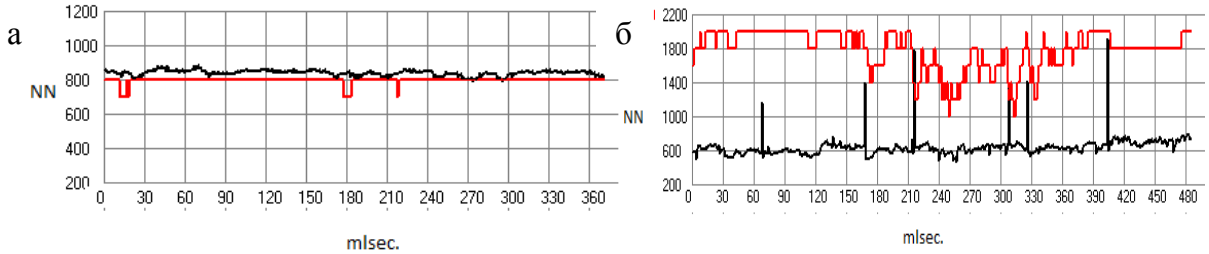


Рис. 3. Пример пульсовой волны: а – при нормогенезе; б – при патогенезе

Кардиоинтервалы (КИ) ССС показывают ритм работы сердца. Нормальным является состояние, при котором интервалы между ударами сердца варьируются, но без значительных отклонений, т. е. примерно равны между собой, а равенство или существенное отклонение от среднего значения кардиоинтервалов свидетельствует о наличии патологии: аритмии, брадикардии (замедление) и тахикардии (учащение). На рисунке 3 представлен пример пульсовой волны при условном нормогенезе и патогенезе.

Материалы и методы

В основе информационно-аналитической системы научных исследований сложных нестационарных систем с хаотической динамикой лежит общий алгоритм автоматизированной обработки информации (рис. 4).

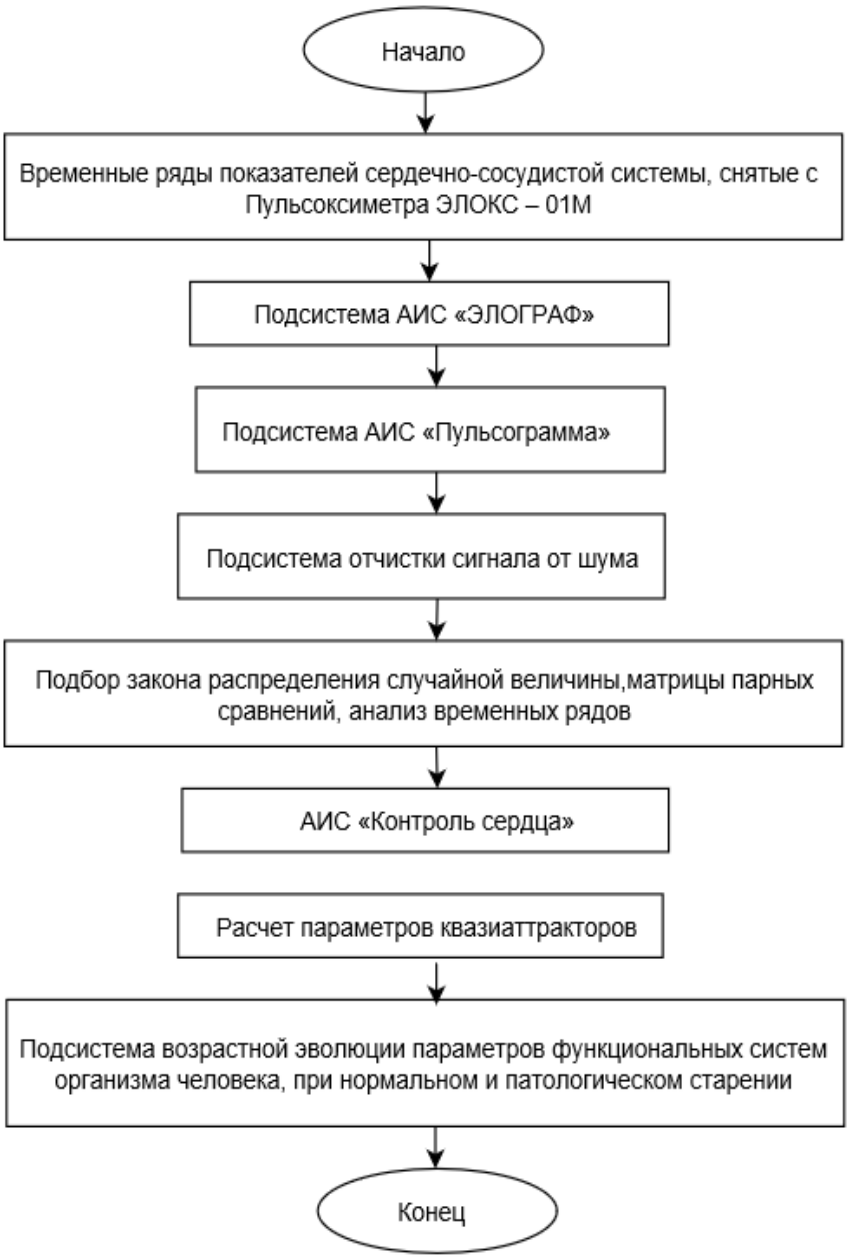


Рис. 4. Общий алгоритм автоматизированной обработки информации в ИАСНИ

Общий алгоритм автоматизированной обработки информации в ИАСНИ сложных нестационарных систем с хаотической динамикой заключается в следующем:

1. С устройства пульсоксиметра Элокс-01М снимаются значения показателей ССС. После чего значения параметров ССС с пульсоксиметра передают в специальную программу Элограф 3.0., которая позволяет на экране монитора увидеть сигналы ритма сердца и основных параметров ССС в виде графиков и гистограмм.

2. После программы Элограф 3.0. значения параметров в виде временных

рядов попадают в табличный редактор Excel, в которой преобразуются в электронные таблицы для первичной обработки.

3. Электронные таблицы передают в АИС «Пульсограмма», предназначенную для первичной обработки биомедицинских данных (количество элементов выборки, среднее значение, дисперсия, среднеквадратическое отклонение, и т. д.), а также выявление количества выбросов значений кардиоинтервала за пределы 3-х среднеквадратических отклонений, которые говорят о наличии вероятной патологии сердечно-сосудистой системы [9, 10].

4. Вне зависимости от того, существуют ли выбросы во временных рядах кардиоинтервалов за пределы 3-х среднеквадратических отклонений, необходимо проверить временной ряд на наличие артефактов (шума). Для этого в ИАСНИ существует подсистема отчистки сигнала от шума на основе адаптивного фильтра [11].

5. После проверки на присутствие шума происходит процесс вторичной обработки и анализа данных (подбор закона распределения случайной величины, матрицы парных сравнений, карты Шухарта, анализ временных рядов, аппроксимация автокорреляционной функции полиномами высших порядков, аппроксимация функции плотности распределения данных кардиоинтервалов с использованием семейства кривых Пирсона) [12, 13].

6. Расчет параметров квазиаттракторов (площадь, объем, центр). После чего строится квазиаттрактор, рассчитывается траектория движения квазиаттрактора в пространстве состояний [14].

7. Далее используют алгоритм возрастной эволюции параметров функциональных систем организма человека при нормальном и патологическом старении. Состояние гомеостаза организма разных возрастных групп с помощью параметров квазиаттракторов описывают с помощью модели Ферхюльста-Пирла. На основе полученных графиков делается вывод о состоянии процесса старения организма человека [15].

Результаты и их обсуждение

В результате проведенных исследований была разработана структура ИАСНИ сложных нестационарных систем с хаотической динамикой, информационное, алгоритмическое, математическое и программное обеспечение.

На рисунке 5 представлена композиция архитектуры информационно-аналитической системы научных исследований сложных нестационарных систем с хаотической динамикой.

Информационно-аналитическая система научных исследований сложных нестационарных систем с хаотической динамикой горизонтально делится на три части: пользовательский интерфейс программного обеспечения, программное обеспечение, аппаратное обеспечение.

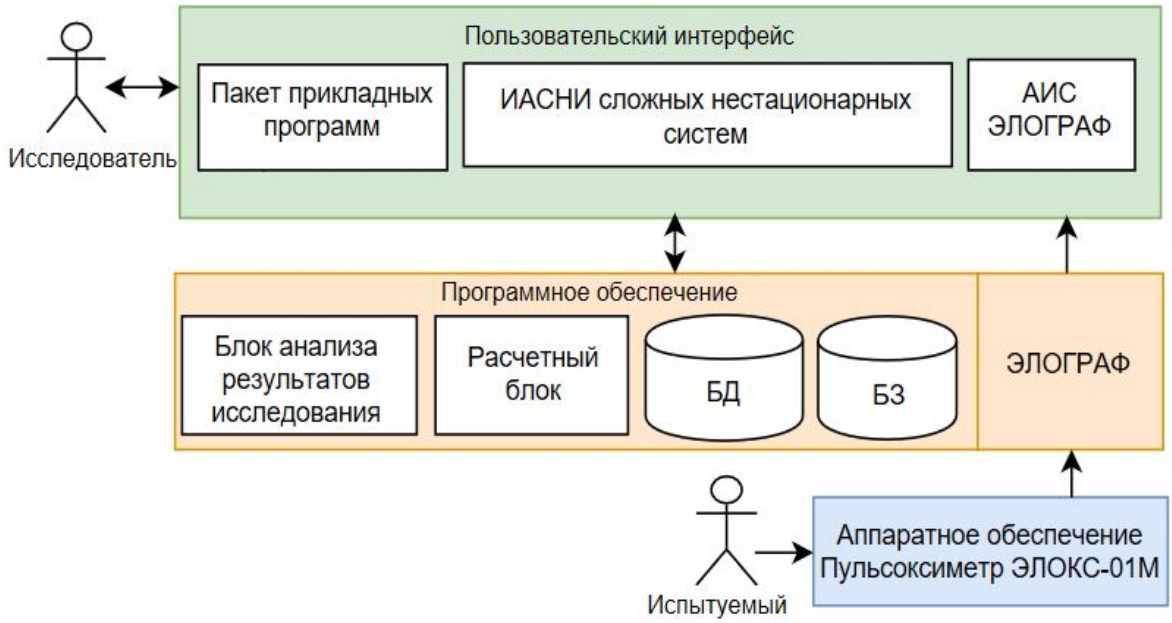


Рис. 5. Композиция архитектуры ИАСНИ сложных нестационарных систем с хаотической динамикой

Исследователь взаимодействует на первом уровне с пользовательским интерфейсом пакета прикладных программ, который является внешним модулем ИАСНИ; с пользовательским интерфейсом ИАСНИ сложных нестационарных систем с хаотической динамикой; с пользовательским интерфейсом пульсоксиметра Элокс-01М при помощи АИС «Элограф». На втором уровне располагается программное обеспечение, реализуемое модулями ИАСНИ, а также внешнее программное обеспечение:

1. Специальная программа Элограф 3.0., которая позволяет на экране монитора увидеть сигналы ритма сердца и основных параметров ССС в виде рядов данных, графиков и гистограмм.

2. База данных, в которой хранится информация о состоянии сердечно-сосудистой системы в виде реляционных таблиц.

3. База знаний, в которой хранятся математические формулы, законы, модели и гипотезы, правила карт Шухарта для выявления критических изменений работы ССС, ГОСТы.

4. Расчетный блок, в котором происходит процесс первичной обработки данных с помощью подсистемы расчета количества выбросов во временных рядах кардиоинтервалов ССС, а так же используется пакет прикладных программ для различных математических расчетов: блок первичной обработки данных; фильтры; численный эксперимент наступления фатального состояния ССС; карты Шухарта; соответствие структуры данных закону нормального распределения; расчет параметров квазиаттракторов; расчет автокорреляционной функции, построение коррелограмм; аппроксимация автокорреляционной функции полиномами высших порядков; аппрок-

симация данных семейством кривых Пирсона; матрицы парных сравнений, коэффициент корреляции Кендалла; модель возрастной эволюции параметров квазиаттракторов (Ферхюльста-Пирла) (Программа оценки состояния параметров ССС); расчет значения энтропии Шеннона; анализ временных рядов.

5. Блок анализа, в котором формулируются выводы на основе полученных расчетных данных.

6. Пакет прикладных программ: Microsoft Office Excel 2007; IBM SPSS Statistics 22; Table Curve 2D v.5.01; Elograph 3.0.

На третьем уровне находится аппаратное обеспечение, которое состоит из компьютера и аналого-цифрового электронного датчика пульса без искажений – пульсометра Элокс-01М.

На уровне пользовательского интерфейса представлены программы, в том числе авторские.

В результате использования системы формулируются выводы на основе полученных расчетных данных:

После первичной обработки данных на основе анализа выбросов значения кардиоинтервала за пределы среднеквадратического отклонения формируется предположение о наличии изменений в функциональном состоянии сложной биомедицинской системы для данного набора данных.

Проверка данных на принадлежность нормальному закону распределения при помощи четырех критериев позволяет сделать выводы об ограниченности применения стохастического подхода для конкретных биомедицинских данных.

Использование адаптивных фильтров позволяет определить, соответствуют ли выбросы отдельных значений во временных рядах КИ индивидуальным особенностям организма человека или эти артефакты обусловлены наличием шума различной природы.

Численный эксперимент моделирования фатального состояния ССС позволяет сделать вывод о том, что, добавив модельные точки, соответствующие процессу остановки сердца в ряды кардиоинтервалов, вероятность наступления такого события априори невозможна.

На основе выявления одного из правил контрольных карт Шухарта на массиве цепочки значений КИ прогнозируется наступление критического состояния ССС.

Анализ параметров квазиаттракторов (площадь, объем, центр) в фазовом пространстве состояний организма человека, с использованием методов системного анализа и синтеза в рамках теории ТХС, дает возможность использования нового теоретического и практического описания в диагностике и лечении патологических состояний ССС. Так же такой анализ позволяет сравнивать состояния гомеостаза организма разных групп испытуемых.

Анализ временных рядов (автокорреляционный анализ) биомедицин-

ских данных позволяет сделать вывод не только об изменении значений самих параметров во времени, но и изменении внутренней структуры сигнала регистрируемых показателей. Данный факт является подтверждением первого и второго постулата теории хаоса-самоорганизации: конкретное состояние вектора состояния системы в любой момент времени не имеет смысла, так как происходит постоянное хаотическое движение этого вектора в ФПС (мерцание).

Аппроксимация исходных данных кардиоинтервалов семейством кривых Пирсона и полиномами высших порядков показывает, что данный хаотический процесс может быть описан адекватно для целей прогнозирования только полиномиальными функциями высокой степени. Данный анализ позволяет получить полную неопределенность в прогнозировании будущего состояния систем третьего типа на примере параметров ССС и тем самым подтверждает первый и второй принцип организации биомедицинских систем.

Анализ матриц парных сравнений позволяет сделать вывод, что при исследовании биомедицинских данных, проведение разового эксперимента недостаточно для определения функционального состояния организма человека.

На основе расчетов по модели возрастной эволюции параметров квазиаттракторов (Ферхюльста-Пирла) делается вывод о реальных эволюционных изменениях параметров КИ при нормальном или патологическом старении организма человека.

Расчет значения энтропии Шеннона позволяет получить оценку уровня детерминированности (хаотичности) в сигнале кардиоинтервалов, то есть каково распределение вероятностей амплитуды колебания кардиоинтервала.

На основе анализа выбросов за различные пределы среднеквадратического отклонения делается вывод либо о индивидуальных особенностях организма человека, либо о возрастных изменениях в организме (одного индивидуума), либо о патологическом состоянии работы сердца. Например, сердце может остановиться на длительное время (выходить далеко за 20 сигм при клинической смерти) и потом опять забиться. Любой параметр гомеостаза может внезапно выйти за пределы трёх сигм, что в статистике уже отбрасывается. В физике, технике такие гигантские выбросы могут привести к разрушению системы, переходу в новое качество. Однако биомедицинские системы такие гигантские отклонения демонстрируют очень часто.

Заключение

Повышение эффективности миниатюрных медицинских приборов, на примере пульсоксиметра Элокс-01М, было достигнуто за счет разработки структуры информационно-аналитической си-

стемы научных исследований сложных нестационарных систем с хаотической динамикой, в основе которой лежат новые методы и алгоритмы обработки и анализа нестационарных временных рядов.

Список литературы

1. Еськов В. М., Зинченко Ю. П., Филатова О. Е. К проблеме самоорганизации в биологии и психологии // Вестник новых медицинских технологий. 2016. Т. 23, № 3. С. 174-181.

2. Баевский Р. М., Берсенева А. П. Введение в донозологическую диагностику. М.: Слово, 2008. 176 с.

3. Медицина и теория хаоса в описании единичного и случайного / В. М. Еськов, В. В. Еськов, Л. Б. Джумагалиева, С. В. Гудкова // Вестник новых медицинских технологий. 2014. Т. 21, № 2. С. 27-34.

4. Филатова О. Е., Хадарцева К. А., Еськов В. В. Два типа подходов в развитии персонифицированной медицины // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2015. № 1. С. 81-88.

5. Рябыкина Г. В., Соболев А. В. Вариабельность ритма сердца. М.: СтарКо, 2006. С. 45-50.

6. Григоренко В. В., Еськов В. М. Анализ временных рядов в исследовании процессов хаотической динамики // Естественные и технические науки. 2016. № 6 (96). С. 130–134.

7. Неопределенность и непрогнозируемость – базовые свойства систем в биомедицине / В. М. Еськов, О. Е. Филатова, А. А. Хадарцев, В. В. Еськов, Д. Ю. Филатова // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2013. № 1. С. 68.

8. Руководство по эксплуатации. Пульсиксиметр ЭЛОКС-01М. Новые приборы, инженерно-медицинский центр. 15 с.

9. Григоренко В. В. Гавриленко Т. В., Еськов В. М. Методы математической статистики в задачах анализа патологических состояний населения // Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе: сборник трудов Международной конференции, 2014. С. 116–118.

10. Григоренко В. В., Лысенкова С. А. Программа расчета количества выбросов межимпульсных интервалов сердечно-сосудистой системы. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611207 от 27.01.2016г.

11. Григоренко В. В., Еськов В. М., Зимин М. И. Адаптивные фильтры в исследование биомедицинских данных // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2016. Т. 15, № 2. С. 304–309.

12. Непараметрические методы статистического анализа экспериментальных данных / М. А. Погореловский, В. В. Григоренко, Н. Б. Назина, П. В. Заикин // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий материалы IV межрегиональной научно-практической конференции / Севастопольский государственный университет; науч. ред. Б. В. Соколов. Севастополь, 2018. С. 93–94.

13. Григоренко В. В., Еськов В. М. Анализ временных рядов в исследовании процессов хаотической динамики // Естественные и технические науки. 2016. № 6 (96). С. 130–133.

14. Григоренко В.В. Стохастический подход в анализе сложных биомедицинских систем с хаотической динамикой // Перспективы направления развития отечественных информационных технологий: материалы IV межрегиональной научно-практической конференции. 2018. С. 113–116.

15. Григоренко В. В., Лысенкова С. А., Микшина В. С. Программа оценки состояния параметров сердечно-сосудистой системы. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619094 от 15.08.2017г.

Поступила в редакцию 02.04.2019
Подписана в печать 06.04.2019

Reference

1. Es'kov V. M., Zinchenko Yu. P., Filatova O. E. K probleme samoorganizatsii v biologii i psikhologii. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 174–181 (In Russ.).

2. Baevskii P. M., Berseneva A. P. Vvedenie v donozologicheskuyu diagnostiku. Moscow, Slovo Publ., 2008. 176 p. (In Russ.).

3. Es'kov V. M., Es'kov V. V., Dzhumagalieva L. B., Gudkova S. V. Meditsina i teoriya khaosa v opisanii edinichnogo i sluchainogo. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 27–34 (In Russ.).

4. Filatova O. E., Khadartseva K. A., Es'kov V. V. Dva tipa podkhodov v razvitii personifitsirovannoi meditsiny. *Slozhnost'. Razum. Postneklassika*, 2015, no. 1, pp. 81–88 (In Russ.).

5. Ryabykina G. V., Sobolev A. V. Variabel'nost' ritma serdtsa. Moscow, StarKo Publ., 2006, pp. 45–50 (In Russ.).

6. Grigorenko V. V., Es'kov V. M. Analiz vremennykh ryadov v issledovanii protsessov khaoticheskoi dinamiki. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 6 (96), pp. 130–134 (In Russ.).

7. Es'kov V. M., Filatova O. E., Khadartsev A. A., Es'kov V. V., Filatova D. Yu. Neopredelennost' i neprognoziruemost' – bazovye svoistva sistem v biomeditsine. Slozhnost'. Razum. Postneklassika, 2013, no. 1, p. 68 (In Russ.).

8. Rukovodstvo po ekspluatatsii. Pul'siksimetr ELOKS-01M. Novye pribory, inzhenerno-meditsinskii tsentr. 15 p. (In Russ.).

9. Grigorenko V. V. Gavrilenko T. V., Es'kov V. M. Metody matematicheskoi sta-tistiki v zadachakh analiza patologicheskikh sostoyanii naseleniya. Matematika i informatsionnye tekhnologii v neftegazovom komplekse. Sbornik trudov Mezhdunarodnoi konferentsii, 2014, pp. 116–118 (In Russ.).

10. Grigorenko V. V., Lysenkova S. A. Programma rascheta kolichestva vybrosov mezhimpul'snykh intervalov serdechno-sosudistoi sistemy. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2016611207 ot 27.01.2016 g. (In Russ.).

11. Grigorenko V. V., Es'kov V. M., Zimin M. I. Adaptivnye fil'try v issledovanie biomeditsinskikh dannykh. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh*, 2016, vol. 15, no. 2, pp. 304–309 (In Russ.).

12. Pogorelovskii M. A., Grigorenko V. V., Nazina N. B., Zaikin P. V. Neparametricheskie metody statisticheskogo analiza eksperimental'nykh dannykh. Perspektivnye napravleniya razvitiya otechestvennykh informatsionnykh tekhnologii. Materialy IV mezhregional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii, ed. by Sokolov B. V. Sevastopol', 2018, pp. 93–94 (In Russ.).

13. Grigorenko V. V., Es'kov V. M. Analiz vremennykh ryadov v issledovanii protsessov khaoticheskoi dinamiki. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 6 (96), pp. 130–133 (In Russ.).

14. Grigorenko V.V. Stokhasticheskii podkhod v analize slozhnykh biomeditsinskikh sistem s khaoticheskoi dinamikoi. Perspektivy napravleniya razvitiya otechestvennykh informatsionnykh tekhnologii. Materialy IV mezhregional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 2018, pp. 113–116 (In Russ.).

15. Grigorenko V. V., Lysenkova S. A., Mikshina V. S. Programma otsenki sostoyaniya parametrov serdechno-sosudistoi sistemy. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2017619094 ot 15.08.2017 g. (In Russ.).

Received 02.04.2019

Accepted 06.04.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Виолетта Вячеславовна Григоренко, старший преподаватель кафедры информатики и вычислительной техники Политехнического института СурГУ, БУ ВО Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Сургутский государственный университет», г. Сургут, Российская Федерация,
e-mail: grigv_84@mail.ru

Violetta V. Grigorenko, Senior lecturer, Surgut State University, Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra, Surgut, Russian Federation,
e-mail: grigv_84@mail.ru

Валерий Матвеевич Еськов, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», Москва, Российская Федерация,
e-mail: filatovmik@yandex.ru

Valeriy M. Eskov, Doctor of physical and mathematical sciences, Professor, Chief Researcher of the Federal State Institution "Federal Research Center Research Institute of System Studies of the Russian Academy of Sciences", Moscow, Russian Federation,
e-mail: filatovmik@yandex.ru

Виктория Степановна Микшина, кандидат технических наук, профессор, завкафедрой информатики и вычислительной техники Политехнического института СурГУ, БУ ВО Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Сургутский государственный университет», г. Сургут, Российская Федерация
e-mail: mikshinavs@gmail.com

Viktoriya S. Mikshina, Candidate of Technical Sciences, Professor, Surgut State University, Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra, Surgut, Russian Federation,
e-mail: mikshinavs@gmail.com

Нина Борисовна Назина, доцент кафедры информатики и вычислительной техники Политехнического института СурГУ, БУ ВО Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Сургутский государственный университет», г. Сургут, Российская Федерация
e-mail: Nnb60@mail.ru

Nina B. Nazina, Assistant Professor, Surgut State University, Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra, Surgut, Russian Federation,
e-mail: nnb60@mail.ru

УДК 656.13.658

Моделирование и анализ геоэкологических систем Курской области, определяющие особенности эксплуатации объектов размещения отходов

И. О. Кирильчук[1], В. В. Юшин[1]✉, М. В. Коткина[2]

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Российская Федерация, 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

[2] Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова», Российская Федерация, 163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17

✉ e-mail: ushinvv@mail.ru

Резюме

Цель исследования. *Объекты размещения твердых отходов представляют собой источники значительного негативного воздействия на окружающую среду. В данной статье объекты размещения отходов (полигоны, свалки, шламо- и навозохранилища и т.д.) рассматриваются как открытые геоэкологические системы, постоянно взаимодействующие с окружающей средой через потоки веществ и энергий. Факторами, усиливающими негативное воздействие полигонов, являются возгорание отходов, а также скопление взрывоопасных газов, в особенности метана. Ввиду того, что полигон твердых отходов представляет собой источник повышенной экологической и пожарной опасности, актуальным является исследование особенностей осуществления расчетного мониторинга полигона твердых отходов в процессе его эксплуатации.*

Методы. *Методологически проведенное исследование основано на использовании современных информационных технологий, программных комплексов имитационного моделирования.*

Результаты. *В рамках данного исследования рассмотрены особенности расчетного мониторинга объектов размещения отходов на примере полигона твердых коммунальных отходов «Чаплыгино» Курской области. В статье представлены результаты оценки риска при возникновении взрыва метана на полигоне ТКО «Чаплыгино», выполнены прогнозирование и оценка обстановки при возникновении пожара на данном полигоне с последующим переходом в лесной пожар.*

Заключение. *Моделирование развития различных чрезвычайных ситуаций (взрывов и пожаров) на объектах размещения отходов обеспечивает своевременное выявление зон с показателями индивидуального риска, превышающими допустимые значения, планирование превентивных мероприятий по эффективной защите территорий РФ, а также позволяет сформулировать методические рекомендации, направленные на снижение экологической и пожарной опасности объектов размещения отходов.*

Ключевые слова: *объект размещения отходов; твердые коммунальные отходы; полигон; расчетный мониторинг; моделирование; экологическая и пожарная опасность.*

Благодарности: *Работа выполнена в рамках Гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-941.2019.5.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

© Кирильчук И. О., Юшин В. В., Коткина М. В., 2019

Для цитирования: Кирильчук И. О., Юшин В. В., Коткина М. В. Моделирование и анализ геоэкологических систем Курской области, определяющие особенности эксплуатации объектов размещения отходов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 2. С. 61–74

UDC 656.13.658

Modeling and Analysis of Geoecological Systems of the Kursk Region Defining Features of the Operation of Waste Disposal Facilities

I. O. Kiril'chuk[1], V. V. Yushin[1]✉, M. V. Kotkina[2]

[1] Southwest State University, 94, 50 Let Oktyabrya str., Kursk, 305040, Russian Federation

[2] NARFU, 17, Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

✉ e-mail: ushinvv@mail.ru

Abstract

The most common method of solid waste management in Russia is landfilling. Solid waste landfill can be considered as an open geo-ecological system, which is in constant physical and energy connection with the external environment. Waste storage at landfills is accompanied by a significant negative impact on the environment. Factors that increase the negative impact of landfills is the ignition of waste, as well as the accumulation of explosive gases. Due to the fact that the solid waste landfill is a source of increased environmental and fire danger, monitoring is a prerequisite for its operation. In the framework of this study, the features of the calculated monitoring of waste disposal facilities on the example of solid municipal waste landfill "Chaplygino" Kursk region, based on the use of modern information technologies, simulation software systems. The article presents the results of risk assessment in the event of methane explosion at the landfill "Chaplygino", made forecasting and assessment of the situation in the event of a fire at the landfill, followed by the transition to a forest fire. Modeling the development of various emergency situations (explosions and fires) at waste disposal facilities provides timely identification of areas with indicators of individual risk exceeding the permissible values, planning of preventive measures for the effective protection of the territories of the Russian Federation, as well as allows to formulate methodological recommendations aimed at reducing the environmental and fire hazard of waste disposal facilities.

***Keywords**: waste disposal facility; municipal solid waste; landfill; design monitoring; modeling; environmental and fire hazard.*

***Acknowledgements**: the Work was carried out under the Grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists MK-941.2019.5.*

***Conflict of interest**: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Kirilchuk I. O., Yushin V. V., Kotkina M. V. Modeling and Analysis of Geoecological Systems of the Kursk Region Defining Features of the Operation Of Waste Disposal Facilities. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, 9(2): 61–74 (in Russ.).

Введение

Объекты размещения твердых отходов представляют из себя источники значительного негативного воздействия на окружающую среду [1]. Объекты размещения твердых отходов (полигоны, свалки, шламо- и навозохранилища и т. д.) в данной статье рассматриваются как открытые геоэкологические системы, постоянно взаимодействующие с окружающей средой через потоки веществ и энергий [2]. Факторами, усиливающими негативное воздействие полигонов, являются возгорание отходов, а также скопление взрывоопасных газов, в особенности метана [3]. Необходимо отметить, что время горения отходов образуются загрязняющие вещества, относящиеся к группе супертоксикантов (диоксины, фураны), эти загрязнители отличаются чрезвычайной подвижностью, обеспечивающей им мгновенное поступление в атмосферу вместе с другими продуктами горения [4].

Рассмотрим наиболее значительные возгорания на полигонах и свалках отходов, произошедшие за последний год и характеризующиеся экологическим и экономическим ущербом [5].

В 2018 году произошло возгорание на полигоне ТБО "Часцы" в Одинцовском районе Московской области. Площадь пожара составила около 1 га, ликвидация тления проведена в течение 2 дней. В результате пожара произошло значительное загрязнение атмосферного воздуха.

В Челябинской области произошел пожар на полигоне твердых коммунальных отходов в Полетаево. Ущерб от пожара составил 25 млн рублей.

В результате пожара на полигоне ТБО в Лаишевском районе Казани произошло сильное задымление нескольких населенных пунктов, дым заходил через поселки Петровский и Мирный, далее через поселок Борисково, тянулся в район Танкового кольца.

Также необходимо отметить возгорание на полигоне твердых бытовых отходов в Сланцевском районе Ленинградской области, пожар в Башкирии под Нефтекамском на полигоне ТБО (площадь горения составила 300 квадратных метров), Усинский пожар на полигоне ТБО в Республике Коми, с которым боролись почти месяц, площадь тления свалки составила 400 кв.м., возгорание мусора в Новом Уренгое на полигоне ТБО.

В начале 2019 года сообщения о возгораниях на свалках пришли из Забайкальского края (пожар на мусорном полигоне под Читой в Ивановке, пожар ликвидировали в течение недели, площадь составила около 4 га), а также из Курской области (пожар на закрытом полигоне ТБО в Железногорске, площадь 40 м.кв.).

Проанализировав причины возникновения пожаров на свалках и полигонах твердых отходов, можно выделить следующие причины: происшествия на близлежащих территориях, повлекшие

за собой возникновение пожара; противоправные несанкционированные действия, отсутствие экологической культуры населения; нарушения при проектировании объектов размещения отходов, отсутствие систем активной дегазации свалочного газа; ошибки персонала и нарушения при эксплуатации; климатические факторы.

Ввиду того, что полигон твердых отходов представляет собой источник повышенной экологической и пожарной опасности, осуществление мониторинга является непременным условием его эксплуатации. Вышеизложенное подтверждает актуальность цели проводимого исследования, состоящей в рассмотрении особенностей расчетного мониторинга полигонов твердых отходов, основанного на использовании современных информационных технологий [6-8].

Материалы и методы

При рассмотрении вопроса применения информационных технологий на объектах размещения отходов необходимо определить вид чрезвычайной ситуации на полигоне:

– авария при транспортировке отходов на полигон, повлекшая розлив топлива с последующим взрывом и дальнейшим возгоранием;

– выброс загрязняющих веществ в результате природных явлений;

– возникновение возгораний на карте размещения отходов.

Для оценки последствий данных происшествий существует ряд программных продуктов. Наибольшее распространение получили следующие:

1. Расчетно-аналитическая программа «Студия анализа риска 2011» НПО «ДИАР», реализующая общий графический интерфейс с набором подключенных программных модулей, осуществляющих расчет по действующим методикам прогнозирования последствий аварийных ситуаций. В состав комплекта входит программа «Оценка риска», позволяющая оценить риск взрыва ТВС по определенному сценарию, исходя из параметров вещества, его массы (объема), вероятности аварии, возгорания, коэффициента участия, времени испарения вещества, площади разлива и возможного развития в соответствии с внешними (погодными) условиями.

2. «Информационно-аналитическая система анализа и управления природно-техногенными рисками с учетом изменяющейся инфраструктуры территорий и обоснования мероприятий по защите территорий субъектов Российской Федерации, муниципальных образований, критически важных объектов экономики, в том числе Республики Крым и г. Севастополь» (далее – САУР). Назначение системы – своевременное выявление зон с показателями индивидуального риска, превышающими допустимые значения, а также планирование превентивных мероприятий по эффективной защите территорий субъектов

Российской Федерации, муниципальных образований, критически важных объектов экономики. Программа создана на основе ГИС-технологий с использованием современных средств визуализации и WEB-технологий, предназначена для работы с картографическими данными, а также выполнения расчетов с использованием географических и других баз данных [9].

Результаты и их обсуждение

Характеристика объекта исследования

На территории Курской области, согласно данным Росприроднадзора за 2018 г., расположено 7 полигонов ТКО (табл. 1).

Таблица 1

Перечень объектов размещения твердых коммунальных отходов на территории Курской области

№	Наименование ОРО	Назначение	Ближайший населенный пункт	Эксплуатирующая организация
1	Полигон ТБО	Размещение (захаоронение)	Железногорский район, п. Лужки	МУП «Экосервис»
2	Полигон ТБО	Размещение (захоронение)	Курский район, д. Сотниково	ООО «Компания «Строй-Интер»
3	Полигон ТБО	Размещение (захоронение)	Курский район, д. Чаплыгино	АО «САБ по уборке г. Курска»
4	Полигон ТБО	Обработка, Размещение	Октябрьский район, с. Б. Долженково	ООО «Экопол»
5	Полигон ТБО	Размещение (захоронение)	Рыльский район, г. Рыльск	УМП «СУР»
6	Полигон ТБО	Размещение (захоронение)	Солнцевский район, д. Меловая	ООО «Солнцевское ЖКХ»
7	Полигон ТБО	Размещение (захоронение)	Суджанский район, с. Замостье	МУП ЖКХ г. Суджа

В рамках данного исследования рассмотрены особенности расчетного мониторинга объектов размещения отходов на примере полигона твердых коммунальных отходов «Чаплыгино» Курской области. Полигон введен в эксплуатацию в 1980 году, расположен на территории Пашковского сельского совета Курского района Курской области, с северной стороны города Курска. Общая площадь составляет 238931 м кв., проектная мощность 200 000 тонн/год, проектная вместимость 6 920 520 тонн, количество размещенных отходов 5 813 239 тонн, остаточная вместимость по состоянию на 01.01.2018 года составляет

1 107 281 тонн. В непосредственной близости от полигона ТКО расположены населенные пункты Сотниково, Хмелевое, Пашкино, Глебово, прилегающие территории садовых товариществ. Таким образом, полигон представляет собой объект риска загрязнения окружающей среды в случае возникновения пожаров, загрязнения атмосферы, почвы, подземных и поверхностных почв фильтратом, что влечет гибель растительности, ухудшение состояния здоровья населения. При горении отходов на полигоне ТКО происходит загрязнение атмосферы выбросами диоксинов, хлористых соединений и др. опасных загрязняющих веществ.

Оценка риска при возникновении аварии на объектах размещения отходов

Оценка риска проводится с использованием программного комплекса «Студия анализа риска 2011» и является необходимым составляющим элементом регулирования безопасности [10]. Программный комплекс позволяет осуществить расчеты зон термического и токсического заражения в случае нарушения технологического процесса как на этапе строительства, так и в процессе эксплуатации.

Газогенерация захороненных отходов может продолжаться более 100 лет. Время, в течение которого выделение газа уменьшается в два раза, достигает 25 лет. Проведем оценку риска при достаточно скопившемся метане массой 35 кг и оценим последствия взрыва.

На рисунке 1 представлен интерфейс ПК «Студия анализа риска 2011» на этапе задания исходных данных и наружных условий моделирования.

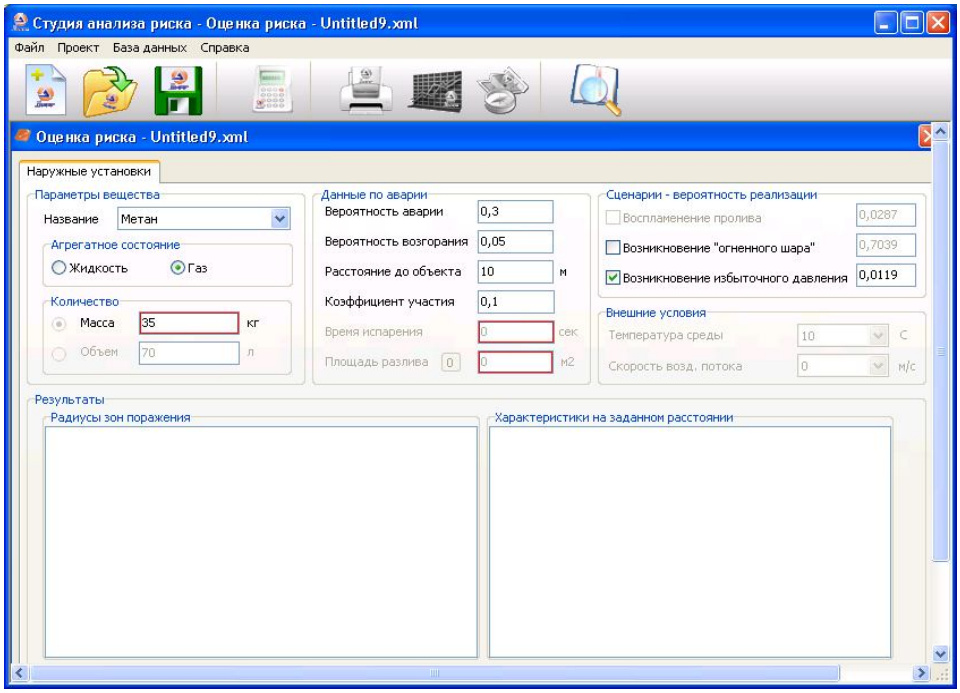


Рис. 1. Интерфейс ПК «Студия анализа риска 2011»

Результаты расчета позволили определить основные параметры зоны поражения: полное разрушение зданий – 8 м; тяжелые повреждения зданий – 12 м; средние повреждения зданий – 18 м; умеренные повреждения зданий – 32 м; нижний порог повреждения человека – 65 м; повреждение остекления – 102 м.

Зоны риска распространяются на следующие расстояния: 10-4 – 4 м; 10-5 – 9 м; 10-6 – 37 м. При этом на граничном расстоянии 37 м индивидуальный риск составил 0,00000714 (рис. 2) при избыточном давлении 80799,18 Па и импульсе 137,6685 Па*с (рис. 3 и 4).

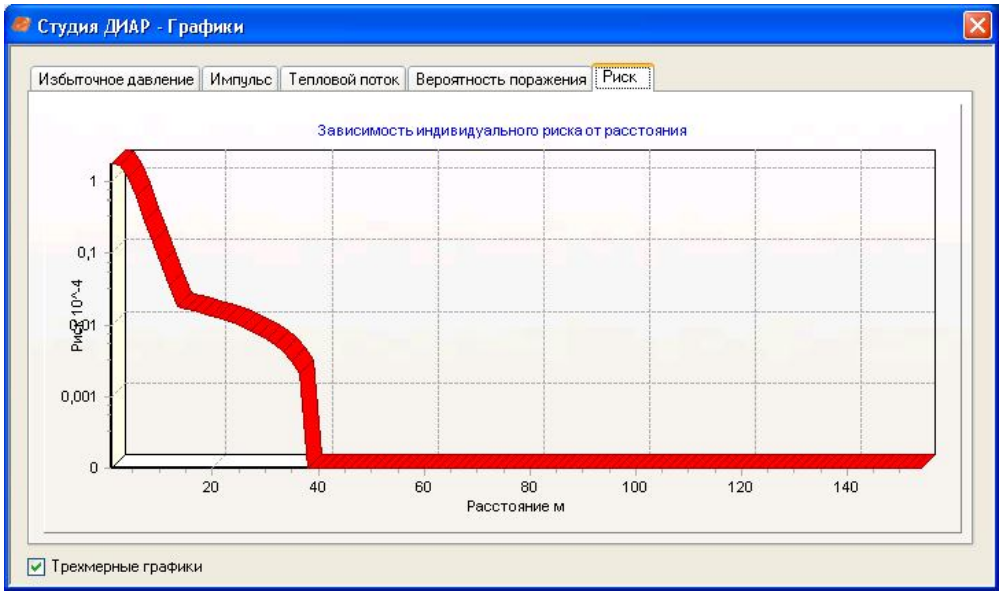


Рис. 2. Зависимость индивидуального риска от расстояния

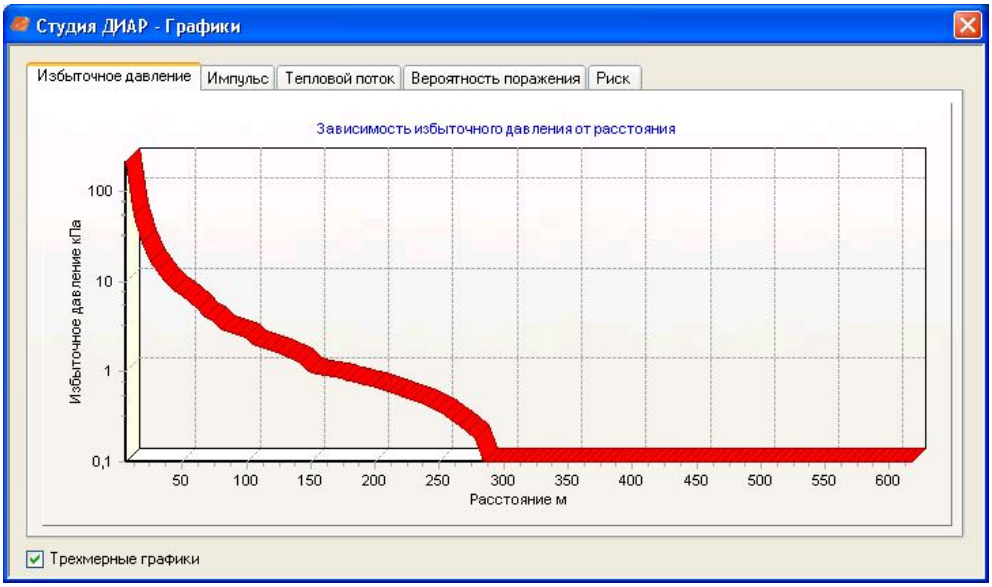


Рис. 3. Зависимость избыточного давления от расстояния

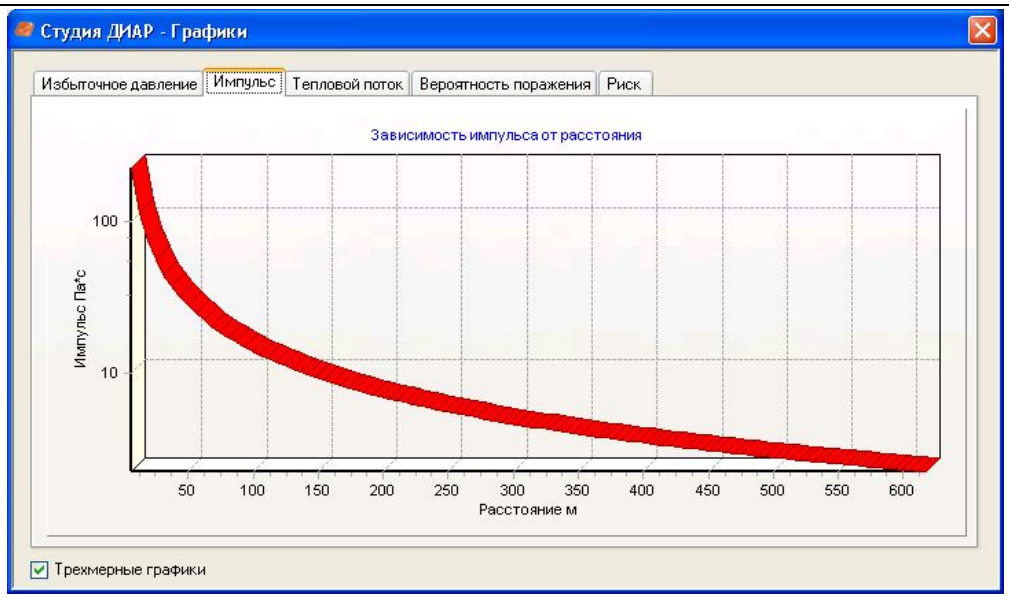


Рис. 4. Зависимость импульса от расстояния

Таким образом, результаты моделирования, полученные с использованием ПК «Студия анализа риска 2011», свидетельствуют о незначительном уровне индивидуального риска при возникновении избыточного давления за счет взрыва метана масой 35 кг.

Моделирование возникновения пожара на объекте размещения отходов

В рамках данного исследования выполнено прогнозирование и оценка обстановки при возникновении пожара на полигоне ТКО «Чаплыгино» с последующим переходом в лесной пожар с использованием системы САУР.

Для оценки состояния пожарной опасности в лесах используется комплексный показатель, который учитывает основные факторы, влияющие на пожарную опасность лесных горючих материалов.

Комплексный показатель определяется по формуле

$$K = \sum_{1}^{n} (T_0 - T) \cdot T_0 , \qquad (1)$$

где T_0 – температура воздуха на 12 час по местному времени;

T – точка росы на 12 часов (дефицит влажности);

n – число дней после последнего дождя.

В зависимости от значения K существуют следующие классы пожарной опасности погоды:

- I класс, отсутствие опасности (К < 300);
- II класс, малая пожарная опасность (301<К<1000);
- III класс, средняя пожарная опасность (1001<К<4000);
- IV класс, высокая пожарная опасность (4001<К<12000);
- V класс, чрезвычайная опасность (К >12000).

Исходными данными для прогнозирования последствий лесного пожара являются:

– вид пожара (верховой устойчивый, верховой беглый, низовой);

– класс горимости лесных насаждений;

– класс пожарной опасности погоды;

– скорость ветра;

– начальная площадь S_0 или начальный периметр $П_0$ очага пожара.

Индивидуальный риск от природных пожаров определяется по формуле (2) с использованием статистических и расчетных данных, характерных для рассматриваемого региона.

$$R_{ei} = H \cdot P, \qquad (2)$$

где Rei – индивидуальный риск при i-ой чрезвычайной ситуации;

H – частота чрезвычайной ситуации за год;

P – вероятность наступления неблагоприятного события при условии, что случилась чрезвычайная ситуация.

Размерность индивидуального риска, учитывая безразмерность параметра P, имеет вид 1/год.

Характерный параметр частоты чрезвычайной ситуации за год принимается по Атласу природных опасностей и рисков на территории Российской Федерации, а вероятность наступления неблагоприятного события P – на основе статистических данных МЧС России.

Для выполнения расчетов необходимо в пользовательском интерфейсе выполнить ввод «Исходных данных»:

– очаг лесного пожара (указываем дату, время, широту и долготу, площадь очага);

– параметры лесного пожара (характеристика леса - тип пожара, горимость, погодные условия – класс пожарной опасности в лесах);

– параметры расчета (рельеф, расчет задымления, время пожара, ширина буферной зоны);

– погодные условия (температура, скорость ветра, направление).

Проведем моделирование чрезвычайной ситуации по следующему сценарию. На Полигоне ТКО «Чаплыгино» 31 мая 2019 года произошёл пожар с дальнейшим переходом в лесной массив. К полигону прилегает лесной массив преимущественно с лиственными породами деревьев, класс пожарной опасности в лесах – 5 чрезвычайная пожарная опасность, рассматриваемое время пожара 10 часов, ширина буферной зоны составит 1 м. Погодные условия оказывают неблагоприятное воздействие, повышенный температурный режим +30ºС, ветер порывистый западного направления - 15 м/с.

В соответствии с результатами расчета лесного пожара может выгореть 7,2 га леса. Периметр пожара составит приблизительно 0,9 км. Площадь зоны задымления может составить 1534,0 га. В таблице 2 приведены населенные пункты, попадающие в зону действия моделируемого лесного пожара.

Таблица 2

Населенные пункты в зоне воздействия лесного пожара
Курская область Курский район

Название	Население, чел	Общая площадь, га	Площадь воздействия лесного пожара, га	Население в зоне воздействия лесного пожара, чел	Время добегания фронта пожара, час	Площадь задымления, га	Население в зоне задымления, чел
Букреевка	630	39,0	0,0	0	0	18,0	287
Мошкино	60	15,0	0,0	0	0	12,0	50
Пашково	60	20,0	0,0	0	0	19,0	56
Итого:	750	74	0	0	0	49	393

Рис. 5. Карта последствий распространения очага возгорания и задымления

На рисунке 5 представлено отображение на электронной карте последсвий распространения очага возгорания и задымления моделируемого пожара на полигоне ТКО «Чаплыгино».

На заключительном этапе моделирования чрезвычайной ситуации на объекте размещения отходов проводится расчет потребности в силах и средствах ликвидации ЧС.

Общая потребность в силах и средствах ликвидации ЧС:

– личного состава – 73 чел.;

– техники – 31 ед. техники.

По результатам, полученным в процессе моделирования развития пожара на полигоне ТКО «Чаплыгино», сформулируем следующие заключительные положения. Сухая жаркая погода создает благоприятные условия для возникновения и распространения огня, под влиянием ветра увеличивается скорость распространения существующих пожаров и возможно возникновение новых очагов путем переноса горящих частиц. В дневное время влажность воздуха ниже, что способствует горению деревьев, сухой травы и кустарника, в связи с этим в ночное время необходимо приложить максимальные усилия для тушения (ограничения распространения) и локализации пожаров, которые вышли из-под контроля в дневное время. Исследование влияния времени года на распространение лесных пожаров свидетельствует о том, что весенне-летние низовые пожары более устойчивые.

Выводы

В рамках данного исследования рассмотрены особенности расчетного мониторинга объектов размещения отходов на примере полигонов твердых отходов, основанного на использовании современных информационных технологий, программных комплексов имитационного моделирования диффузии загрязняющих веществ в средах и других методов математического и статического анализа, построенных на вероятностных и стохастических связках [11]. Моделирование развития различных чрезвычайных ситуаций (взрывов и пожаров) на объектах размещения отходов обеспечивает своевременное выявление зон с показателями индивидуального риска, превышающими допустимые значения планирование превентивных мероприятий по эффективной защите территорий субъектов Российской Федерации, а также позволяет сформулировать методические рекомендации, направленные на снижение экологической и пожарной опасности объектов размещения отходов.

Список литературы

1. Грибанова Л. П., Гудкова В.Н. Экологическая реабилитация в зонах влияния полигонов // Твердые бытовые отходы. 2008. № 9. С. 18–23.

2. Попов В.М., Кирильчук И.О., Коровина А.Ю. Совершенствование системы комплексного мониторинга полигонов твердых коммунальных отходов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 4 (25). С. 60–71.

3. Ерошина Д. М., Ходин В. В. Факторы экологических рисков от полигонов // Твёрдые бытовые отходы. 2009. № 8. С. 31–35.

4. Рябов Ю. В. Разработка универсальной методики расчета экологического риска возникновения пожара на несанкционированных свалках. Геоконкурс GIS – LAB. М., 2011.

5. Кирильчук И. О., Шульга Л. В., Барков А. Н. Миграция и трансформация загрязняющих веществ в окружающей среде: учебное пособие. Курск, 2016. 158 с.

6. Кирильчук И.О. Геоинформационные технологии как инструмент комплексного информационно-аналитического обеспечения процессов управления отходами // Актуальные вопросы науки, технологии и производства: сб. VII международная научно-практическая конференция. - Международный союз ученых "Наука. Технологии. Производство", 2015. С. 93–96.

7. Мониторинг загрязнений твердыми бытовыми отходами городской среды посредством информационно-телекоммуникационных технологий / В. В. Юшин, В. В. Зотов, И. О. Рыкунова, Е. А. Преликова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2011. № 2. С. 87–94.

8. Кирильчук И.О., Попов В.М., Юшин В.В. Основные подходы к разработке и построению автоматизированных информационно-аналитических систем управления отходами // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2016. № 1 (18). С. 85–90.

9. Попов В. М., Кирильчук И. О., Юшин В. В. Использование геоинформационных технологий в системе управления охраны окружающей среды // Известия Юго-Западного государственного университета. 2009. № 1(26). С. 86–90.

10. Kirilchuk I.O., Rykunova V.L. Implementation of health risk concept into eco-economic safety system. International multidisciplinary scientific conference on social sciences and arts SGEM 2015: Conference proceedings. Book 1. Psychology and psychiatry, sociology and healthcare, education. Vol. 1. Bulgaria: STEF92 Technology Ltd, 2015. P. 583–588.

11. Информационные технологии в охране окружающей среды / И. О. Кирильчук, В. М. Попов, В. В. Юшин, В. В. Протасов. Курск, 2015. 219 с.

Поступила в редакцию 27.03.2019
Подписана в печать 15.04.2019

Reference

1. Gribanova L. P., Gudkova V.N. Ekologicheskaya reabilitatsiya v zonakh vliyaniya poligonov. *Tverdye bytovye otkhody*, 2008, no. 9, pp. 18–23 (In Russ.).

2. Popov V. M., Kiril'chuk I. O., Korovina A. Yu. Sovershenstvovanie sistemy kompleksnogo monitoringa poligonov tverdykh kommunal'nykh otkhodov. *Izvestiya Yugo-*

Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series Engineering and Technologies, 2017, vol. 7, no. 4 (25), pp. 60–71 (In Russ.).

3. Eroshina D. M., Khodin V. V. Faktory ekologicheskikh riskov ot poligonov. *Tverdye bytovye otkhody*, 2009, no. 8, pp. 31–35 (In Russ.).

4. Ryabov Yu. V. Razrabotka universal'noi metodiki rascheta ekologicheskogo riska vozniknoveniya pozhara na nesanktsionirovannykh svalkakh. Geokonkurs GIS – LAB. Moscow, 2011 (In Russ.).

5. Kiril'chuk I. O., Shul'ga L. V., Barkov A. N. Migratsiya i transformatsiya zagryaznyayushchikh veshchestv v okruzhayushchei srede. Kursk, 2016. 158 p. (In Russ.).

6. Kiril'chuk I.O. Geoinformatsionnye tekhnologii kak instrument kompleksnogo informatsionno-analiticheskogo obespecheniya protsessov upravleniya otkhodami. Aktual'nye voprosy nauki, tekhnologii i proizvodstva. Sb. VII mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. - Mezhdunarodnyi soyuz uchenykh "Nauka. Tekhnologii. Proizvodstvo", 2015, pp. 93–96 (In Russ.).

7. Yushin V. V., Zotov V. V., Rykunova I. O., Prelikova E. A. Monitoring zagryaznenii tverdymi bytovymi otkhodami gorodskoi sredy posredstvom informatsionno-telekommunikatsionnykh tekhnologii. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudar-stvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series Engineering and Technologies*, 2011, no. 2, pp. 87–94 (In Russ.).

8. Kiril'chuk I. O., Popov V. M., Yushin V. V. Osnovnye podkhody k razrabotke i postroeniyu avtomatizirovannykh informatsionno-analiticheskikh sistem upravleniya otkhodami. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2016, no. 1 (18), pp. 85–90 (In Russ.).

9. Popov V. M., Kiril'chuk I. O., Yushin V. V. Ispol'zovanie geoinformatsionnykh tekhnologii v sisteme upravleniya okhrany okruzhayushchei sredy. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2009, no. 1(26), pp. 86–90 (In Russ.).

10. Kirilchuk I. O., Rykunova V. L. Implementation of health risk concept into eco-economic safety system. International multidisciplinary scientific conference on social sciences and arts SGEM 2015: Conference proceedings. Book 1. Psychology and psychiatry, sociology and healthcare, education. Vol. 1. Bulgaria: STEF92 Technology Ltd, 2015, pp. 583–588.

11. Kiril'chuk I. O., Popov V. M., Yushin V. V., Protasov V. V. Informatsionnye tekhnologii v okhrane okruzhayushchei sredy. Kursk, 2015, 219 p. (In Russ.).

Received 27.03.2019

Accepted 15.04.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Ираида Олеговна Кирильчук,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: iraida585@mail.ru

Василий Валерьевич Юшин, кандидат технических наук, заведующий кафедрой охраны труда и окружающей среды, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: ushinvv@mail.ru

Марина Владимировна Коткина, аспирант,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени
М. В. Ломоносова», г. Архангельск Российская Федерация,
e-mail: m.kotkina@narfu.ru

Iraida O. Kirilchuk, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Southwest State University, Kursk,
Russian Federation
e-mail: iraida585@mail.ru

Vasiliy V. Yushin, Candidate of Engineering Sciences,
head of the department of labor and environmental protection, Southwest State University, Kursk,
Russian Federation,
e-mail: ushinvv@mail.ru

Marina V. Kotkina, PhD student, NARFU
Arkhangelsk Russian Federation,
e-mail: m.kotkina@narfu.ru

УДК 57.087

Метод прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний по энергетическому разбалансу меридианных структур организма

Н. А. Кореневский[1] ✉, И. Ю. Григоров[2], К. В. Разумова[1]

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Российская Федерация, 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

[2] ОБПУ «Курский автотехнический колледж», Российская Федерация, 305007, г. Курск, ул. Энгельса, 144А

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Резюме

Цель исследования *– повышение качества прогнозирования ранней и дифференциальной диагностики профессиональных заболеваний, провоцируемых вредными производственными условиями.*

Методы*. Поскольку основным источником информации в прогностических и диагностических моделях принятия решений являются величины энергетического разбаланса меридианных структур организма, в качестве теоретических основ выбрана теория биофизики акупунктуры в сочетании с методологией синтеза гибридных нечетких решающих правил. Энергетический разбаланс определяется по величине отклонения электрического сопротивления меридианных биологически активных точек от своего номинального значения.*

Результаты*. Выбранные источник информации и метод синтеза гибридных нечетких моделей прогнозирования, ранней и дифференциальной диагностики профзаболеваний апробирован на решении задачи прогнозирования появления и развития заболеваний желудочно-кишечного тракта у рабочих гальванических цехов, где ядовитые газовые и пылевые компоненты сочетаются с индивидуальными факторами риска.*

В ходе математического моделирования и экспертного оценивания было показано, что полученная прогностическая модель, использующая только энергетические характеристики биологически активных точек, «связанных» с желудком, обеспечивает уверенность в прогнозе появления и развития заболеваний желудочно-кишечного тракта на уровне 0,6.

Если этот показатель использовать совместно с индивидуальными факторами риска прогностическая уверенность превышает величину 0,9, что является хорошим результатом для медицинских прогностических задач.

Заключение*. На примере прогнозирования заболеваний желудочного тракта у работников гальванических цехов получена нечеткая математическая модель, обеспечивающая уверенность в принятиях решений на уровне 0,6 только по величине энергетического разбаланса биологически активных точек меридиана желудка. При использовании индивидуальных факторов риска в качестве допол-нительных информативных признаков прогностическая уверенность превышает величину 0,9.*

Ключевые слова*: метод; математическая модель; энергетические характеристики биологически активных точек; прогнозирование; профессиональные заболевания; желудочно-кишечный тракт.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

© Кореневский Н. А., Григоров И. Ю., Разумова К. В., 2019

Для цитирования: Кореневский Н. А., Григоров И. Ю., Разумова К. В. Метод прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний по энергетическому разбалансу меридианных структур организма // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 2. С. 75–90.

UDC 57.087

Method for Predicting and Diagnostics of Professional Diseases on Energetic Balance of Meridian Structures of the Organism

N. A. Korenevsky[1] ✉, I. Yu. Grigorov[2], K. V. Razumova[1]

[1] Southwest State University, 94, 50 Let Oktyabrya str., Kursk, 305040, Russian Federation

[2] Kursk State Technical College, 144A, Энгельса str., Kursk, 305007, Russian Federation

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. *The aim of the work is to improve the quality of prediction of early and differential diagnosis of occupational diseases provoked by harmful production conditions.*

Methods. *Since the main source of information in prognostic and diagnostic models of decision making is the magnitude of the energy imbalance of the meridian structures of the body, the theory of biophysics of acupuncture combined with the methodology of hybrid fuzzy decision rules has been chosen as the theoretical basis. Energy imbalance is determined by the magnitude of the deviation of the electrical resistance of the meridian biologically active points from its nominal value.*

Results. *The selected source of information and the method for the synthesis of hybrid fuzzy models for predicting, early and differential diagnostics of occupational diseases were tested on the task of predicting the occurrence and development of diseases of the gastrointestinal tract in working electroplating plants where toxic gas and dust components are combined with individual risk factors.*

In the course of mathematical modeling and expert assessment, it was shown that the prognostic model obtained using only the energy characteristics of the biologically active points "associated" with the stomach provides confidence in the prediction of the onset and development of diseases of the gastrointestinal tract at 0.6.

If this indicator is used together with individual risk factors, predictive confidence exceeds the value of 0.9, which is a good result for medical prognostic tasks.

Conclusion. *Using the example of forecasting diseases of the gastric tract in workers of electroplating plants, a fuzzy mathematical model was obtained that provides confidence in decision making at the level of 0.6 only in terms of the energy imbalance of the biologically active points of the meridian of the stomach. When using individual risk factors as additional informative features, predictive confidence exceeds the value of 0.9.*

Keywords: *method; mathematical model; energy characteristics of biologically active points; forecasting; occupational diseases; gastrointestinal tract.*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Korenevsky N. A., Grigorov I. Yu., Razumova K. V. Method for Predicting and Diagnostics of Professional Diseases on Energetic Balance of Meridian Structures of the Organism. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie*

= *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, 9(2): 75–90 (in Russ.).

***

Введение

Многочисленные исследования, проводимые в России и за рубежом, показали, что для целого ряда медицинских задач в качестве информативных признаков целесообразно использовать биологически активные точки, являющиеся составной частью меридианных структур организма [1–8].

В рамках общей теории биофизики акупунктуры, разработанной на кафедре биомедицинской инженерии Юго-Западного государственного университета, предложен метод синтеза гибридных нечётких решающих правил прогнозирования и диагностики заболеваний по электрическим характеристикам биологически активных точек (БАТ) [1–4].

Этот метод основан на том, что для каждого типа решаемых задач эксперты определяют множество функций принадлежности по всем выбранным информативным БАТ, что является достаточно сложной задачей даже для специально обученных людей.

При этом, каждый раз, когда меняется условие задачи, возникает необходимость корректировать или полностью изменять используемые наборы функций принадлежности. Особенностью решения задач прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний является то, что при синтезе соответствующих решающих правил в качестве экспертов необходимо привлекать врачей профпатологов совместно с врачами-специалистами по заболеваниям, провоцируемым производственной деятельностью.

Если в качестве информативных признаков используются энергетические характеристики БАТ, то в состав экспертной группы должны входить специалисты в области биофизики акупунктуры и рефлексотерапии, обученные работе с нечеткой технологией принятия решений.

Проведенными нами исследованиями было установлено, что за приемлемое время не удается собрать и обучить экспертную группу разнородных специалистов, обеспечивающих приемлемую согласованность действий (по коэффициент конкордации w не менее 0,8).

В то же время, если разделить функцию специалистов в области биофизики акупунктуры и рефлексотерапии и врачей-специалистов, взаимодействующих с профпатологами, и привлекать их для решения «своих» специфических задач, то каждая из этих двух групп становится способной к решению задач синтеза искомых нечетких моделей принятия решений с требуемыми показателями качества.

При этом задача объединения моделей, полученных двумя группами экспертов, достаточно легко решается в рамках известной методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил.

Методы исследования

Основное отличие прилагаемого метода от описанных в известной литературе состоит в том, что определяется величина энергетического разбаланса того списка БАТ, который относится к исследуемому органу и (или) системе. Эта задача решается с привлечением экспертов в области биофизики акупунктуры и рефлексотерапии. Далее величина энергетического разбаланса ERs для органа (системы) с идентификатором s определяется как базовая переменная для функции принадлежности $\mu_\ell\left(ER_s\right)$ к исследуемой патологии. Эта задача решается с привлечением экспертов в составе врачей-специалистов и профпатологов. Таким образом, для определения уверенности $U_{\ell r}$ в принятии решения по патологии ω_ℓ для задачи r (r=п – прогноз, r=р – ранняя стадия заболевания; r=д – дифференциальный диагноз) используется две модели:

$$ER_s = F_E\left(EY_{sj}\right); \quad (1)$$

$$U_{\ell r} = \mu_{\ell r}\left(ER_s\right), \quad (2)$$

где EY_{sj} – энергетический разбаланс БАТ с именем Y_{sj} выбранные как информативные по органу (системе) s.

При выборе модели оценки величины энергетического разбаланса целесообразно использовать рекомендации работ [1, 2, 3, 4], посвященных синтезу нечетких моделей принятия решений по величине отклонений сопротивлений БАТ от их номинальных значений.

В соответствии с этими рекомендациями формируется экспертная группа (в соответствии с рекомендациями квалиметрии не менее 7 человек) из специалистов в области биофизики акупунктуры и рефлексотерапевтов, которые получают подготовку в области синтеза нечетких решающих правил по энергетической реакции БАТ. На тестовых задачах оценивается их коэффициент конкордации W. Если он ниже 0,8, то производится коррекция состава группы с их дообучением. Если $W \geq 0{,}8$, то эксперты решают задачу синтеза решающего правила (1).

С учетом рекомендаций [1, 2, 3, 4, 9] эту задачу предлагается решать следующим образом.

По общепринятым атласам меридиан, например [10] определяются списки БАТ, «имеющих связи» с органами и системами с высоким риском поражения в результате профессиональной деятельности обследуемых. Если имеется возможность по получению обучающей выборки производится оценка информативности отобранных БАТ по Кульбаку с формированием списка информативных точек, который уточняется с

учетом технологичности изменений их электрических характеристик [1–4].

Из списка информативных БАТ с использованием алгоритма, описанного в работах [2, 3, 4] выбирается группа диагностически значимых точек (ДЗТ), которые характеризуются тем, что одновременный выход сопротивлений БАТ за рамки установленных пределов (порогов) однозначно свидетельствует о нарушении энергетического баланса в структуре исследуемых органов (систем).

Условие энергетического разбаланса с выходом на расчет его уровня ERs определяется выражением

$$\begin{aligned} &ЕСЛИ\ \left[\left(\delta R_{Y1}^{D} > \delta R^{П}\right) И\ \left(\delta R_{Y2}^{D} > \delta R^{П}\right),\ldots\left(\delta R_{Ymx}^{D} > \delta R^{П}\right)\right], \\ &ТО\ \left[ER_s = F_E\left(EY_j\right)\right],\ ИНАЧЕ\ \left(ER_s = 0\right), \end{aligned} \tag{3}$$

где $\delta R_{Y_j}^{D}$ – величина относительного отклонения сопротивления R_{Y_j} из списка ДЗТ от своего номинального значения для БАТ с идентификатором Y_j; $\delta R^{П}$ – пороговое значение отклонений БАТ от номинального значения.

Исходя из величины информативности точки с номером j и (или) её функций, определенных атласом меридиан, эксперты строят графики функций $EY_j(\delta R_j)$, для которых после усреднения определяются соответствующие аналитическое выражения.

Пример типового графика $EY_j(\delta R_j)$ приведен на рис. 1.

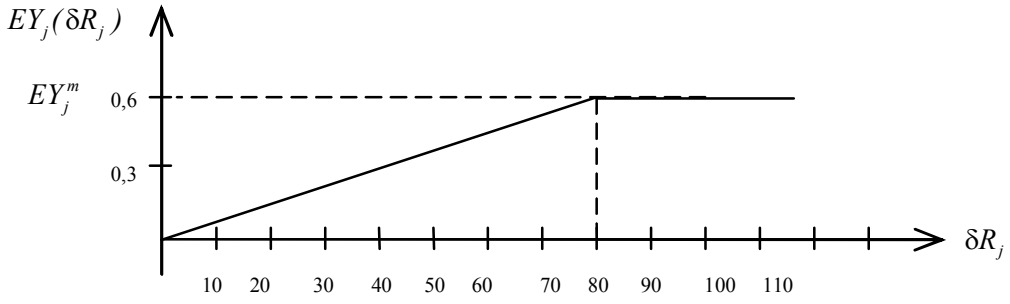


Рис. 1. Типовой график $EY_j(\delta R_j)$

Максимальные значения EY_j^m рекомендуется выбрать условия, что для всех точек из списка ДЗТ $ER_s \to 1$.

В работах [11–19, 7] в качестве агрегирующей функции FE рекомендуют выбирать модифицированную итерационную формулу Е. Шортлифа

$$\begin{aligned} &ER_S\ (j+1) = \\ &= ER_S\ (j) + EY_{J+1}\left(\delta R_{j+1}\right)\left[1 - ER_S\ (j)\right], \end{aligned} \tag{4}$$

где $ER_S\ (1) = EY_1(\delta R_1)$.

В выражении (4) область определения $EY_{J+1}\left(бR_{j+1}\right)$ лежит в интервале $\left[0, \ldots, 1\right]$.

При наличии обучающих выборок вид и параметры агрегирующих функций FE могут быть учтены с использованием нечетких модификаций теории измерения латентных переменных и (или) метода группового учета аргументов [20, 21, 15, 22, 17].

После получения выражения (1) формируется экспертная группа из врачей специалистов-профпатологов, которая изучает медико-биологические свойства параметра ERS как информативного признака в задачах синтеза нечетких решающих правил прогнозирования, ранней и дифференциальной диагностики профессиональных заболеваний ωℓ.

Согласованность действий этой экспертной группы проверяется по коэффициенту конкордации. При необходимости производится коррекция и дообучение этой группы.

Учитывая меру доверия к роли биофизики акупунктуры и пользуясь рекомендациями работ [15, 16, 17, 23] для каждой патологии определяются формы и параметры функций принадлежности $\mu_{\ell r}$ (ERS) для математической модели (8).

Для усиления меры доверия к принимаемому решению в формулу (2) целесообразно включить составляющую, позволяющую учитывать динамику энергетического разбаланса в соответствии со следующей логикой. Если величина энергетического разбаланса уменьшается, то уверенность в принимаемом решении соответствует текущему измерению, если не изменяется или растет, то уверенность в принимаемом решении в пользу класса ωℓ увеличивается пропорционально росту энергетического разбаланса.

Такая логика реализуется выражением

$$U_{\ell_r}\left(t\right)=\begin{cases}U_{\ell_r}\left(t\right), \text{ если } \Delta ER_s^T>0;\\ U_{\ell_r}\left(t\right)+\mu_{\ell_r}^T\left(\Delta ER_s^T\right)-U_{\ell_r}\left(t\right)\cdot\mu_{\ell r}^T\left(\Delta ER_s^T\right), \text{ если } \Delta ER_s^T\le 0,\end{cases} \quad (5)$$

где $U_{\ell_r}\left(t\right)$ – величина уверенности в гипотезе ωℓ по задаче r в текущей момент времени; $\Delta ER_s^T=ER_s^T\left(t\right)-ER_s^T\left(t-1\right)$; $ER_s^T\left(t\right)$ – величина энергетического разбаланса в текущий момент времени; $ER_s^T\left(t-1\right)$ – величина энергетического разбаланса в предыдущем измерении; $\mu_{\ell r}^T\left(\Delta ER_s^T\right)$ – функция принадлежности к классу ωℓ по задаче r с базовой переменной по величине растущего энергетического разбаланса.

Величину времени повторного контроля ER_s^T и параметры дополнительной функции принадлежности определяют эксперты исходя из максимально-

го доверия к информативной ценности БАТ.

Дальнейшее увеличение доверия к показателю $U_{\ell r}$ достигается учетом динамики энергетического разбаланса при использовании дозированной нагрузки.

В работе [15] в качестве дозированной нагрузки предлагается использовать физические нагрузки или нарушение естественного «электрического тока» меридиан путем подачи на его точки электрического напряжения, создающего «противоток» меридианной энергетике.

С учетом динамики энергетического разбаланса от воздействия стандартной нагрузки уверенность в принимаемом решении определяется выражением

$$U_{\ell r}(t)=\begin{cases} U_{\ell r}(t)+\mu_{\ell r}^{N}\left(ER_s^N\right)-f_{\ell r}\left(\Delta ER_s^N\right), & \text{если } \Delta N>0; \\ U_{\ell r}(t), & \text{если } \Delta N\le 0; \end{cases} \quad (6)$$

где $\mu_{\ell_r}^{N}\left(ER_s^N\right)$ – функция принадлежности к классу ωℓ по задаче r по базовой переменной ER_s^N; ER_s^N – величина энергетического разбаланса сразу после действия нагрузки; $f_{\ell r}\left(\Delta ER_s^N\right)$ – функция корректировки для $U_{\ell r}(t)$ от динамики возвращения ER_s^N к исходному состоянию ER_s (до загрузки) с областью определения [0,…,1]; $\Delta ER_s^N = ER_s^N - ER_s^D$; ER_s^D – энергетический разбаланс через фиксированное время TF после снятия нагрузки; $\Delta N=\mu_{\ell_r}^{N}\left(ER_s^N\right)-f_{\ell_r}\left(\Delta ER_s^N\right)$.

В практических приложениях решение о прогнозе или диагнозе только по энергетической реакции БАТ принимается достаточно редко из-за недостатка доверия экспертов к рефлексодиагностике и отсутствия «сильной» доказательной базы в биофизике акупунктуры.

Поэтому на практике оценка уверенности в ωℓ по задаче r, полученная только по энергетической реакции БАТ, чаще всего рассматривается как руководство к дальнейшим действиям.

В профпотологии эта оценка может рассматриваться как рекомендация по профотбору, поскольку может быть использована для обнаружения «слабых звеньев» в организме человека, которые могут привести к ухудшению состояния здоровья, если в профессиональной деятельности имеются предпосылки для дальнейшего разрушения этих «звеньев».

В условиях производственной деятельности по энергетический реакции БАТ можно сделать вывод о динамике состояния здоровья с целью своевременного проведения профилактических и лечебных мероприятий вплоть до смены места работы.

В задачах диспансеризации показатель $U_{\ell r}$ может быть использован как

индикатор направления на дополнительное обследование и далее использоваться как один из информативных признаков.

В последнем варианте показатель $U_{\ell r}$ используется в синтезе надежных решающих правил с использованием методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил [7, 11–19].

Результаты и их обсуждение

Одной из патологий, провоцируемых в гальванических цехах, является заболевание желудочно-кишечного тракта [9, 24–32]. Анализ атласа меридиан [10] показал, что с заболеваниями желудочно-кишечного тракта связано достаточно много точек. Для решения задачи оценки появления и развития заболеваний желудочно-кишечного у работников гальванического цеха эксперты отобрали следующий их набор: точки, связанные с меридианом желудка (E1, …, E45), сочувственную точку меридиана желудка V21, точки уха AP85,…, AP89, AP91.

Наблюдения за изменением состояния пациентов осуществлялись в течение года. В исследуемые группы включались люди с повышенными энергетическими характеристиками главных точек меридиана желудка. Контроль за энергетическими характеристиками БАТ производился ежемесячно. Люди, у которых наблюдался хотя бы небольшой рост электродвижущей силы главных БАТ (более 10% от номинального значения) без проведения лечебно-оздоровительных мероприятий, относились к классу пациентов с высоким риском возникновения и развития патологии. По мнению экспертов и данным объективных исследований, проводимых по контрольным диагностическим программам [15, 17], в конце годичного наблюдения у 94% отобранных испытуемых были отмечены начальные клинические проявления заболеваний желудочно-кишечного тракта.

На первом этапе исследований по всем классам заболеваний определялась информативная мера Кульбака с системой градаций признаков, обоснованных в работах [33, 23]. Результаты расчетов при изменении сопротивлений БАТ приведены в таблице (измерения проводились на переменном токе частотой 1кГц при силе тока 2мА).

В эту таблицу вошли БАТ, имеющие значение меры информативности не менее 300, причем значения информативности умножались на коэффициент пропорциональности аналогично тому, как это было сделано в работе [33].

Из выбранного набора признаков в список ДЗТ вошли точки E21 и E22, точку AP87 эксперты исключили из списка информативных БАТ ввиду сложности проведения измерительных процедур.

Расчёт информативности по Кульбаку

БАТ	Диапазон	Градация	Информативность
E21	0…99	5	705
	100…149	4	
	150…200	3	
	201…250	2	
	≥250	1	
E22	0…99	5	645
	100…149	4	
	150…200	3	
	201…250	2	
	≥250	1	
E23	0…99	5	525
	100…149	4	
	150…200	3	
	201…250	2	
	≥250	1	
E36	0…99	5	310
	100…149	4	
	150…200	3	
	201…250	2	
	≥250	1	
AP87	0…99	5	650
	100…149	4	
	150…200	3	
	201…250	2	
	≥250	1	

С учётом (3) и (4) величина энергетического разбаланса определяется выражением:

$$ЕСЛИ\left[\left(\delta R_{E21} > 15\%\right) И \left(\delta R_{E22} > 15\%\right)\right],$$
$$ТО\left[ER_{Ж} = F_E\left(EY_j\right)\right],$$
$$ИНАЧЕ\left(ER_{Ж} = 0\right),$$

$$F_E(EY_j) = ER_{ж}(j+1) =$$
$$= ER_{ж}(j) + EY_{j+1}(\delta R_{j+1})\left[1 - ER_{ж}(j)\right],$$

где $ER_{ж}(1) = EY_1(\delta R_{E21}); EY_2(\delta R_{E22});$
$EY_3(\delta R_{E23}); EY_4(\delta R_{E36}).$

График функции принадлежности к классу прогноз появления и развития заболеваний желудочно-кишечного тракта $\omega_{ЖП}$ приведен на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2 эксперты определили уверенность в появлении и развитии заболеваний желудочно-кишечного тракта на уровне 0,6.

Если этот показатель использовать совместно с индивидуальными факторами риска в модели, описанной в работе [34] прогностическая уверенность превышает величину 0,9, что является хорошим результатом для медицинских прогностических задач.

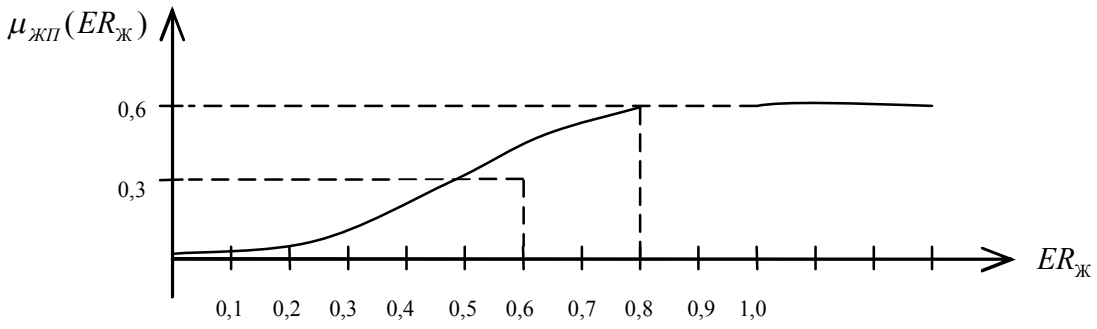


Рис. 2. График функции принадлежности к классу $\omega_{ЖП}$

Заключение

В работе предлагается метод синтеза нечетких решающих правил для решения задач прогнозирования, ранней и дифференциальной диагностики профессиональных заболеваний по величине энергетического разбаланса меридианных структур организма.

На примере прогнозирования заболеваний желудочного тракта у работников гальванических цехов получена нечеткая математическая модель, обеспечивающая уверенность в принятиях решений на уровне 0,6 только по величине энергетического разбаланса биологически активных точек меридиан желудка. При использовании индивидуальных факторов риска в качестве дополнительных информативных признаков прогностическая уверенность превышает величину 0,9.

Список литературы

1. Кореневский Н. А., Буняев В. В., Яцун С. М. Компьютерные системы ранней диагностики состояния организма методами рефлексологии: монография. Новочеркасск: Ред. Журнал «Изв. Вузов. Электромеханика», 2003. 206 с.

2. Кореневский Н. А., Лазурина Л. П. Энергоинформационные модели рефлексодиагностики. Курск: ОМЦП, 2000. 177 с.

3. Кореневский Н. А., Крупчатников Р. А. Инфомационно-интеллектуальные технологии в рефлексодиагностике и рефлексотерапии:монография. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 528 с.

4. Кореневский Н. А., Крупчатников Р. А., Аль-Касасбех Р. Т. Теоретические основы биофизики акупунктуры с приложениями в медицине, психологии и экологии на основе нечетких сетевых моделей. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 528 с.

5. Prediction and prenosological diagnostics of heart diseases based on energy characteristics of acupuncture points and fuzzy logic / R. Al-Kasasbeh, N. Korenevskiy, F. Ionescu,

M. Alshamasin, A. Kuzmin // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2012. No 15. P. 681–689.

6. Synthesis of fuzzy logic for prediction and medical diagnostics by energy characteristics of acupuncture points / R. Al-Kasasbeh, N. Korenevskiy, F. Ionescu, M. Alshamasin, A. Kuzmin // Acupunct Meridian Stud. 2011. P. 175–182.

7. Korenevskiy N. A., Gorbatenko S. A. Generation of fuzzy network models taught on basic of data structure for medical expert systems // Journal Biomedical Engineering. Vol. 42, № 2. P. 67–72.

8. Prediction of gastric ulcers based on the change in electrical resistance of acupuncture points using fuzzy logic decision-making / N. A. Korenevskiy, R. T. Al-Kasasbeh, M. Alshamasin, F. Ionescou, A. Smith // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2013. Vol. 16, is. 3. P. 302–313.

9. Гадалов В. Н., Кореневский Н. А., Снопков В. Н. Математические модели рефлекторных систем организма человека и их использование для прогнозирования и диагностики заболеваний // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2012. Т. 11, № 2. С. 515–521.

10. Гаваа Лувсан. Очерк методов восточной рефлексотерапии. 3-е изд., перераб. и доп. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1991. 432 с.

11. Кореневский Н. А. Метод синтеза гетерогенных нечетких правил для анализа и управления состоянием биотехнических систем // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 2. С. 99–103.

12. Кореневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1. С. 33–35.

13. Кореневский Н. А. Проектирование систем принятия решений на нечетких сетевых моделях в задачах медицинской диагностики и прогнозирования // Телекоммуникации. 2006. № 6. С. 25–31.

14. Кореневский Н. А., Разумова К. В. Синтез коллективов гибридных нечетких моделей оценки состояния сложных систем // Наукоемкие технологии. 2014. Т. 15, № 12. С. 31–39.

15. Кореневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.

16. Кореневский Н. А., Рябкова Е. Б.Метод синтеза нечетких решающих правил по информации с геометрической структуре многомерных данных // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7, № 8. С. 128–137.

17. Оценка и управление состоянием здоровья обучающихся на основе гибридных интеллектуальных технологий: монография / Н. А. Кореневский, А. Н. Шуткин, С. А. Горбатенко, В. И. Серебровский. Старый Оскол: ТНТ, 2016. 472 с.

18. Шуткин А. Н., Кореневская С. Н., Федянин В. В. Проектирование баз знаний медицинских экспертных систем с использованием коллективов нечетких правил // Информационные проекты в медицине и педагогике. Материалы международной научно-практической конференции. 2014. С. 61–64.

19. Synthesis of combined fuzzy decision rules based on the exploration analysis data / R. T. Al-Kasabeh, N. A. Korenevskiy, F. Ionescu, A. A. Kuzmin // Proc. 4th IAFA Intern. Conference Interdisciplinary Approaches in Fractal Analysis. Bucharest, May 26-29, 2009. P. 71–78.

20. Бойцов А. В., Лазурина Л. П., Кореневская С. Н., Шуткин А. Н. Применение теории измерения латентных переменных для формирования пространства информативных признаков в задачах оценки функционального состояния человека // Известия Юго-Западного государственного университета. 2014. № 6 (57). С. 52–58.

21. Метод синтеза нечетких решающих правил на основе моделей системных взаимосвязей для решения задач прогнозирования и диагностики заболеваний / Н. А. Кореневский, М. В. Артеменко, В. Я. Провоторов, Л. А. Новикова // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2014. Т. 13, № 4. С. 881–886.

22. Кореневский Н. А., Шуткин А. Н., Бойцова Е. А. Оценка и управление состоянием здоровья на основе моделей Г. Раша // Медицинская техника. 2015. № 6. С. 37–40.

23. Портнов Ф. П., Лисина Г. Н. Некоторые биофизические параметры биологически активных точек в норме и при заболеваниях сердечно-сосудистой системы. Горький: Иглорефлексотерапия, 1974. С. 66–68.

24. Гальванотехника. Справочное издание / Ф. Ф. Ажогин, М. А. Беленький, Ч. В. Гальев [и др.]. М.: Металлургия, 1987.

25. Виноградов С. С. Организация гальванического производства. М.: Глобус, 2005.

26. Гераськова С. Е., Гаршин В. И. Статистические данные профзаболеваний в гальваническом производстве // Новая наука: Опыт, Традиции, Инновации: междунар. научное период. изд. по итогам Междунар. научн.-практич. конф. (24 марта 2016 г., г. Омск): в 2 ч. Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2016. Ч. 2.

27. Глебова Е. В. Производственная санитария и гигиена труда. М., 2005.

28. Профессиональный риск для здоровья работников / под ред. Н. Ф. Измеров. Э. И. Денисова. М.: Тровант, 2003. 400 с.

29. Р 2.2.1766-03. 2.2. Гигиена труда. Руководство по оценке профессионального риска для здоровья работников. Организационно-методические основы, принципы и критерии оценки. Руководство (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 24.06.2003). Введ. 2003-11-01. М.: Изд-во стандартов, 2003. 105 с.

30. Р 2.2.2006-05 Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. Введ 2005-11-01. М.: Изд-во стандартов, 2005. 133 с.

31. Р 2.1.10. 1920-04 Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. Введ. 2004-03-05. М.: Изд-во стандартов, 2004. 144 с.

32. Филь Е. С., Терентьев И. А. Вопросы охраны труда работников гальванических цехов // Молодой ученый. 2016. N918. 1. С. 32–35. URL: https://moluch.ru/archive/122/33780/ (дата обращения: 15.04.2019).

33. Портнов Ф. П. Электропунктурная рефлексотерапия. Рига: Зинатне, 1980. 245 с.

34. Прогнозирование и диагностика заболеваний, вызываемых вредными производственными и экологическими факторами на основе гетерогенных моделей / Н. А. Кореневский, Н. А. Серебровский, В. И. Коптева, Н. А. Говорухина. Курск, 2012. 231 с.

Поступила в редакцию 06.02.2019
Подписана в печать 20.03.2019

Reference

1. Korenevskii N. A., Bunyaev V. V., Yatsun S. M. Komp'yuternye sistemy rannei diagnostiki sostoyaniya organizma metodami refleksologii. Novocherkassk, 2003, 206 p. (In Russ.).

2. Korenevskii N. A., Lazurina L. P. Energoinformatsionnye modeli refleksodiagnostiki. Kursk, OMTsP Publ., 2000, 177 p. (In Russ.).

3. Korenevskii N. A., Krupchatnikov R. A. Infomatsionno-intelektual'nye tekhnologii v refleksodiagnostike i refleksoterapii. Staryi Oskol, TNT Publ., 2013, 528 p. (In Russ.).

4. Korenevskii N. A., Krupchatnikov R. A., Al'-Kasasbekh R. T. Teoreticheskie osnovy biofiziki akupunktury s prilozheniyami v meditsine, psikhologii i ekologii na osnove nechetkikh setevykh modelei. Staryi Oskol, TNT Publ., 2013, 528 p. (In Russ.).

5. R. Al-Kasasbeh, Korenevskiy N., Ionescu F., Alshamasin M., Kuzmin A. Prediction and prenosological diagnostics of heart diseases based on energy characteristics of acupunc-

ture points and fuzzy logic. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2012, no. 15, pp. 681–689.

6. R. Al-Kasasbeh, Korenevskiy N., Ionescu F., Alshamasin M., Kuzmin A. Synthesis of fuzzy logic for prediction and medical diagnostics by energy characteristics of acupuncture points. *Acupunct Meridian Stud*, 2011, pp. 175–182.

7. Korenevskiy N. A., Gorbatenko S. A. Generation of fuzzy network models taught on basic of data structure for medical expert systems. *Journal Biomedical Engineering*, vol. 42, no. 2, pp. 67–72.

8. Korenevskiy N. A., Al-Kasasbeh R. T., Alshamasin M., Ionescou F., Smith A. Prediction of gastric ulcers based on the change in electrical resistance of acupuncture points using fuzzy logic decision-making. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2013, vol. 16, is. 3, pp. 302–313.

9. Gadalov V. N., Korenevskii N. A., Snopkov V. N. Matematicheskie modeli reflektornykh sistem organizma cheloveka i ikh ispol'zovanie dlya prognozirovaniya i diagnostiki zabolevanii. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh*, 2012, vol. 11, no. 2, pp. 515–521 (In Russ.).

10. Gavaa Luvsan. Ocherk metodov vostochnoi refleksoterapii. Novosibirsk, Nauka, Sib. otd-nie Publ., 1991, 432 p. (In Russ.).

11. Korenevskii N. A. Metod sinteza geterogennykh nechetkikh pravil dlya analiza i upravleniya sostoyaniem biotekhnicheskikh system. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2013, no. 2, pp. 99–103 (In Russ.).

12. Korenevskii N. A. Ispol'zovanie nechetkoi logiki prinyatiya reshenii dlya meditsinskikh ekspertnykh system. *Meditsinskaya tekhnika*, 2015, no. 1, pp. 33–35 (In Russ.).

13. Korenevskii N. A. Proektirovanie sistem prinyatiya reshenii na nechetkikh setevykh modelyakh v zadachakh meditsinskoi diagnostiki i prognozirovaniya. *Telekommunikatsii*, 2006, no. 6, pp. 25–31 (In Russ.).

14. Korenevskii N. A., Razumova K. V. Sintez kollektivov gibridnykh nechetkikh modelei otsenki sostoyaniya slozhnykh system. *Naukoemkie tekhnologii*, 2014, vol. 15, no. 12, pp. 31–39 (In Russ.).

15. Korenevskii N. A., Rodionova S. N., Khripina I. I. Metodologiya sinteza gibridnykh nechetkikh reshayushchikh pravil dlya meditsinskikh intellektual'nykh sistem podderzhki prinyatiya reshenii. Staryi Oskol, TNT Publ., 2019, 472 p. (In Russ.).

16. Korenevskii N. A., Ryabkova E. B.Metod sinteza nechetkikh reshayushchikh pravil po informatsii s geometricheskoi strukture mnogomernykh dannykh. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 7, no. 8, pp. 128–137 (In Russ.).

17. Korenevskii N. A., Shutkin A. N., Gorbatenko S. A., Serebrovskii V. I. Otsenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya obuchayushchikhsya na osnove gibridnykh intellektual'nykh tekhnologii. Staryi Oskol, TNT Publ., 2016, 472 p. (In Russ.).

18. Shutkin A. N., Korenevskaya S. N., Fedyanin V. V. Proektirovanie baz znanii meditsinskikh ekspertnykh sistem s ispol'zovaniem kollektivov nechetkikh pravil. Informatsionnye proekty v meditsine i pedagogike. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Moscow, 2014, pp. 61–64 (In Russ.).

19. Al-Kasabeh R. T., Korenevskiy N. A., Ionescu F., Kuzmin A. A. Synthesis of combined fuzzy decision rules based on the exploration analysis data. Proc. 4th IAFA Intern. Conference Interdisciplinary Approaches in Fractal Analysis. Bucharest, May 26-29, 2009, pp. 71–78.

20. Boitsov A. V., Lazurina L. P., Korenevskaya S. N., Shutkin A. N. Primenenie teorii izmereniya latentnykh peremennykh dlya formirovaniya prostranstva informativnykh priznakov v zadachakh otsenki funktsional'nogo sostoyaniya cheloveka. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, no. 6 (57), pp. 52–58 (In Russ.).

21. Korenevskii N. A., Artemenko M. V., Provotorov V. Ya., Novikova L. A. Metod sinteza nechetkikh reshayushchikh pravil na osnove modelei sistemnykh vzaimosvyazei dlya resheniya zadach prognozirovaniya i diagnostiki zabolevanii. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh*, 2014, vol. 13, no. 4, pp. 881–886 (In Russ.).

22. Korenevskii N. A., Shutkin A. N., Boitsova E. A. Otsenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya na osnove modelei G. Rasha. *Meditsinskaya tekhnika*, 2015, no. 6, pp. 37–40 (In Russ.).

23. Portnov F. P., Lisina G. N. Nekotorye biofizicheskie parametry biologicheski aktivnykh tochek v norme i pri zabolevaniyakh serdechno-sosudistoi sistemy. Gor'kii, Iglorefleksoterapiya Publ., 1974, pp. 66–68 (In Russ.).

24. Azhogin F. F., Belen'kii M. A., Gal'ev Ch. V., eds. Gal'vanotekhnika. Spravochnoe izdanie. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987 (In Russ.).

25. Vinogradov S. S. Organizatsiya gal'vanicheskogo proizvodstva. Moscow, Globus, Publ., 2005 (In Russ.).

26. Geras'kova S. E., Garshin V. I. Statisticheskie dannye profzabolevanii v gal'vanicheskom proizvodstve. Novaya nauka: Opyt, Traditsii, Innovatsii: mezhdunar. nauchnoe period. izd. po itogam Mezhdunar. nauchn.-praktich. konf. Sterlitamak, RITs AMI Publ., 2016 (In Russ.).

27. Glebova E. V. Proizvodstvennaya sanitariya i gigiena truda. Moscow, 2005 (In Russ.).

28. Professional'nyi risk dlya zdorov'ya rabotnikov, ed. by Izmerov N. F., Denisova E. I. Moscow, Trovant Publ., 2003, 400 p. (In Russ.).

29. P 2.2.1766-03. 2.2. Gigiena truda. Rukovodstvo po otsenke professional'nogo riska dlya zdorov'ya rabotnikov. Organizatsionno-metodicheskie osnovy, printsipy i kriterii otsenki. Rukovodstvo (utv. Glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom RF 24.06.2003). Vved. 2003-11-01. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2003, 105 p. (In Russ.).

30. P 2.2.2006-05 Gigiena truda. Rukovodstvo po gigienicheskoi otsenke faktorov rabochei sredy i trudovogo protsessa. Kriterii i klassifikatsiya uslovii truda. Vved 2005-11-01. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2005, 133 p. (In Russ.).

31. P 2.1.10. 1920-04 Rukovodstvo po otsenke riska dlya zdorov'ya naseleniya pri vozdeistvii khimicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchikh okruzhayushchuyu sredu. Vved. 2004-03-05. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2004, 144 p. (In Russ.).

32. Fil' E. S., Terent'ev I. A. Voprosy okhrany truda rabotnikov gal'vanicheskikh tsekhov. *Molodoi uchenyi*. 2016, no. 918, 1, pp. 32–35. URL: https://moluch.ru/archive/122/33780/ (accessed 15.04.2019) (In Russ.).

33. Portnov F. P. Elektropunkturnaya refleksoterapiya. Riga, Zinatne Publ., 1980, 245 p. (In Russ.).

34. Korenevskii N. A., Serebrovskii N. A., Kopteva V. I., Govorukhina N. A. Prognozirovanie i diagnostika zabolevanii, vyzyvaemykh vrednymi proizvodstvennymi i ekologicheskimi faktorami na osnove geterogennykh modelei. Kursk, 2012, 231 p. (In Russ.).

Received 06.02.2019
Accepted 20.03.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Николай Алексеевич Кореневский, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Nikolay A. Korenevskiy, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Игорь Юрьевич Григоров, преподаватель, ОБПУ «Курский автотехнический колледж», г. Курск, Российская Федерация

Igor' Y. Grigorov, Lecturer, OBU "Kursk auto technical College, Kursk, Russian Federation

Ксения Викторовна Разумова, программист II кат., ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Kseniya V. Razumova, Programmer II cat., Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

УДК 004.932.2

Формирование выборок клеток в системе компьютерной микроскопии для проведения исследований методов диагностики острых лимфобластных лейкозов

В. Г. Никитаев[1], А. Н. Проничев[1]✉, Е. В. Поляков[1], О. А. Чернышева[2], И. Н. Серебрякова[2], Н. Н. Тупицын[2]

[1] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Российская Федерация, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

[2] Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени Н. Н. Блохина, Российская Федерация, 115478, г. Москва, Каширское шоссе, 24

✉ e-mail kaf46@mail.ru

Резюме

Острые лейкозы являются одной из проблем современной онкологии. Одним из этапов диагностики является морфологическое исследование клеток костного мозга. Этот процесс трудоемок, выполняется посредством визуального анализа микроскопических препаратов, а результат субъективен и зависит от квалификации и опыта врача. Повысить объективность анализа может применение систем компьютерной микроскопии.

Перспективным направлением является разработка систем цифровой микроскопии на базе текстурного анализа с применением технологий искусственного интеллекта. Компьютерная микроскопия позволит повысить точность обнаружения бластных клеток на этапе диагностики острых лейкозов.

***Цель исследования** – разработка метода формирования выборки изображений клеток костного мозга для проведения исследований по выявлению фундаментальных взаимосвязей морфологических и текстурных характеристик изображений клеток с экспрессией ключевых антигенов острых лимфобластных лейкозов при первичной диагностике, в рецидиве, в ремиссии и в ходе анализа минимального числа опухолевых клеток при остаточной болезни в онкологии.*

***Методы**. Разработан метод для формирования экспериментальной выборки изображений клеток на препаратах костного мозга, основанный на цифровой обработке изображений.*

Предложенный подход был реализован в виде компьютерной программы для нанесения меток на кадры изображений и аккумулирования опыта и знаний врача-эксперта. Указанная программа ориентирована на минимизацию времени работы эксперта при нанесении разметки клеток.

***Результаты**. В результате экспериментальных исследований в реальных условиях в рамках лаборатории иммунологии гемопоэза Национального медицинского исследовательского центра онкологии имени Н. Н. Блохина была проведена разметка клеток на изображениях препаратов и сформирована база знаний изображений клеток костного мозга для начальной эталонной выборки препаратов.*

Полученная база знаний является инструментом для формирования различных экспериментальных выборок изображений клеток костного мозга.

***Заключение**. Сформированные таким образом выборки важны при разработке методов и моделей цифрового анализа изображений клеток для автоматизированной диагностики острых лейкозов.*

***Ключевые слова**: минимальная остаточная болезнь; компьютерная микроскопия; анализ изображений; распознавание.*

© Никитаев В. Г., Проничев А. Н., Поляков Е. В., Чернышева О. А., Серебрякова И. Н., Тупицын Н. Н., 2019

Благодарности: *Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-29-09115.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: Формирование выборок клеток в системе компьютерной микроскопии для проведения исследований методов диагностики острых лимфобластных лейкозов / В. Г. Никитаев, А. Н. Проничев, Е. В. Поляков, О. А. Чернышева, И. Н. Серебрякова, Н. Н. Тупицын // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 2. С. 91–100.

UDC 004.932.2

A method of Forming of Cells Samples in the Computer Microscopy System for Studies of Methods of Diagnosis of Acute Lymphoblastic Leukemia

V. G. Nikitaev[1], A. N. Pronichev[1]✉, E. V. Polyakov[1], O. A. Chernysheva[2], I. N. Serebryakova[2], N. N. Tupitsyn[2]

[1] National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Russian Federation, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31

[2] N. N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Russian Federation, 115478, Moscow, Kashirskoe shosse, 24

✉ e-mail kaf46@mail.ru

Abstract

Acute leukemia is one of the problems of modern Oncology. One of the stages of diagnosis is morphological study of bone marrow cells. This process is laborious, performed by visual analysis of microscopic specimen, and the result is subjective and depends on the qualification and experience of doctor. A promising direction is the development of digital microscopy systems based on texture analysis using artificial intelligence technologies.

The aim of work is to develop a method of forming samples of bone marrow cells for research to identify the fundamental relationships of morphological and texture characteristics of cell images with expression of key antigens of acute lymphoblastic leukemia.

The proposed approach was implemented in the form of a computer program for labeling images and accumulating the experience and knowledge of an expert physician. This program is aimed at minimizing the time of the expert in the application of cell markings.

Cell marking was carried out on images of specimens and a knowledge base of images of bone marrow cells was formed for the initial reference sample of specimens in real conditions in the laboratory of immunology hematopoiesis N. N. Blokhin National medical research center of Oncology.

The resulting knowledge base is a tool for the formation of various experimental samples of images of bone marrow cells. Thus formed samples are important in the development of methods and models of digital analysis of cell images for automated diagnosis of acute leukemia.

Keywords*: minimal residual disease; computer microscopy; image analysis; recognition.*

Acknowledgements: *This Work was performed under support of RFBR grant No. 18-29-09115.*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Nikitaev V. G., Pronichev A. N., Polyakov E. V., Chernysheva O. A., Serebryakova I. N., Tupitsyn N. N. A Method of Forming of Cells Samples in the Computer Microscopy System for Studies of Methods of Diagnosis of Acute Lymphoblastic Leukemia. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, 9(2): 91–100 (in Russ.).

***

Введение

Острые лейкозы (ОЛ) относятся к одной из ключевых проблем современной онкологии. Основой адекватной терапии является своевременная и точная диагностика не только варианта (лимфобластный / миелоидный), но и иммуноподварианта острого лимфобластного лейкоза (ОЛЛ). Основу диагностики ОЛ составляет морфо-цитохимическое и иммунологическое исследование пунктата костного мозга. Морфологическое исследование позволяет установить вариант ОЛ и уточнить вариант миелоидного лейкоза по ФАБ классификации. Морфологический метод во многом субъективен, зависит от квалификации врача клинической лабораторной диагностики и его опыта в данной области. Специалисты такого уровня в основном сосредоточены в крупных медицинских центрах (областных и федеральных), что диктует необходимость объективизации морфологического метода для повышения диагностических возможностей в отдаленных региональных лечебных учреждениях [1-5].

Одним из перспективных направлений объективизации диагностики является разработка систем цифровой микроскопии на базе текстурного анализа с применением технологий искусственного интеллекта. Так, в контексте диагностики ОЛ логично предположить, что компьютерная микроскопия повысит точность обнаружения бластных клеток на этапе диагностики. В результате цифровой обработки изображений клеток костного мозга для каждой клетки формируется набор количественных характеристик – признаков, составляющих цифровое описание клетки, на основе которого производится ее классификация [5-7].

Значительная вариабельность признаков клеток внутри типа представляет проблему при разработке автоматизированной системы классификации клеток, притом некоторые клетки разных типов выглядят похожими друг на друга. По этой причине необходимо формировать эталонную выборку не по одной клетке каждого типа, а создавать множество образцов изображений клеток [8]. При формировании выборки необходимым этапом является верификация типа клетки на основе экспертной оценки. Это трудоемкая процедура, ес-

ли использовать широко известные графические редакторы (для просмотра и редактирования изображений с выделением областей искомого типа клеток). В этой связи актуальна разработка метода, который позволит сформировать выборку с учетом как данных морфологического анализа на основе опыта и знаний врача клинической лабораторной диагностики высшей категории, так и результатов исследования с применением прибора, основанного на другом физическом принципе действия (иммунофенотипическое исследование с помощью лазерной проточной цитофлюорометрии). Это обеспечит выявление фундаментальных взаимосвязей морфологических и текстурных характеристик изображений клеток крови и костного мозга с экспрессией ключевых антигенов острых лимфобластных лейкозов при первичной диагностике, в рецидиве, в ремиссии и в ходе анализа минимального числа опухолевых клеток при остаточной болезни в онкологии.

Цель работы – разработка метода формирования выборки изображений клеток костного мозга для выявления фундаментальных взаимосвязей морфологических и текстурных характеристик полученных изображений с экспрессией ключевых антигенов острых лимфобластных лейкозов при первичной диагностике, в рецидиве, в ремиссии и в ходе анализа минимального числа опухолевых клеток при остаточной болезни в онкологии.

Материалы и методы

Сформирована начальная эталонная выборка препаратов для системы компьютерной микроскопии. В выборку вошли цитологические препараты пунктатов костного мозга 27 больных с подтвержденным диагнозом ОЛ. Все цитологические препараты окрашены по методу Романовского. У большинства больных (n=20) иммунологически установлен ОЛ из В-линейных предшественнков. У 7 пациентов – ОЛ из Т-линейных предшественников. В 14 случаях дополнительно к первичной диагностике произведен анализ пунктатов костного мозга в рецидиве заболевания.

Предложен метод для формирования экспериментальной выборки изображений клеток на препаратах костного мозга, основанный на цифровой обработке изображений.

Начальным этапом реализации данного метода является получение цифровых микроскопических изображений препаратов костного мозга системой, сочетающей световую микроскопию и компьютерную обработку данных (роботизированный микроскоп Olympus BX43 с камерой Imperx IPX-4M15T-GCFB).

Съемка изображений клеток выполнена серией из не менее 200 кадров, представляющих непересекающиеся области на препарате, в каждом из кадров наблюдается от 1 до N клеток (N, как правило, не превышало 30 клеток).

Затем на полученных изображениях наносятся метки с указанием типа клетки. Здесь в качестве метки используется графический элемент на изображении – стрелка, полигон, прямоугольник или окружность. При этом стоит отметить, что нанесенный графический элемент не портит исходное изображение, а при выводе изображения метка рисуется поверх отображаемой картины. Каждой метке устанавливается соответствующее текстовое описание типа клетки.

Предусмотрена возможность разметки следующих типов клеток: Бласты (Лимфобласт), Промиелоцит (нейтрофильный), Миелоцит (нейтрофильный), Метамиелоцит, Палочкоядерный нейтрофил, Сегментноядерный нейтрофил, Эозинофил, Базофил, Моноцит, Лимфоцит, Плазматическая клетка, Нормобласт (сюда входят все клетки эритроидного ряда), Мегакариоцит. Данный перечень типов клеток для разметки изображений клеток сформирован врачами клинической лабораторной диагностики высшей категории.

Результаты и их обсуждение

Предложенный подход был реализован в виде компьютерной программы для нанесения меток на кадры изображений и аккумулирования опыта и знаний врача высшей категории.

Тестирование разработанного программного приложения проводилось в реальных условиях на препаратах больных острым лимфобластным лейкозом.

Программное обеспечение включало: интерфейс, разработанный с применением библиотеки Qt версии 5.11.1, и базу данных Sqlite, хранящую данные о пациенте, изображения, которые к нему относятся, и метки, которые нанесены на изображениях.

Разработанная программа позволяет загружать серию изображений, проводить разметку с применением графических элементов. В зависимости от типа препарата (гиперклеточный или гипоклеточный) разметка 250 клеток на одном препарате занимает от 10 до 30 мин. Отметим, что при использовании известных инструментов для разметки (например, графического редактора PaintNet и электронной таблицы Microsoft Excel для текстовых описаний) выполнение аналогичной процедуры требует от 2 до 4 часов. Изображение, на которое была нанесена метка, сохраняется в отдельной директории с присвоением ему уникального имени файла для дальнейшего его быстрого поиска.

В результате экспериментальных исследований в реальных условиях в рамках лаборатории иммунологии гемопоэза Национального медицинского исследовательского центра онкологии имени Н.Н. Блохина была проведена разметка клеток на изображениях препаратов из сформированной начальной эталонной выборки. Количественный состав клеток по типам представлен в таблице.

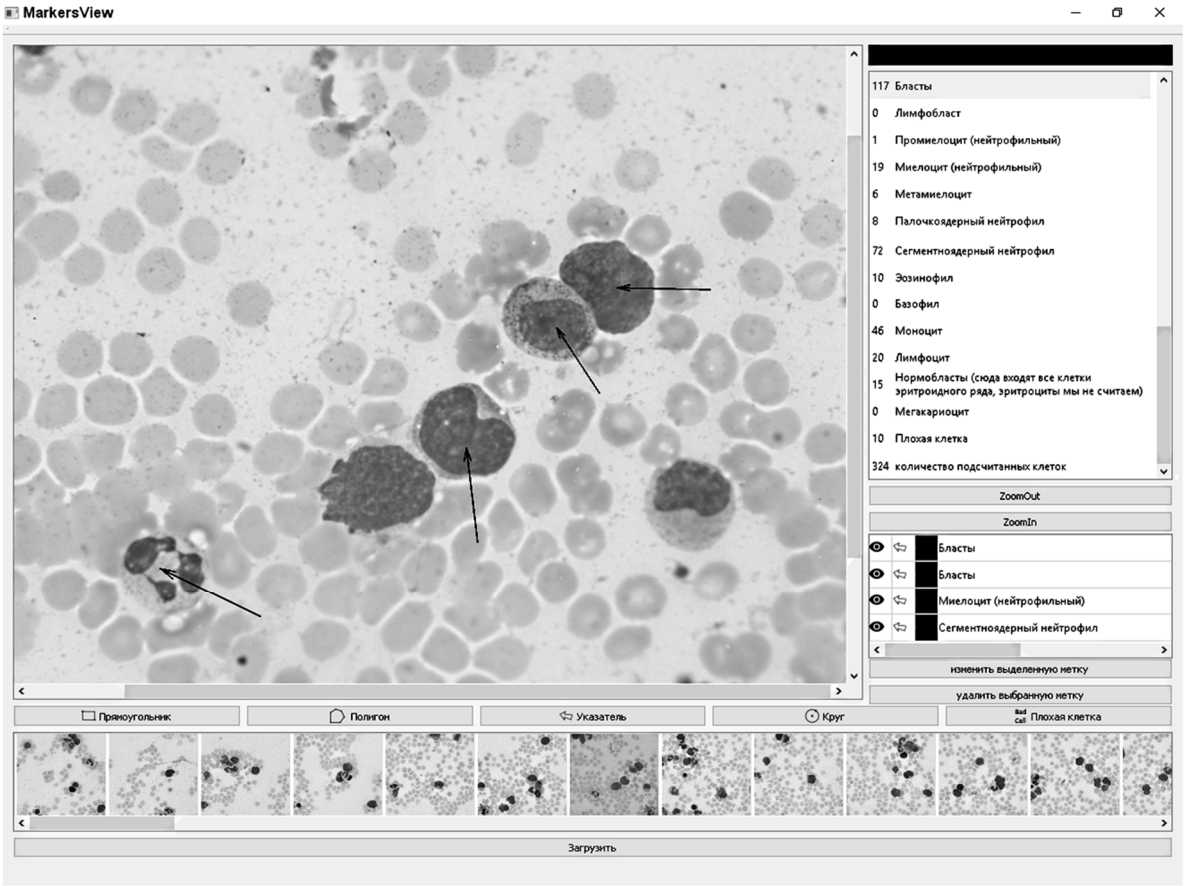


Рис. Программа установки меток на изображениях клеток для формирования экспериментальных выборок изображений клеток костного мозга для диагностики минимальной остаточной болезни (MarkersView)

Количественный состав базы знаний изображений клеток костного мозга для начальной эталонной выборки препаратов

№ п/п	Тип	Количество клеток		
		первичные	рецидив	всего
	Базофил	18	1	19
	Лимфобласт	5468	2577	8045
	Лимфоцит	456	116	572
	Мегакариоцит	2	0	2
	Метамиелоцит	81	51	132
	Миелоцит (нейтрофильный)	118	85	203
	Моноцит	171	15	186
	Нормобласты (сюда входят все клетки эритроидного ряда, за исключением эритроцитов)	286	171	457

Окончание табл.

№ п/п	Тип	Количество клеток		
		первичные	рецидив	всего
	Палочкоядерный нейтрофил	86	63	149
	Плазматическая клетка	13	0	13
	Промиелоцит (нейтрофильный)	2	2	4
	Сегментноядерный нейтрофил	303	122	425
	Эозинофил	45	20	65
	«Плохая» клетка	17	0	17

Предложенный подход к формированию экспериментальных выборок изображений клеток костного мозга обеспечивает создание репрезентативных выборок изображений клеток с препаратов костного мозга для проведения сопоставления данных компьютерной микроскопии и результатов исследования с применением прибора, основанного на другом физическом принципе – лазерного проточного цитофлюориметра. Это, в свою очередь, позволит провести исследование фундаментальных взаимосвязей морфологических и текстурных характеристик полученных изображений с экспрессией ключевых антигенов острых лимфобластных лейкозов при первичной диагностике, в рецидиве, в ремиссии и в ходе анализа минимального числа опухолевых клеток при остаточной болезни.

Сформированная база знаний является инструментом формирования экспериментальных выборок изображений клеток костного мозга. С помощью нее можно создать наборы изображений клеток с определенными параметрами для решения поставленной задачи. Создание таких выборок важно при разработке методов и моделей цифрового анализа изображений клеток для автоматизированной диагностики острых лейкозов.

Выводы

Разработан метод формирования выборки изображений клеток костного мозга для выявления фундаментальных взаимосвязей морфологических и текстурных характеристик полученных изображений с экспрессией ключевых антигенов острых лимфобластных лейкозов при первичной диагностике, в рецидиве, в ремиссии и в ходе анализа минимального числа опухолевых клеток при остаточной болезни в онкологии.

При сравнении с известными инструментами формирования описаний изображений предложенный метод обеспечивает снижение временных затрат более чем в 8 раз.

Список литературы

1. Тупицын Н. Н. Иммунология клеток крови // Гематология / под ред. проф. О. А. Рукавицына. М.: ГЭОТАР- Медиа, 2015. Гл. 6. С. 69–79.

2. Оценка минимальной резидуальной болезни при острых лимфобластных лейкозах из В-линейных предшественников у детей методом трехцветной проточной цитометрии / Л. Ю. Гривцова, А. В. Попа, Н. А. Купрышина, И. Н. Серебрякова, М. Г. Божьева, Н. Н. Тупицын // Иммунология гемопоэза. 2008 (2): 8-33.

3. Стандартизация определения минимальной остаточной болезни методом проточной цитометрии у детей с В-линейным острым лимфобластным лейкозом / А. М. Попов, М. В. Белевцев, Е. В. Боякова [и др.] // Опыт работы российско-белорусской кооперативной группы. Онкогематология. 2016. Т. 11, № 4. С. 64–73.

4. Безнос О. А. Диагностика минимальной остаточной болезни при острых лимфобластных лейкозах у детей: автореф. дис. … канд. мед. наук. М., 2018.

5. Nikitaev V.G., Pronichev A.N., Polyakov E.V., Dmitrieva V.V., Tupitsyn N.N., Frenkel M.A., Mozhenkova A.V. Application of texture analysis methods to computer microscopy in the visible range of electromagnetic radiation //Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2016. Vol. 43, № 10. P. 306–308.

6. Патент Рос. Федерация, МПК G16H10/40, СПК G16H10/40, СПК G16H10/40. Способ распознавания структуры ядер бластов крови и костного мозга с применением световой микроскопии в сочетании с компьютерной обработкой данных для определения В- и Т- линейных острых лимфобластных лейкозов / Никитаев В. Г., Нагорнов О. В., Проничев А. Н., Поляков Е. В., Дмитриева В. В., Зайцев С. М., Сельчук В. Ю., Тупицын Н. Н., Френкель М. А., Моженкова А. В., Безнос О. А. № 2659217; заявл. 12.12.2017; опубл. 28.06.2018, Бюл. №19.

7. Nikitaev V. G., Pronichev A. N., Polyakov E. V., Mozhenkova A. V., Tupitsin N. N., Frenkel M. A. Textural characteristics of bone marrow blast nucleus images with different variants of acute lymphoblastic leukemia // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing. 2018. Vol. 945. № 1. P. 012008.

8. Nikitaev V. G., Pronichev A. N., Polyakov E. V., Dmitrieva V. V. Approach to building knowledge bases in information-measuring systems diagnostics of acute leukemias // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing. 2018. Vol. 945. № 1. P. 012007.

Поступила в редакцию 05.02.2019
Подписана в печать 20.03.2019

Reference

1. Tupitsyn N. N. Immunologiya kletok krovi. Gematologiya; ed by Rukavitsyn O. A. Moscow, GEOTAR- Media, 2015. Gl. 6. pp. 69–79 (In Russ.).

2. Grivtsova L. Yu., Popa A. V., Kupryshina N. A., Serebryakova I. N., Bozh'eva M. G., Tupitsyn N. N. Otsenka minimal'noi rezidual'noi bolezni pri ostrykh limfoblastnykh leikozakh iz V-lineinykh predshestvennikov u detei metodom trekhtsvetnoi protochnoi tsitometrii. *Immunologiya gemopoeza*. 2008 (2): 8-33 (In Russ.).

3. Popov A. M., Belevtsev M. V., Boyakova E. V. [i dr.] Standartizatsiya opredeleniya minimal'noi ostatochnoi bolezni metodom protochnoi tsitometrii u detei s V-lineinym ostrym limfoblastnym leikozom. Opyt raboty rossiisko-belorusskoi kooperativnoi gruppy. *Onkogematologiya*, 2016, vol. 11, no. 4, pp. 64–73 (In Russ.).

4. Beznos O. A. Diagnostika minimal'noi ostatochnoi bolezni pri ostrykh limfoblastnykh leikozakh u detei. Avtoref. diss. kand. med. nauk. Moscow, 2018 (In Russ.).

5. Nikitaev V. G., Pronichev A. N., Polyakov E. V., Dmitrieva V. V., Tupitsyn N. N., Frenkel M. A., Mozhenkova A. V. Application of texture analysis methods to computer microscopy in the visible range of electromagnetic radiation. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2016, vol. 43, no. 10, pp. 306–308.

6. Patent Ros. Federatsiya, MPK G16H10/40, SPK G16H10/40, SPK G16H10/40. Sposob raspoznavaniya struktury yader blastov krovi i kostnogo mozga s primeneniem svetovoi mikroskopii v sochetanii s komp'yuternoi obrabotkoi dannykh dlya opredeleniya V- i T- lineinykh ostrykh limfoblastnykh leikozov / Nikitaev V. G., Nagornov O. V., Pronichev A. N., Polyakov E. V., Dmitrieva V. V., Zaitsev S. M., Sel'chuk V. Yu., Tupitsyn N. N., Frenkel' M. A., Mozhenkova A. V., Beznos O. A. № 2659217; zayavl. 12.12.2017; opubl. 28.06.2018, Byul. №19 (In Russ.).

7. Nikitaev V. G., Pronichev A. N., Polyakov E. V., Mozhenkova A. V., Tupitsin N. N., Frenkel M. A. Textural characteristics of bone marrow blast nucleus images with different variants of acute lymphoblastic leukemia. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2018, vol. 945, no. 1, pp. 012008.

8. Nikitaev V. G., Pronichev A. N., Polyakov E. V., Dmitrieva V. V. Approach to building knowledge bases in information-measuring systems diagnostics of acute leukemias. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2018, vol. 945, no. 1, pp. 012007.

Received 05.02.2019
Accepted 20.03.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Валентин Григорьевич Никитаев, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: kaf46@mail.ru

Valentin G. Nikitaev, DrSc., professor, National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russian Federation,
e-mail: kaf46@mail.ru

Александр Николаевич Проничев, кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: kaf46@mail.ru

Aleksandr N. Pronichev, PhD, Associate Professor, National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russian Federation,
e-mail: kaf46@mail.ru

Евгений Валерьевич Поляков, ассистент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: kaf46@mail.ru

Evgeniy V. Polyakov, Assistant, National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russian Federation,
e-mail: kaf46@mail.ru

Ольга Алексеевна Чернышева, кандидат медицинских наук, Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени Н. Н. Блохина, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: beznos.olga@gmail.com

Olga A. Chernysheva, PhD, N. N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russian Federation,
e-mail: beznos.olga@gmail.com

Ирина Николаевна Серебрякова, доктор медицинских наук, профессор, Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени Н. Н. Блохина, г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: ins_ronc@gmail.com

Irina N. Serebryakova, DrSc., professor, N. N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russian Federation,
e-mail: beznos.olga@gmail.com

Николай Николаевич Тупицын, доктор медицинских наук, профессор, Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени Н. Н. Блохина, г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: nntca@yahoo.com

Nikolay N. Tupitsyn, Doctor of Medical Sciences, professor, N. N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russian Federation,
e-mail: beznos.olga@gmail.com

УДК 616.127-005.8:519.8

Математическая модель нечеткого прогнозирования рецидивов инфаркта миокарда

С. П. Серегин[1], Н. А. Кореневский[1]✉, К. А. Истомина[3], Ю. А. Челебаева[2]

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Российская Федерация, 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

[2] ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет», Российская Федерация, 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1

[3] ИП "Истомина К. А.", Российская Федерация, г. Курск

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Резюме

Целью исследования *является повышение точности прогноза наступления рецидива инфаркта миокарда на основе использования нечетких математических моделей, позволяющих улучшить качество оказания медицинской помощи исследуемой категории пациентов.*

Методы*. В качестве базового математического аппарата выбрана технология мягких вычислений и, в частности, методология синтеза гибридных нечетких решающих правил, разработанная в Юго-Западном государственном университете. Основным элементом нечетких решающих правил, являются функции принадлежности к прогнозируемому классу состояний, которые агрегируются в прогностическую модель с использованием модифицированной итерационной формулы Е. Шортлифа.*

Результаты*. На экспертном уровне был определен состав информативных признаков, состоящих из четырех блоков: блок традиционно используемых медицинских признаков; блок лабораторных показателей в составе перекисное окисление липидов и антиокислительная активность; энергетическая сбалансированность меридианных структур организма, «связанных» с сердечно-сосудистой системой; уровень психоэмоционального напряжения.*

По полученному набору признаков синтезирована нечеткая прогностическая модель качество работы которой проверялось в ходе экспертного оценивания, математического моделирования и статистических испытаний на репрезентативных контрольных выборках.

В ходе проведенных исследований было показано, что уверенность в правильном прогнозе превышает величину 0,85, что является хорошим результатом для медицинских прогностических задач.

Заключение*. В работе сформировано пространство информативных признаков, включающее традиционно используемые в медицине специфические признаки, а также показатели, характеризующие уровень психоэмоционального напряжения и энергетический разбаланс меридианных структур, что позволяет решать задачи синтеза высоконадежных прогностических правил определения риска рецидива инфаркта миокарда в реабилитационном периоде.*

Выбранные в работе методы и полученная прогностическая модель позволяют рекомендовать результаты исследований в медицинскую практику как в виде прикладных программ для планшетов и смартфонов, так и в составе систем поддержки принятия решений врачей-кардиологов.

Ключевые слова*: прогноз; рецидив; инфаркт миокарда; математическая модель; нечеткая логика; функция принадлежности.*

© Серегин С. П., Кореневский Н. А., Истомина К. А., Челебаева Ю. А., 2019

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: Математическая модель нечеткого прогнозирования рецидивов инфаркта миокарда / С. П. Серегин, Н. А. Кореневский, К. А. Истомина, Ю. А. Челебаева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 2. С. 101–111.

UDC 616.127-005.8:519.8

Mathematical Model of Fuzzy Forecasting of Recurrences of Myocardial Infarction

S. P. Seregin[1], N. A. Korenevskiy[1]✉, K. A. Istomina[2], J. A. Chelebajeva[3]

[1] Southwest State University, 94, 50 Let Oktyabrya str., Kursk, 305040, Russian Federation

[2] Ryazan state radioengineering university, 59/1, Gagarina Str., Ryazan, 390005, Russian Federation

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. *The aim of the work is to improve the accuracy of the prediction of the occurrence of recurrence of myocardial infarction based on the use of fuzzy mathematical models to increase the quality of medical care for the studied patients.*

Methods*. The technology of soft computing and, in particular, the methodology for the synthesis of hybrid fuzzy decision rules, developed at Southwestern University, was chosen as the basic mathematical apparatus. The main element of the fuzzy decision rules are the functions of belonging to the predicted class of states, which are aggregated into a prognostic model using the modification iterative formula of E. Shortlif.*

Results*. At the expert level, the composition of informative signs consisting of blocks was determined: a block of traditionally used medical signs; a block of laboratory parameters in the composition of peroxidation methods and antioxidant activity; energy balance of the meridian structures of the body "associated" with the cardiovascular system; level of psycho-emotional stress.*

According to the obtained set of attributes, a fuzzy predictive model of the quality of work was synthesized, which was tested in the course of expert assessment, mathematical modeling and statistical tests on representative control samples.

In the course of the research it was shown that confidence in the correct prognosis exceeds the value of 0.85, which is a good result for medical prognostic problems.

Conclusion*. The space of informative signs is formed, including traditionally used specific signs in medicine, as well as indicators characterizing the level of psycho-emotional stress and energy imbalance of the meridian structures, which allows to solve the problems of synthesis of highly reliable prognostic rules for determining the risk of myocardial infarction in the rehabilitation period.*

The methods chosen in the work and the prognostic model obtained allows us to recommend the results of research into medical practice both in the form of tablet and smartphone application programs and as part of the decision support systems of cardiologists.

Keywords: *prognosis; relapse; myocardial infarction; mathematical model; fuzzy logic; membership function.*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Seregin S. P., Korenevskiy N. A., Istomina K. A., Chelebajeva J. A. Mathematical Model of Fuzzy Forecasting of Recurrences of Myocardial Infarction. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, 9(2): 101–111 (in Russ.).

***

Введение

Одной из причин инвалидизации и летальных исходов во всем мире, включая Россию, является инфаркт миокарда (ИМ), который определяется такими факторами риска, как гипертония, гиподинамия, ожирение, семейный анамнез, стрессы на работе и т. д.

Анализ отечественной и зарубежной литературы и собственные исследования показали, что одним из надежных методов повышения качества оказания медицинской помощи пациентам, перенесшим острый инфаркт миокарда, является точная оценка прогноза рецидива ИМ, обеспечивая возможность оптимизации принятия решений по исследуемой патологии [1, 2].

Опыт работы кафедры биомедицинской инженерии ЮЗГУ показал, что значительное число задач медицинского прогнозирования, включая задачу, решаемую в данной работе, относится к классу плохоформализуемых задач, что подтвердил разведочный анализ, проведенный по контингенту больных, перенесших инфаркт миокарда и находящихся под наблюдением в клиниках г. Курска [1, 2]. В этих условиях в качестве базового математического аппарата была выбрана технология мягких вычислений, и в частности, теория нечёткой логики принятия решений [3, 4, 5, 6, 7, 8].

Методы исследования

Базовым элементом выбранного типа нечетких математических моделей является функция принадлежности к исследуемым классам состояний ω_ℓ с базовой переменной, определяемой по измеряемым информативным признакам $x_i(\mu_{\omega_\ell}(x_i))$ или комплексными показателями y_i, определяемым с использованием аналитических выражений, определяемых применяемой методикой $(\mu_{\omega_\ell}(y_i))$ [4, 9, 10, 7, 8, 11, 12].

Выбираемые для анализа информативные признаки и комплексные показатели объединяются в блоки по способу получения и описанию психологических и физиологических процессов, характеризующих состояние организма пациента, в частности, состояния его сердечно-сосудистой системы.

При синтезе решающих правил группой высококвалифицированных экспер-

тов (8 человек с коэффициентом конкордации 0,89) включили в состав анализируемых признаков только те, наличие которых увеличивает уверенность в принимаемых решениях. С учетом этого обстоятельства, в соответствии с рекомендациями [7, 1, 2, 11] выделенные блоки признаков агрегируются частными решающими правилами вида:

$$UR_q(p+1) = UR_q(p) + \\ +Z_q(p+1)[(1-UR(p)], \quad (1)$$

где $Z_q(p) = \mu_{\omega_\ell}(x_i), \mu_\ell(y_i)$; i=1,…,I; j=1,…,J; p – номер итерации; UR – уверенность в рецидиве инфаркта миокарда в реабилитационном периоде; q – номер блока признаков.

Частные решающие правила агрегируются в финальное правило оценки уверенности URF в том, что у пациента будет наблюдаться рецидив ИМ в течение заданного времени в соответствии с выражением:

$$URF(q+1) = URF(q) + \\ +UR_{q+1}[1-URF(q)], \quad (2)$$

где URF(1)=UR1.

Литературный обзор, экспертные оценки, собственные исследования показали, что медицинская практика сформировала информативные признаки, по которым следует принимать соответствующие прогностические и диагностические заключения.

Из признаков, традиционно принятых в медицинской практике, эксперты отобрали 18 показателей: x1,…, x18 [2]:

x1-возраст;

x2-пол;

x3-семейное положение;

x4-анамнез по ишемической патологии сердца;

x5-наличие в анамнезе ИБС (аналогично x4);

x6-сахарный диабет;

x7-наличие ожирения;

x8-гиподинамия;

x9-курение;

x10-употребление алкоголя;

x11-частые стрессовые ситуации;

x12- содержание холестерина в крови:

x13-уровень артериального давления;

x14 – сократительная функция миокарда;

x15 – общая продолжительность ишемических изменений по ЭКГ;

x16 –смещение сегмента ST;

x17 –частота сердечных сокращений;

x18-количество аритмических эпизодов за сутки.

В соответствии с рекомендациями [3, 4, 7, 8] эксперты под руководством инженера-когнитолога определили набор функций принадлежности $\mu_{\omega_{\text{ри}}}(x_i)$ к классу риск рецидива инфаркта миокарда $\omega_{\text{ри}}$. Аналитическое описание этих функций принадлежности можно найти в работах [6, 7]. Агрегация $\mu_{\omega_{\text{ри}}}(x_i)$ в частное решающее правило

UR1 производится с использованием модели (1).

С целью повышения качества принятия прогностических решений следует использовать дополнительные информативные признаки, характеризующие функционирование различных систем организма.

В работах [1, 2] было показано, что для повышения качества решения задач прогнозирования ИМ в период реабилитации, целесообразно использовать такие показатели, как перекисное окисление липидов (ПОЛ); антиокислительная активность (АОА), энергетическая сбалансированность меридианных структур организма, уровень психоэмоционального напряжения и другие показатели, характеризующие разные аспекты функционирования организма человека [13, 14, 10, 15, 2, 16].

Для построения функций принадлежностей к классу $\omega_{\text{ри}}$ по показателям ПОЛ и АОА предлагается в качестве базовых переменных использовать отклонения измеряемых показателей от их номинальных значений. То есть,

$$\delta x_{\Pi} = \frac{x_{\Pi}^{H} - x_{\Pi}^{T}}{x_{\Pi}^{H}} 100\%;$$

$$\delta x_{A} = \frac{x_{A}^{H} - x_{A}^{T}}{x_{A}^{H}} 100\% .$$

где x_{Π}^{H} и x_{A}^{H} – ПОЛ и АОА, измеренное на репрезентативной группе здоровых людей; $x_{\Pi}^{T} = x_{19}$ и $x_{A}^{T} = x_{20}$ – ПОЛ и АОА у обследуемого пациента;

Частная нечеткая модель прогноза по классу $\omega_{\text{ри}}$ с учетом рекомендаций [2] имеет вид:

$$\begin{aligned}
&ЕСЛИ\ (\delta x_{\Pi} > 10\%)\ И\ (\delta x_{A} > 10\%)\ ТО \\
&[UR_2 = \mu_{\omega_{\text{ри}}}(\delta x_{\Pi}) + \mu_{\omega_{\text{ри}}}(\delta x_{A})[1 - \mu_{\omega_{\text{ри}}}(\delta x_{\Pi})]] \\
&ИНАЧЕ[UR_2 = 0],
\end{aligned}$$

где

$$\mu_{\omega_{\text{ри}}}(\delta x_{\text{п}}) = \begin{cases} 0, если\ \delta_{x_{\text{п}}} < 10\%; \\ 0,006\,\delta_{x_{\text{п}}} - 0,06, если\ 10\% \le \delta_{x_{\text{п}}} < 50\%; \\ 0,25, если\ \delta_{x_{\text{п}}} \ge 50\%, \end{cases}$$

$$\mu_{\omega_{\text{ри}}}(\delta x_{\text{А}}) = \begin{cases} 0, если\ \delta_{x_{\text{А}}} < 10\%; \\ 0,003\,\delta_{x_{\text{А}}} - 0,03, если\ 10\% \le \delta_{x_{\text{А}}} < 60\%; \\ 0,15, если\ \delta_{x_{\text{А}}} \ge 60\%. \end{cases}$$

Математическая модель оценки риска рецидива инфаркта миокарда UR3 по величине энергетической сбалансированности меридианных структур организма описана в работе [1].

Оценка уровня психоэмоционального напряжения YH производится в соответствии с математической моделью, описанной в работах [17, 6, 7, 18, 19–21].

Уверенность в том, что в реабилитационном периоде будет наблюдаться рецидив ИМ, определяется выражением

$$UR_4 = \begin{cases} 0, если\, YH < 0,3; \\ 0,67YH - 0,2, если\, 0,3 \le YH < 0,9; \\ 0,4, если\, YH \ge 0,9. \end{cases}$$

В ходе экспертного оценивания и математического моделирования было показано, что использование всех четырех частных нечетких решающих моделей в выражении (2) позволяет получить уверенность в прогнозе 0,85 и выше в зависимости от количества и качества собираемой информации.

Результаты и их обсуждение

Для оценки качества работы математических моделей прогнозирования рецидива инфаркта миокарда в поликлиниках города Курска было отобрано 230 больных, перенесших острый инфаркт миокарда. В соответствии с рекомендациями, принятыми в теории распознавания и квалиметрии для обеспечения качества классификации на уровне 0,90, объем контрольных выборок по альтетернативному классу (класс ω_0) должен быть не менее 95 человек, а по классу $\omega_{ри}$ – не менее 100 человек. Нами было отобрано 110 человек на каждый из диагностируемых классов. Используя показатель URF, как шкале для построения гистограмм распределения классов ω0 и ωри, были определены классификационные пороги, позволившие решать задачу дефазификации нечетких решающих правил.

Относительно порогов дефазификации считались ошибки классификации и определялись такие показатели качества, как диагностические чувствительность (ДЧ), специфичность (ДС), эффективность (ДЭ) и прогностические значимости положительных (ПЗ+) и отрицательных (ПЗ-) результатов.

Результаты статистических испытаний модели (2) приведены в таблице.

Результаты статистических испытаний модели (2)

Пациенты	Результаты срабатывания правил		∑:
	ПР	ОР	
Прогнозируемый класс: 110	87	23	110
Альтернативный класс: 110	21	89	110
∑:	108	112	220

Примечание: ПР – положительные результаты; ОР – отрицательные результаты.

Анализ полученных результатов показывает, что статистические испытания предложенных решающих правил дают несколько более значимые результаты, чем результаты математического моделирования, правил, полученных экспертным путем, что свидетельствует о хорошей работе экспертов. Это позволяет рекомендовать полученные наборы решающих правил к использованию в медицинской практике.

Заключение

В работе получены информативные признаки, включающие блок традиционно используемых в медицине признаков, блок признаков, характеризующих уровень психоэмоционального напряжения, и блок признаков, позволяющих оценивать энергетический разбаланс меридианных структур, которые позволили синтезировать высоконадежные прогностические правила определения риска рецидива инфаркта миокарда в реабилитационном периоде.

Выбранные в работе методы и полученная прогностическая модель позволяют рекомендовать результаты исследований в медицинскую практику как в виде прикладных программ для планшетов и смартфонов, так и в составе систем поддержки принятия решений врачей-кардиологов.

Список литературы

1. Прогнозирование рецидивов инфаркта миокарда на основе нечетких моделей Е. Шортлифа с использованием электрических характеристик биологически активных точек / Н. А. Кореневский, С. П. Серегин, В. А. Иванов, А. И. Колесник, Г. В. Сипливый, К. Ф. Макконен, В. В. Дмитриева, Д. И. Кича, Д. А. Зубарев // Медицинская техника. 2018. № 1. С. 50–53.

2. Математические модели прогнозирования и профилактики рецидивов инфаркта миокарда в реабилитационном периоде: монография / С.П. Серегин, О.М. Воробьева, С.Н. Кореневская [и др.]; под науч. ред. Н. А. Кореневского; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2015. 166 с.

3. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 312 с.

4. Кореневский Н. А. Метод синтеза гетерогенных нечетких правил для анализа и управления состоянием биотехнических систем // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 2. С. 99–103.

5. Кореневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1 (289). С. 33–35.

6. Оценка и управление состоянием здоровья обучающихся на основе гибридных интеллектуальных технологий: монография / Н. А. Кореневский, А. Н. Шуткин, С. А. Горбатенко, В. И. Серебровский. Старый Оскол: ТНТ, 2016. 472 с.

7. Кореневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.

8. Шуткин А. Н., Федянин В. В., Кореневская С. Н. Проектирование баз знаний медицинских экспертных систем с использованием коллективов нечетких правил // Информационные проекты в медицине и педагогике: материалы международной научно-практической конференции. М., 2014. С. 61–64.

9. Кореневский Н. А., Разумова К. В. Синтез коллективов гибридных нечетких моделей оценки состояния сложных систем // Наукоемкие технологии. 2014. Т. 15, № 12. С. 31–40.

10. Кореневский Н. А., Крупчатников Р. А. Информационно-интеллектуальные системы для врачей рефлексотерапевтов. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 424 с.

11. Korenevskiy N. A., Application of Fuzzy Logic for Decision-Making in MedicalExpert Systems // Biomedical Engineering. May 2015. Vol. 49. P. 46–49.

12. Korenevskiy N. A., Krupchatnikov R. A., Gorbatenko S. A. Generation of fuzzy network models taught on basic of data structure for medical expert systems // Biomedical Engineering Journal. Vol.42, no. 2. P. 67–72.

13. Дуброва Т. А. Статистические методы прогнозирования. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 206 с.

14. Кореневский Н. А., Лазурина Л. П. Энергоинформационные модели рефлексодиагностики. Курск, 2000. 177 с.

15. Кореневский Н. А., Крупчатников Р. А., Аль-Касасбех Р. Т. Теоретические основы биофизики акупунктуры с приложениями в медицине, психологии и экологии на основе нечетких сетевых моделей. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 528 с.

16. Korenevskiy N. A., Al -Kasasbeh R. T., Ionecou F. Prediction and prenosological diagnostics of heart diseases based on energy characteristics of acupuncture points and fuzzy logic // Computer methods in biomechanics and biomedical engineering. 2012. Vol. 15. Is. 7. P. 681–689.

17. Конева Л. В., Кореневская С. Н., Дегтярев С. В. Оценка уровня психоэмоционального напряжения и утомления по показателям, характеризующим состояние внимания человека // Системный анализ. 2012. Т. 11, № 4. С. 993–1000.

18. Fuzzy determination of the human's level of psycho-emotional / N. A. Korenevskiy, R. T. Al-Kasasbeh, F. Ionescouc, M. Alshamasin, E. Alkasasbeh, A. P. Smith // IFMBE Proceedings. 2013. Vol. 40. IFMBE. P. 213–216.

19. Korenevskiy N., Riad Taha Al-Kasasbeh, Ionescou F., Alshamasin M., Anrew P. Smit Fuzzy Determination of The Humans Level of Psycho-Emotional // “Mega-Conference on Biomedical Enginering”. Proceedings of the 4th-international conferecejn the develjpment of biomedical engineering. Ho Chi Minh City Vietnam, January 8-12, 2012. P. 354–357.

20. Korenevskiy N. A., Skopin D. E., Al Kasasbeh R. T., Kuz’min A. A. System for Studying Specific Features of Attention and Memory // Biomedical Engineering Journal. 2010. Vol. 44, no. 1. P. 32–35.

21. Гадалов В. Н., Кореневский Н. А., Снопков В. Н. Математические модели рефлекторных систем организма человека и их использование для прогнозирования и диагностики заболеваний // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2012. Т. 11, № 2. С. 515–521.

Поступила в редакцию 01.03.2019
Подписана в печать 29.03.2019

Reference

1. Korenevskii N. A., Seregin S. P., Ivanov V. A., Kolesnik A. I., Siplivyi G. V., Makkonen K. F., Dmitrieva V. V., Kicha D. I., Zubarev D. A. Prognozirovanie retsidivov infarkta miokarda na osnove nechetkikh modelei E. Shortlifa s ispol'zovaniem elektricheskikh kharakteristik biologicheski aktivnykh tochek. *Meditsinskaya tekhnika*, 2018, no. 1, pp. 50–53 (In Russ.).

2. Seregin S. P., Vorob'eva O. M., Korenevskaya S. N. [i dr.]. Matematicheskie modeli prognozirovaniya i profilaktiki retsidivov infarkta miokarda v reabilitatsionnom periode; ed. by Korenevskij N. A. Kursk, 2015, 166 p. (In Russ.).

3. Zade L. A. Ponyatie lingvisticheskoi peremennoi i ee primenenie k prinyatiyu priblizhennykh reshenii. Moscow, Mir Publ., 1976, 312 p. (In Russ.).

4. Korenevskii, N.A. Metod sinteza geterogennykh nechetkikh pravil dlya analiza i upravleniya sostoyaniem biotekhnicheskikh system. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie*, 2013, no. 2, pp. 99–103 (In Russ.).

5. Korenevskii N. A. Ispol'zovanie nechetkoi logiki prinyatiya reshenii dlya meditsinskikh ekspertnykh system. *Meditsinskaya tekhnika*, 2015, no. 1 (289), pp. 33–35 (In Russ.).

6. Korenevskii N. A., Shutkin A. N., Gorbatenko S. A., Serebrovskii V. I. Otsenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya obuchayushchikhsya na osnove gibridnykh intellektual'nykh tekhnologii. Staryi Oskol, TNT Publ., 2016, 472 p. (In Russ.).

7. Korenevskii N. A., Rodionova S. N., Khripina I. I. Metodologiya sinteza gibridnykh nechetkikh reshayushchikh pravil dlya meditsinskikh intellektual'nykh sistem podderzhki prinyatiya reshenii. Staryi Oskol, TNT Publ., 2019, 472 p. (In Russ.).

8. Shutkin A. N., Fedyanin V. V., Korenevskaya S. N. Proektirovanie baz znanii meditsinskikh ekspertnykh sistem s ispol'zovaniem kollektivov nechetkikh pravil. *Informatsionnye proekty v meditsine i pedagogike*. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Moscow, 2014, pp. 61–64 (In Russ.).

9. Korenevskii N. A., Razumova K. V. Sintez kollektivov gibridnykh nechetkikh modelei otsenki sostoyaniya slozhnykh system. *Naukoemkie tekhnologii*, 2014, vol. 15, no. 12, pp. 31–40 (In Russ.).

10. Korenevskii N. A., Krupchatnikov R. A. Informatsionno-intellektual'nye sistemy dlya vrachei refleksoterapevtov. Staryi Oskol, TNT Publ., 2013, 424 p. (In Russ.).

11. Korenevskiy N. A., Application of Fuzzy Logic for Decision-Making in MedicalExpert Systems. *Biomedical Engineering Journal*, May 2015, vol. 49, pp. 46–49.

12. Korenevskiy N. A., Krupchatnikov R. A., Gorbatenko S. A. Generation of fuzzy network models taught on basic of data structure for medical expert systems. *Biomedical Engineering Journal*, vol.42, no. 2, pp. 67–72.

13. Dubrova T. A. Statisticheskie metody prognozirovaniya. Moscow, YuNITI-DANA Publ., 2003, 206 p. (In Russ.).

14. Korenevskii N. A., Lazurina L. P. Energoinformatsionnye modeli refleksodiagnostiki. Kursk, 2000, 177 p. (In Russ.).

15. Korenevskii N. A., Krupchatnikov R. A., Al'-Kasasbekh R. T. Teoreticheskie osnovy biofiziki akupunktury s prilozheniyami v meditsine, psikhologii i ekologii na osnove nechetkikh setevykh modelei. Staryi Oskol, TNT Publ., 2013, 528 p. (In Russ.).

16. Korenevskiy N. A., Al -Kasasbeh R. T., Ionecou F. Prediction and prenosological diagnostics of heart diseases based on energy characteristics of acupuncture points and fuzzy logic. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 2012, vol. 15, is. 7, pp. 681–689.

17. Koneva L. V., Korenevskaya S. N., Degtyarev S. V. Otsenka urovnya psikhoemotsio-nal'nogo napryazheniya i utomleniya po pokazatelyam, kharakterizuyushchim sostoyanie vnimaniya cheloveka. *Sistemnyi analiz*, 2012, vol. 11, no. 4, pp. 993–1000 (In Russ.).

18. Korenevskiy N. A., Al-Kasasbeh R. T., Ionescouc F., Alshamasin M., Al-kasasbeh E., Smith A. P. Fuzzy determination of the human's level of psycho-emotional. IFMBE Proceedings, 2013, vol. 40, IFMBE, pp. 213–216.

19. Korenevskiy N., Riad Taha Al-Kasasbeh, Ionescou F., Alshamasin M., Anrew P. Smit Fuzzy Determination of The Humans Level of Psycho-Emotional. Mega-Conference on

Biomedical Enginering. Proceedings of the 4th-international conferecejn the develjpment of biomedical engineering. Ho Chi Minh City Vietnam, January 8-12, 2012, pp. 354–357.

20. Korenevskiy N. A., Skopin D. E., Al Kasasbeh R. T., Kuz'min A. A. System for Studying Specific Features of Attention and Memory. *Biomedical Engineering Journal*. 2010, vol. 44, no. 1, pp. 32–35.

21. Gadalov V. N., Korenevskii N. A., Snopkov V. N. Matematicheskie modeli reflektornykh sistem organizma cheloveka i ikh ispol'zovanie dlya prognozirovaniya i diagnostiki zabolevanii. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh*, 2012, vol. 11, no. 2, pp. 515–521 (In Russ.).

Received 01.03.2019
Accepted 29.03.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Станислав Петрович Серегин, доктор медицинских наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г.Курск, Российская Федерация,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Stanislav P. Seregin, Doctor of Medical Sciences, Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Николай Алексеевич Кореневский, доктор технических наук, заведующий кафедрой биомедицинской инженерии ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Nikolay A. Korenevskiy, Doctor of Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Ксения Александровна Истомина, исследователь ИП «Истомина Ксения Александровна», г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: Istomina.xenia@gmail.com

Kseniya A. Istomina, researcher IP " Istomina Kseniya Aleksandrovna", Kursk, Russian Federation,
e-mail: Istomina.xenia@gmail.com

Юлия Андреевна Челебаева, аспирант, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань, Российская Федерация,
e-mail: chel-juliya@yandex.ru

Yuliya A. Chelebajeva, Ryazan state radioengineering university, graduate student, Ryazan, Russian Federation,
e-mail: chel-juliya@yandex.ru

УДК 303.732.4

Использование метода функций ядра в задаче анализа риска смертности

Г. Г. Рапаков[1]✉, В. А. Горбунов[1], К. А. Абдалов[2]

[1] ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Российская Федерация, 160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15

[2] БУЗ ВО «Вологодская городская больница № 1», Российская Федерация, 160012, г. Вологда, Советский пр., 94

✉ e-mail: grapakov@yandex.ru

Резюме

Цель исследования *состоит в экспериментальном исследовании метода функций ядра. Компьютерная модель позволяет выявить волны смертности для когорты экстренных больных с онкопатологией и предложить точечные оценки демографического риска.*

Методы*. Алгоритм функций ядра эффективно выполняет моделирование демографического риска в анализе времени до события. Метод функций ядра позволяет найти оценку плотности ядра без необходимости делать предварительное допущение о принадлежности плотности распределения вероятностей к известному семейству функций. Оценка плотности ядра формируется посредством суммирования взвешенных значений, вычисленных при помощи кернфункции заданного вида. Ширина полосы пропускания рассматривается как коэффициент сглаживания.*

Результаты*. На основе данных мониторингового медико-социологического исследования (2003–2015 гг.) для когорты экстренных больных с злокачественными новообразованиями (ЗНО) была получена оценка функции мгновенного риска летального исхода по методу ядерного сглаживания с использованием кернфункции Епанечникова, обеспечивающей минимизацию средней единой квадратичной ошибки. Результатом является неунимодальная (волнообразная) зависимость. В качестве точечных оценок демографического риска для волн смертности по результатам ядерного сглаживания выступают координаты точек максимума оценки функции риска. Представлен график плотности распределения мгновенного риска смертности.*

Заключение*. Выполнено экспериментальное исследование метода функций ядра в ходе анализа рисков здоровью населения от ЗНО. Оценка функции риска смертности для когорты экстренных больных с онкопатологией по методу ядерного сглаживания с использованием кернфункций представляет собой волнообразную зависимость. Получены точечные оценки демографического риска и график плотности распределения. Результаты компьютерного моделирования использованы при поддержке принятия управленческих решений в ходе исполнения государственной программы развития здравоохранения региона и способствуют росту эффективности онкопрофилактики.*

Ключевые слова*: компьютерное моделирование; анализ времени до события; метод кернфункций; оценка риска; волны смертности; злокачественные новообразования; поддержка принятия решений.*

Конфликт интересов*: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

© Рапаков Г. Г., Горбунов В. А., Абдалов К. А., 2019

Для цитирования: Рапаков Г. Г., Горбунов В. А., Абдалов К. А. Использование метода функций ядра в задаче анализа риска смертности // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 2. С. 112–126.

UDC 303.732.4

Mortality Risk Analysis by the Kernel Function Method

G. G. Rapakov[1]✉, V. A. Gorbunov[1], K. A. Abdalov[2]

[1] Vologda State University, 15, Lenina str., Vologda, 160000, Russian Federation

[2] Vologda Municipal Hospital № 1, 94, Sovetskiy pr., Vologda, 160012, Russian Federation

✉ e-mail: grapakov@yandex.ru

Abstract

***Purpose of research**. The article presents research results of the kernel function method. The data of the medical-sociological survey are used. Approach identifies mortality waves. Modeling makes it possible to estimates of demographic risk for a cohort of cancer emergency patients.*

***Methods**. Computer simulations based at the kernel smooth algorithm effectively detects the time structures for the malignant neoplasms events. The kernel function algorithm effectively performs mortality risk modeling at the time-to-event analysis. It allows one to find an estimate without having to make a preliminary assumption about belonging to the functions family. The estimation of the core density is formed by summing the weighted values and was calculated using the core function of a specified type. Bandwidth is considered as a smoothing factor.*

***Results**. Outcomes was based upon the data of the medical-sociological monitoring for the cohort of cancer emergency patients (2003–2015). The estimate of the instantaneous mortality risk was obtained with the method of kernel smoothing. An Epanechnikov kernel function provides the minimal average quadratic error. The result is a wave-like dependence. The extremums coordinates are the point estimates of the demographic risk for the waves of mortality. A plot of instantaneous mortality risk distribution density is presented.*

***Conclusion**. An experimentally study of the kernel functions method was performed during the analysis of public health risks. The estimation of the mortality risk function for a cohort of cancer emergency patients is a wave-like dependence. Point estimates of demographic risk and a curve of distribution density are obtained. The results of computer modeling were used to support management decisions in the regional programme for health development and cancer prevention.*

***Keywords**: association rules; geospatial modeling; risk factor; malignant neoplasms; decision support.*

***Conflict of interest:** The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Rapakov G. G., Gorbunov V. A., Abdalov K. A. Mortality Risk Analysis by the Kernel Function Method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, 9(2): 112–126 (In Russ.).

***

Введение

Данные типа времени жизни в анализе выживаемости характеризуются системным событием. В задачах здравоохранения в качестве него часто рассматривают летальный исход, который ограничивает продолжительность жизни пациента. В настоящее время в связи с расширением сферы приложений анализа выживаемости в литературе все чаще используется термин «событийный анализ». Оценку плотности распределения вероятностей и моделирование функции мгновенной интенсивности отказов относят к важной части статистических задач событийного анализа [1]. Практическая значимость работы обусловлена социальной значимостью риска смертности как демографического показателя состояния здоровья населения. В связи с этим актуальной является задача изучения непараметрического подхода в анализе плотности распределения и исследования метода ядерного сглаживания с использованием кернфункций для оценки мгновенного риска в ходе анализа выживаемости при создании муниципального здоровьесберегающего пространства активного долголетия [2]. Цель исследования состоит в компьютерном моделировании функции мгновенного риска смертности экстренных больных с онкопатологией при помощи метода ядерного сглаживания. Результаты анализа демографического риска позволят повысить эффективность управленческих решений в региональной системе медицинской профилактики при реализации концепции активного долголетия (КАД), что обусловливает новизну работы.

Материалы и методы

Метод функций ядра

Прогнозирование выживаемости в анализе времени до события позволяет определить вероятность $S(t)$ пережить момент времени t с начала наблюдения. Функция мгновенной интенсивности отказов $h(t) = -d[\log S(t)]/dt$ используется для оценки демографического риска. Мгновенный риск позволяет оценить вероятность летального исхода в следующем временном интервале наблюдения, если участник был жив к его началу. Сумму всех рисков при переходе от начала наблюдения к заданному моменту времени рассматривают как кумулятивный риск $H(t) = -\log S(t)$. Для получения функции выживаемости $S(t)$ и мгновенной интенсивности отказов $h(t)$ используются специальные статистические методы анализа времени до события: построение таблиц жизни и метод множительных оценок. Кумулятивный риск $H(t)$ рассчитывают при помощи непараметрического метода Нельсона–Аалена [1, 3, 4].

$$S(t) = P(T \geq t) = 1 - F(t) = \\ = \int_t^{\infty} f(x)dx = exp\left(-\int_0^t h(x)dx\right) = \\ = exp\left(-H(t)\right). \quad (1)$$

Анализ данных базируется на проведении мониторингового медико-социологического исследования за период наблюдения с 2003 по 2015 гг., проведенного в хирургическом отделении № 2 БУЗ ВО «Вологодская городская больница № 1». Данные цензурированы справа. Объем выборки обеспечивает необходимую точность оценки не ниже 6% с доверительной вероятностью $\alpha = 0{,}95$ (n=284). Данные удовлетворяют базовым требованиям исследования выживаемости: для всех наблюдений известно время начала и окончания; тип наблюдения – полное или изъятое; выбор объектов случаен. Независимой переменной является время дожития пациентов – экстренных больных с онкопатологией в днях.

Ознакомление и анализ источников позволил выполнить сопоставление целей и методов работы с аналогичными задачами. Вопросы расширения возможностей применения интеллектуальных систем поддержки принятия решений за счет совместной обработки атрибутивных и пространственных данных в условиях динамично меняющейся внешней среды рассмотрены в [5]. Авторы статьи [6], используя методы нечеткой логики, исследуют вопросы рецедива мочекаменной болезни, эпидемиология которой носит экологически обусловленный характер. Применение нейросетевых структур в ходе демографических исследований позволяет корректно учесть эффект запаздывания (лаг) при реакции сложной системы на внешний фактор воздействия. Для связи экзогенных и эндогенных факторов в работе [7] предложена трехслойная динамическая модель, построенная на основе МГУА-моделирования. Статья [8] рассматривает вопросы обнаружения скрытых процессов, обладающих высокой информационной ценностью в системах медицинского и экологического мониторинга для принятия управленческих решений. Выделение параметров медленных волн осуществляется на основе гибридной технологии анализа квазипериодических сигналов, включающей оконное преобразование Фурье и вейвлет-преобразование. В анализе данных наряду с триммингом данных, простым робастным и двойным экспоненциальным сглаживанием используется метод ядерного сглаживания [9, 10]. Функции ядра находят применение в качестве активационных для искусственных нейронных сетей при аппроксимации стохастических процессов [11]. Ядерное сглаживание демографического риска является удачным способом графического представления мгновенной интенсивности отказов $h(t)$ и позволит выделить волны риска смертности, которые обсуждаются в работе [12]. Статья [13] посвящена выбору параметра сглаживания, влияющему на точность оценки Берана, которая определена на основе ядерной функции, для условной

функции надёжности при заданном значении ковариаты. Из числа рассмотренных вариантов с позиций усредненного отклонения авторы рекомендуют квартическую кернфункцию и ядро Епанечникова. Методы анализа времени до события показали высокую эффективность при информационно-аналитической поддержке управленческих решений в региональном здравоохранении [14]. На основе расчета таблиц продолжительности жизни была получена функция мгновенной интенсивности отказов. Выявлено, что мгновенный риск смертности для мужчин в 2–5 раз выше, чем для женщин. В отдельные периоды времени это соотношение составляет от 5 до 21 раз. Для мужской и женской части пенсионной когорты и независимой переменной – времени наступления исхода, эмпирические функции риска, построенные на основе группировки событий с использованием временных интервалов, рассмотрены в [15]. Точечные оценки мгновенного риска смертности лиц старше трудоспособного возраста, дифференцированные по половому признаку, получены в [16]. Вопросы моделирования волнообразных (двоякоизогнутых) зависимостей также обсуждаются в работе [17] с позиций нелинейной динамики популяций.

Использование гистограмм для оценки плотности распределения вероятностей f обусловлено простотой метода. Альтернативой является непараметрический подход, при котором оценивание f для случайной величины X, представленной выборкой X_i, $i = 1, 2, ..., n$, выполняется на основе метода функций ядра или кернфункций. Подгонка эмпирической плотности при помощи кернфункции относится к инструментарию исследовательского анализа данных. Идея предложена Б. Пирсом позднее начала использования гистограмм и до последнего времени была сложнее в реализации [3, 4].

Метод функций ядра позволяет найти оценку $\hat{f}_n(x)$ без необходимости делать предварительное допущение о принадлежности f к известному семейству функций. При оценке плотности ядро с заданной полосой пропускания скользит в виде окна соответствующей ширины вдоль ряда данных, подсчитывая и взвешивая наблюдения, попадающие в него. Проводя аналогии с гистограммой, возникает перекрытие ее диапазонов значений. Интервал, скользящий вдоль ряда данных и представляет собой окно. Вместо простого подсчета количества наблюдений в окне, в отличие от гистограммы, оценщик плотности ядра назначает им веса в диапазоне от нуля до единицы, в зависимости от расстояния до центра окна, и суммирует взвешенные значения. Ядро представляет собой функцию, определяющую эти веса. В отли-

чие от гистограммы оценка плотности ядра обеспечивает сглаживание и обладает независимостью от выбора начала координат (размещения столбцов гистограммы). Метод ядерного сглаживания может быть применен для удаления недостоверных данных. Особенность использования кернфункций состоит в том, что при сильном сглаживании возможен пропуск потенциально информативных подро-бностей. Чересчур малое сглаживание чревато избыточной детализацей [9, 10].

Оценка плотности ядра $\hat{f}_n(x)$ формируется посредством суммирования взвешенных значений, вычисленных при помощи кернфункции заданного вида *K*:

$$\hat{f}_n(x) = \frac{1}{qb}\sum_{i=1}^{n} w_i K\left(\frac{x - X_i}{b}\right), \qquad (2)$$

где $q = \sum_i w_i$, если веса являются взвешенными по частоте (frequency weights) или аналитическими (analytic weights). Для значимых весов (importance weights) $q = 1$. Применение аналитических весов меняет шкалу отсчета так, что $\sum_i w_i = n$. Если веса не используются, то $w_i = 1,\ i = 1,2,...,n$ [4]. Ширина полосы пропускания или ширина окна *b* в ряде случаев рассматривается как коэффициент сглаживания: при увеличении значения *b* будет получена более гладкая оценка [10]. Большинство исследователей сходятся во мнении, что выбор ширины окна превалирует над выбором функции ядра [4]. Однако для постановки задачи в [13] это свойство нарушается.

Наиболее эффективную оценку с точки зрения минимизации средней единой квадратичной ошибки дает кернфункция Епанечникова (Epanechnikov) [4]:

$$K_{\text{Epanechnikov}}[z] = \\ = \begin{cases} \frac{3}{4}\left(1 - \frac{z^2}{5}\right)\Big/\sqrt{5} & if\ |z| < \sqrt{5} \\ 0 & otherwise. \end{cases} \qquad (3)$$

Использование других функций ядра носит специальный характер и может потребовать коррекции на границах диапазона для обеспечения надежности оценки [4].

$$K_{Biweight}[z] = \begin{cases} \frac{15}{16}\left(1 - z^2\right)^2 & if\ |z| < 1 \\ 0 & otherwise. \end{cases} \qquad (4)$$

$$K_{\text{cosine}}[z] = \begin{cases} 1 + cos\left(2\pi z\right) & if\ |z| < \frac{1}{2} \\ 0 & otherwise. \end{cases} \qquad (5)$$

$$K_{\text{epan2}}[z] = \begin{cases} \frac{3}{4}\left(1 - z^2\right) & if\ |z| < 1 \\ 0 & otherwise. \end{cases} \qquad (6)$$

$$K_{\text{gaussian}}[z] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} \qquad (7)$$

$$K_{\text{parzen}}[z] = \begin{cases} 8\left(1 - |z|\right)^3 \big/ 3 & if\ \frac{1}{2} < |z| \le 1 \\ \frac{4}{3} - 8z^2 + 8|z|^3 & if\ |z| \le \frac{1}{2}. \end{cases} \qquad (8)$$

$$K_{\text{rectangular}}[z] = \begin{cases} 1/2 & if\,|z|<1 \\ 0 & otherwise. \end{cases} \quad (9)$$

$$K_{\text{triangular}}[z] = \begin{cases} 1-|z| & if\,|z|<1 \\ 0 & otherwise. \end{cases} \quad (10)$$

Так достоверность метода падает для кернфункций epan2, biweight и rectangular, когда оценка выполняется вблизи границ данных. В этом случае используется коррекция ядра на границах. Для кернфункции Епанечникова оценка риска выполняется с минимизацией краевых эффектов в пределах диапазона значений аргумента $[L+b, R-b]$, где L, R – минимальное и максимальное значение временного аргумента [3].

Выбор b зависит от того, как много значений наблюдений n будет включено в оценку плотности. В целом, зная дисперсию (variance) и межквартильный размах (interquartile range) выборки, можно найти полосу пропускания, которая не зависит от ядра, а является функцией данных [4]:

$$b = \frac{0,9m}{n^{1/5}}, \quad (11)$$

$$m = min\left(\sqrt{\text{variance}_X}, \frac{\text{interquartile range}_X}{1,349}\right). \quad (12)$$

Результаты и их обсуждение

Используя сведения мониторингового медико-социологического исследования за 13 лет наблюдения, был выполнен анализ плотности распределения мгновенного риска смертности для когорты экстренных больных с онкопатологией на основе метода функций ядра. Ширина полосы составила 0,0022. Построена модель распределения, получена локальная оценка плотности ядра для центра распределения эмпирической переменной. Надежность оценки на границах снижается. Поскольку плотность не измеряется в вероятностной шкале, значения распределения на графике превышают единичные. Оценка функции риска $\hat{h}(t)$ базируется на методе взвешенного ядерного сглаживания расчетного вклада риска $\Delta\hat{H}(t_j) = \hat{H}(t_j) - \hat{H}(t_{j-1})$:

$$\hat{h}(t) = b^{-1}\sum_{j=1}^{D} K_t\left(\frac{t-t_j}{b}\right)\Delta\hat{H}(t_j), \quad (13)$$

где K_t – кернфункция, b – полоса пропускания, а суммирование при расчете риска выполняется для D времен [3].

Поточечный доверительный интервал (ДИ) для сглаженной функции риска вычисляется, используя метод логарифмического преобразования [3]:

$$\hat{h}(t)\,exp\left[\pm\frac{Z_{1-\alpha/2}\sigma\left(\hat{h}(t)\right)}{\hat{h}(t)}\right]. \quad (14)$$

При непараметрическом оценивании плотности для вычисления доверительного интервала используется редукция полосы пропускания. В случае малых выборок, насчитывающих десятки наблюдений, ширина ДИ получается избыточной. Для повышения информативности доверительного интервала рекомендуется увеличение объема выборки. В целях обнаружения мультимодальности распределения используется адаптивное оценивание плотности. Оценка доверительного интервала в случае ядра с заданной полосой пропускания может дать дополнительные свидетельства для гипотезы мультимодальности [4].

По итогам мониторингового медико-социологического исследования получена оценка функции риска по методу ядерного сглаживания с использованием кернфункции Епанечникова. Количество точек составило 50 и выбиралось из условия $min(n, 50)$ [4] (рис. 1).

Для других функций ядра (biweight, cosine, epan2, gaussian, parzen, rectangular, triangular) при 95% доверительном интервале результаты представлены на рис. 2 и визуализированы с помощью сводного графика (рис. 3). Выполнен анализ плотности распределения мгновенного риска смертности на основе метода функций ядра. Ширина полосы составила 0,0022 (рис. 4).

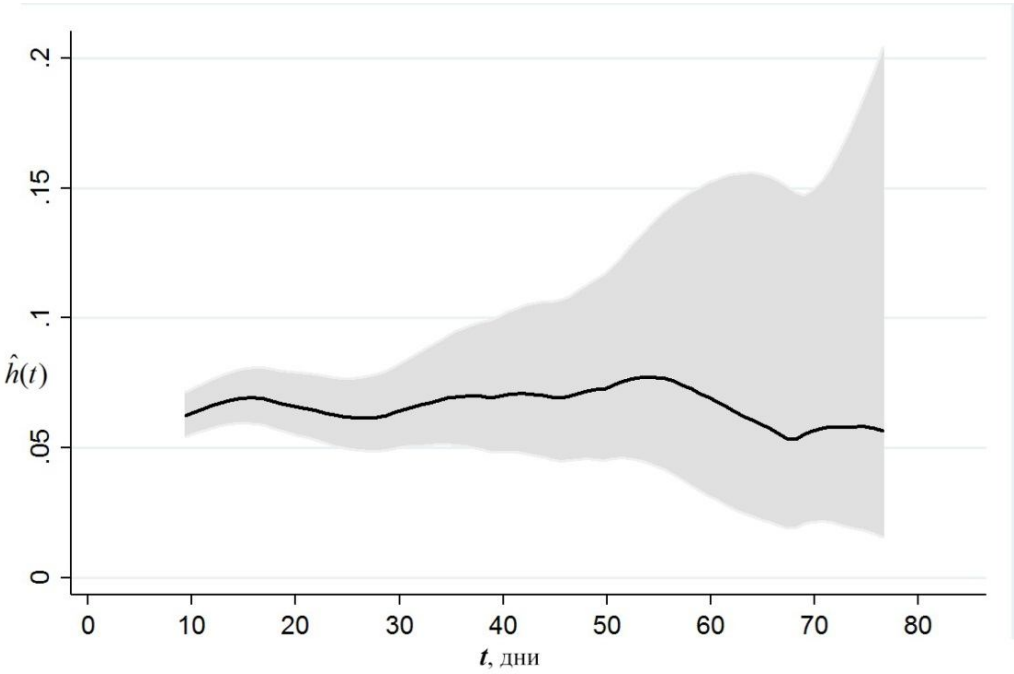


Рис. 1. Оценка функции риска с использованием кернфункции Епанечникова для когорты экстренных больных с онкопатологией (2003–2015 гг.); 95% ДИ

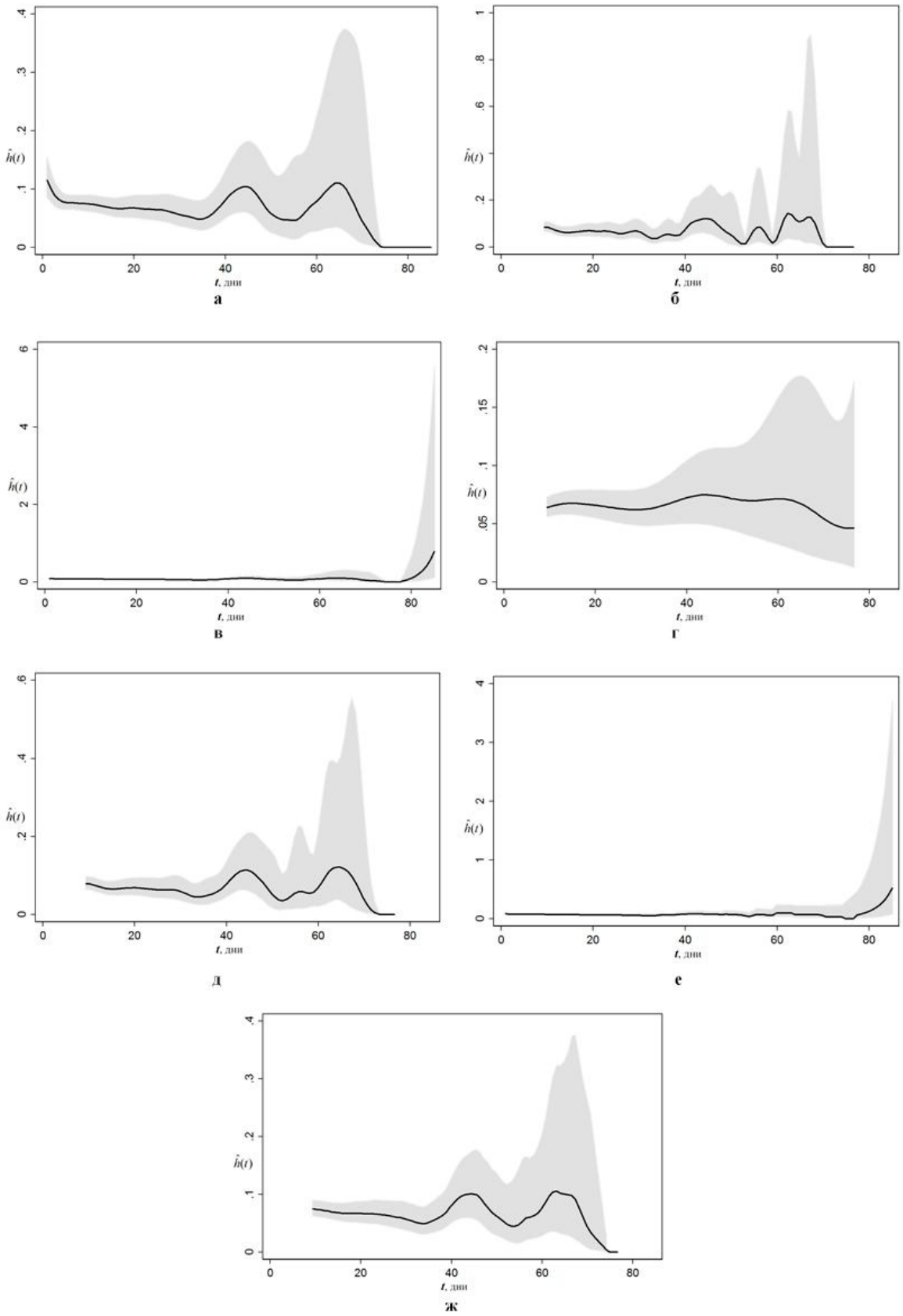


Рис. 2. Оценка функции риска по методу ядерного сглаживания с использованием кернфункций biweight (а), cosine (б), epan2 (в), gaussian (г), parzen (д), rectangular (е), triangular (ж); 95% ДИ

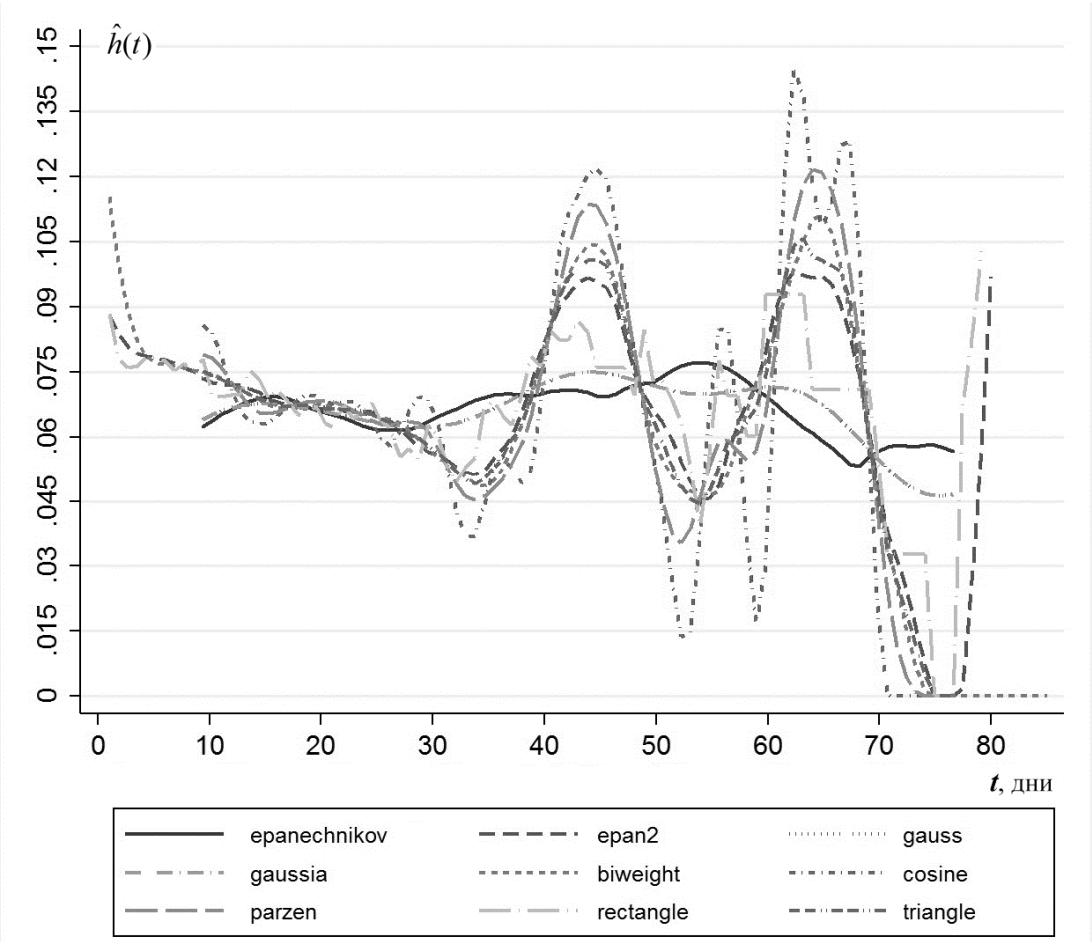


Рис. 3. Оценка функции риска по методу ядерного сглаживания с использованием кернфункций

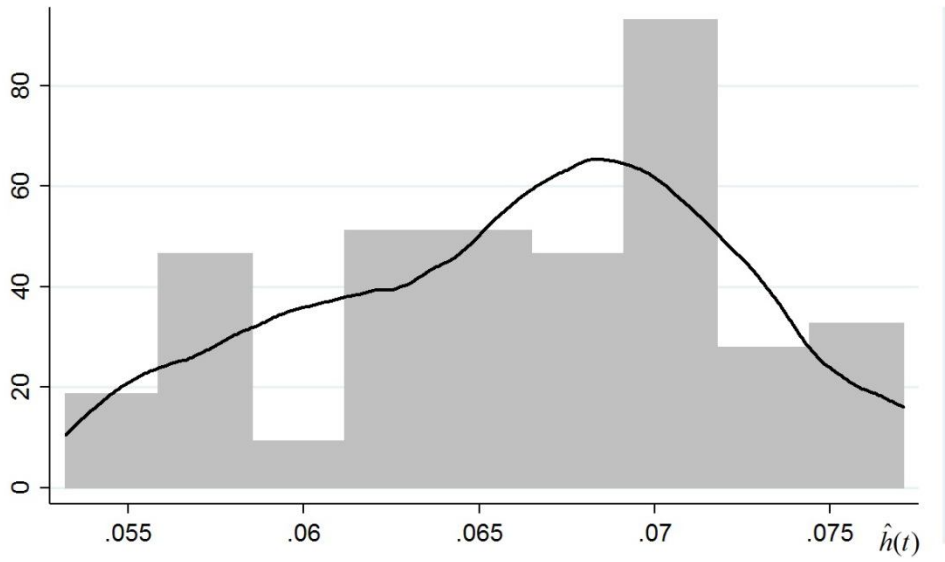


Рис.4. Плотность распределения риска смертности на основе метода функций ядра

Выводы

Выполнено экспериментальное исследование метода функций ядра. Используя сведения мониторингового медико-социологического исследования за период 2003–2015 гг., для когорты экстренных больных с онкопатологией получены точечные оценки демографического риска, которые позволяют выделить волны смертности. Значения временного аргумента двух точек максимума составляют 15 и 55 дней с момента поступления экстренного больного в хирургическое отделение. Вероятность смерти – 0,069 и 0,08 соответственно. Выполнен анализ плотности распределения мгновенного риска смертности на основе метода функций ядра. Ширина полосы составила 0,0022. Построена модель распределения, получена локальная оценка плотности ядра для центра распределения эмпирической переменной. Оценки функции риска по методу ядерного сглаживания с использованием различных функций ядра графически представлены в виде совмещенных кривых.

Моделирование демографического риска для когорты экстренных больных с онкопатологией на основе метода функций ядра в анализе времени до события повышает эффективность подготовки, принятия и исполнения управленческих решений в региональной системе медицинской профилактики при реализации концепции активного долголетия и формировании муниципальной здоровьесберегающей среды. Дальнейшие перспективы работы связаны с моделированием мгновенного риска смертности по методу ядерного сглаживания на основе кернфункций для когорты пациентов ЗНО и анализом точности метода для выборок малого объема.

Список литературы

1. An Introduction to Survival Analysis Using Stata / M. Cleves, W. Gould, R. Gutierrez, Y. Marchenko. Stata Press, College Station, TX, 2008. 372 p.

2. Вологда – город долгожителей: концепция активного долголетия на территории муниципального образования «Город Вологда» на период до 2035 года: решение Вологодской городской Думы от 29 декабря 2014 г. № 129. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

3. Stata Survival Analysis and Epidemiological Tables Reference Manual Release 13. – Stata Press, 2013. 560 p.

4. Stata Base Reference Manual Release 13. Stata Press, 2013. 2550 p.

5. Организация системы поддержки принятия решений для управления группой роботов / С. Г. Емельянов, П. В. Лоторев, А. Г. Курочкин, А. В. Гривачев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. № 3 (16). С. 30–36.

6. Прогнозирование мочекаменной болезни на основе гибридных нечетких моделей с использованием электрических характеристик биологически активных точек / Н. А. Кореневский, М. В. Бобырь, Д. А. Зубарев, И. И. Хрипина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2017. Т. 7, № 2 (23). С. 76–85.

7. Моделирование демографической ситуации в регионе с учетом эффекта запаздывания / В. В. Уварова, Д. С. Забанов, М. А. Ефремов, В. В. Жилин, С. А. Филист // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2016. № 4 (21). С. 66–75.

8. Гибридные технологии выделения медленных волн из квазипериодических сигналов / Р. А. Томакова, М. А. Ефремов, С. А. Филист, О. В. Шаталов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 1 (34). С. 66–73.

9. Cox N. J. Speaking Stata: Density probability plots // Stata Journal. 2005. No. 5. P. 259– 273.

10. Fiorio, C. V. Confidence intervals for kernel density estimation // Stata Journal. 2004. No. 4. P. 168 – 179.

11. Латыш С. К., Лезина И. В. Аппроксимация случайных процессов RBF-сетью с ядерными функциями активации // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2013. Т. 1, № 9. С. 369–370.

12. Abbott K. C., Glanton C. W., Trespalacios F. C. Body mass index, dialysis modality, and survival: Analysis of the United States renal data system dialysis morbidity and Mortality wave II study // Kidney International. 2004. No. 2, Vol. 65. P. 597–605.

13. Демин В. А., Чимитова Е. В., Щеколдин В. Ю. Исследование метода выбора оптимального параметра сглаживания при непараметрическом оценивании регрессионных моделей надежности // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2014. № 2 (27). С. 10–18.

14. Рапаков Г. Г. Методы анализа выживаемости в задачах активного долголетия (опыт г. Вологды): монография. Вологда: ВоГУ, 2015. 119 с.

15. Рапаков Г. Г., Горбунов В. А. Исследование совокупного риска при сравнении двух выборок // Информатизация процессов формирования открытых систем на основе СУБД, САПР, АСНИ и систем искусственного интеллекта: материалы восьмой международной научно-технической конференции. Вологда: ВоГУ, 2015. С. 142–146.

16. Использование компьютерного моделирования при оценке мгновенного риска смертности на основе кернфункций / В. А. Горбунов, Г. Г. Рапаков, Г. Т. Банщиков, С. В. Лукин, И. М. Ревелев // Вестник Череповецкого государственного университета. 2019. № 1 (88). С. 8–19.

17. Переварюха А. Ю. Переход к устойчивому хаотическому режиму в новой модели динамики популяции в результате единственной бифуркации // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2010. № 2. С. 117–126.

Поступила в редакцию 28.03.2019
Подписана в печать 19.04.2019

Reference

1. Cleves M., Gould W., Gutierrez R., Marchenko Y. An Introduction to Survival Analysis Using Stata. Stata Press, College Station, TX, 2008. 372 p.

2. Vologda – gorod dolgozhitelei. Kontseptsiya aktivnogo dolgoletiya na territo-rii munitsipal'nogo obrazovaniya “Gorod Vologda” na period do 2035 goda: reshenie Vologodskoi gorodskoi Dumy ot 29 dekabrya 2014 g. № 129. Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy “Konsul'tantPlyus” (In Russ.).

3. Stata Survival Analysis and Epidemiological Tables Reference Manual Release 13. Stata Press, 2013, 560 p.

4. Stata Base Reference Manual Release 13. Stata Press, 2013, 2550 p.

5. Emel'yanov S. G., Lotorev P. V., Kurochkin A. G., Grivachev A. V. Organizatsiya sistemy podderzhki prinyatiya reshenii dlya upravleniya gruppoi robotov. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2015, no. 3 (16), pp. 30–36 (In Russ.).

6. Korenevskii N. A., Bobyr' M. V., Zubarev D. A., Khripina I. I. Prognozirovanie mochekamennoi bolezni na osnove gibridnykh nechetkikh modelei s ispol'zovaniem elektricheskikh kharakteristik biologicheski aktivnykh tochek. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2017, vol. 7, no. 2 (23), pp. 76–85 (In Russ.).

7. Uvarova V. V., Zabanov D. S., Efremov M. A., Zhilin V. V., Filist S. A. Modelirovanie demograficheskoi situatsii v regione s uchetom effekta zapazdyvaniya. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University.*

Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering, 2016, no. 4 (21), pp. 66–75 (In Russ.).

8. Tomakova R. A., Efremov M. A., Filist S. A., Shatalov O. V. Gibridnye tekhnologii vydeleniya medlennykh voln iz kvaziperiodicheskikh signalov. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 1 (34), pp. 66–73 (In Russ.).

9. Cox N. J. Speaking Stata: Density probability plots. *Stata Journal*, 2005, no. 5, pp. 259–273.

10. Fiorio, C. V. Confidence intervals for kernel density estimation. *Stata Journal*, 2004, no. 4, pp. 168 – 179.

11. Latysh S. K., Lezina I. V. Approksimatsiya sluchainykh protsessov RBF-set'yu s yadernymi funktsiyami aktivatsii. Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki, 2013, vol. 1, no. 9, pp. 369–370 (In Russ.).

12. Abbott K. C., Glanton C. W., Trespalacios F. C. Body mass index, dialysis modality, and survival: Analysis of the United States renal data system dialysis morbidity and Mortality wave II study. *Kidney International*, 2004, no. 2, vol. 65, pp. 597–605.

13. Demin V. A., Chimitova E. V., Shchekoldin V. Yu. Issledovanie metoda vybora optimal'nogo parametra sglazhivaniya pri neparametricheskom otsenivanii regressionnykh modelei nadezhnosti. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, 2014, no. 2 (27), pp. 10–18 (In Russ.).

14. Rapakov G. G. Metody analiza vyzhivaemosti v zadachakh aktivnogo dolgoletiya (opyt g. Vologdy). Vologda, VoGU Publ., 2015, 119 p. (In Russ.).

15. Rapakov G. G., Gorbunov V. A. Issledovanie sovokupnogo riska pri sravnenii dvukh vyborok. Informatizatsiya protsessov formirovaniya otkrytykh sistem na osnove SUBD, SAPR, ASNI i sistem iskusstvennogo intellekta. Materialy vos'moi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Vologda, VoGU Publ., 2015, pp. 142–146 (In Russ.).

16. Gorbunov V. A., Rapakov G. G., Banshchikov G. T., Lukin S. V., Revelev I. M. Ispol'zovanie komp'yuternogo modelirovaniya pri otsenke mgnovennogo riska smertnosti na osnove kernfunktsii. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, no. 1 (88), pp. 8–19 (In Russ.).

17. Perevaryukha A. Yu. Perekhod k ustoichivomu khaoticheskomu rezhimu v novoi modeli dinamiki populyatsii v rezul'tate edinstvennoi bifurkatsii. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye nauki*, 2010, no. 2, pp. 117–126 (In Russ.).

Received 28.03.2019
Accepted 19.04.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Георгий Германович Рапаков, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Вологодский государственный университет» (ВоГУ), г. Вологда, Российская Федерация,
e-mail: grapakov@yandex.ru

Georgiy G. Rapakov, PhD in Technical Science, Associate Professor, Information Science and Information Technology Department, Vologda State University, Vologda, Russian Federation,
e-mail: grapakov@yandex.ru

Вячеслав Алексеевич Горбунов, доктор физико-математических наук, профессор, Председатель Вологодского отделения Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ). Профессор кафедры информатики и информационных технологий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Вологодский государственный университет» (ВоГУ), г. Вологда, Российская Федерация,
e-mail: gorbunov1945@inbox.ru

Vyacheslav A. Gorbunov, Doctor of Physico-Mathematical Science, Professor, Information Science and Information Technology Department, Head of MANEB Vologda Department (International Academy of Ecology and Life Protection Science), Vologda State University, Vologda, Russian Federation,
e-mail: gorbunov1945@inbox.ru

Кенгес Абдалович Абдалов, доктор медицинских наук, Заведующий хирургическим отделением № 2, Бюджетное учреждение здравоохранения Вологодской области «Вологодская городская больница № 1», г. Вологда, Российская Федерация,
e-mail: muzgb1@inbox.ru

Kenges A. Abdalov, Doctor of Medicine, M.D., Surgical Department № 2, Head of Department, Vologda Municipal Hospital № 1, Vologda, Russian Federation,
e-mail: muzgb1@inbox.ru

УДК 57.087

Метод синтеза математических моделей прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний работников предприятий электроэнергетики

Н. А. Кореневский[1]✉ , М. А. Мясоедова[2], К. В. Разумова[1], А. В. Серебровский[1]

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Российская Федерация, 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

[2] ФГБОУ ВО «Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова», Российская Федерация, 305021, г. Курск, ул. Карла Маркса, 70

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Резюме

Цель исследования *– разработка метода синтеза математических моделей прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний работников электроэнергетической отрасли, позволяющих получать решающие правила, обеспечивающие приемлемое для профилактической медицины качество принятия решений.*

Методы*. С учетом неполного и нечёткого описания исследуемого класса заболеваний в качестве базового математического аппарата выбрана технология мягких вычислений и, в частности, методология синтеза гибридных нечетких решающих правил, хорошо зарекомендовавшая себя при решении задач с аналогичной структурой данных и типом неопределенности.*

Предлагаемый метод синтеза позволяет учитывать мультипликативный эффект воздействия на организм человека электромагнитных полей различной модальности и интенсивности с учетом других эндогенных и экзогенных факторов риска.

Результаты*. Предложенный метод синтеза математических моделей прогнозирования и диагностики заболеваний работников предприятий электроэнергетической отрасли апробирован на синтезе математической модели прогнозирования и развития заболеваний нервной системы с учетом воздействия на организм человека электромагнитного поля промышленной частоты и индивидуальных факторов риска.*

В ходе математического моделирования и экспертного оценивания было показано, что полученная прогностическая модель обеспечивает уверенность в правильном прогнозе нервных болезней у работников предприятий электроэнергетики не ниже 0,85, что является достаточно «хорошим» результатом для задач медицинской диагностики.

Заключение*. В работе получены нечёткие математические модели прогнозирования появления и развития нервных болезней у работников электроэнергетики, где ведущим фактором риска является электромагнитное поле промышленной частоты в сочетании с индивидуальным фактором риска. В ходе экспертного оценивания и математического моделирования показано, что уверенность в правильном принятии решений по прогнозу и развитию заболеваний нервной системы превышает величину 0,85, что позволяет рекомендовать полученные результаты в практику работы профильных врачей профпатологов.*

Ключевые слова*: метод; математическая модель; нечеткая логика; прогнозирование; диагностика; электроэнергетика; профессиональные заболевания.*

© Кореневский Н. А., Мясоедова М. А., Разумова К. В., Серебровский А. В., 2019

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: Метод синтеза математических моделей прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний работников предприятий электроэнергетики / Н. А. Кореневский, М. А. Мясоедова, К. В. Разумова, А. В. Серебровский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 2 (31). С. 127–143.

UDC 57.087

Method for Synthesis of Mathematical Models for Predicting and Diagnostics of Professional Diseases of Workers of Electronics Enterprises

N. A. Korenevsky[1]✉, M. A. Myasoedova[2], K. V. Razumova[1], A. V. Serebrovsky[1]

[1] Southwest State University, 94, 50 Let Oktyabrya str., Kursk, 305040, Russian Federation

[2] Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov, 70, Karla Marksa str., Kursk, 305041, Russian Federation

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Abstract

Purpose of research*. The purpose of the study is to develop a method for synthesizing mathematical models for predicting and diagnosing occupational diseases of workers in the electric power industry, which allows them to obtain decisive rules that ensure acceptable decision-making quality for preventive medicine.*

Methods*. Taking into account the incomplete and fuzzy description of the studied class of diseases, have chosen the soft computing technology and, in particular, the methodology for the synthesis of hybrid fuzzy decision rules, which has proven itself in solving problems with a similar data structure and type of uncertainty, as the basic mathematical apparatus.*

The proposed method of synthesis allows to take into account the multiplicative effect of exposure to the human body of electromagnetic fields of various modality and intensity, taking into account external influences and other endogenous and exogenous risk factors.

Results*. The proposed method for the synthesis of mathematical models for predicting and diagnosing diseases of employees of enterprises of the electric power industry has been tested on the synthesis of a mathematical model for forecasting and developing diseases of the nervous system, taking into account the effects on the human body of the electromagnetic field of industrial frequency and individual risk factors.*

In the course of mathematical modeling and expert assessment, it was shown that the prognostic model obtained provides confidence in the correct prediction of the emergence and development of nervous diseases and employees of a power industry enterprise not lower than 0.85, which is a fairly "good" result for medical diagnostics tasks.

Conclusion*. The paper obtained fuzzy mathematical models for predicting and developing nervous diseases in electric power industry workers, where the leading risk factor is the electromagnetic field of industrial frequency combined with an individual risk factor. In the course of expert assessment and mathematical modeling, it was shown that confidence in the correct decision making on the prognosis and development of diseases of the nervous system exceeds 0.85, which makes it possible to recommend the results obtained in the practice of specialized pathologists.*

Keywords: *method; mathematical model; fuzzy logic; prediction; diagnostics; electrical examination; occupational diseases.*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Korenevsky O. N., Myasoedova M. A., Razumova K. V., Serebrovsky A. V. Method for Synthesis of Mathematical Models for Predicting and Diagnostics of Professional Diseases of Workers of Electronics Enterprises. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, 9(2): 127–143 (In Russ.).

***

Введение

Возрастающие темпы роста научно-технического процесса требуют значительных энергетических ресурсов, вырабатываемых предприятиями электроэнергетики различных типов и назначений.

Многочисленные исследования отечественных и зарубежных ученых показывают, что электромагнитные волны промышленной частоты (50 Гц) способствуют появлению и развитию профессиональных заболеваний, которые дополнительно провоцируются такими факторами риска, как неблагоприятный микроклимат, повышенные уровни шума и вибрации, содержание вредных химических веществ в воздухе рабочей зоны, повышенное психоэмоциональное напряжение из-за постоянного ожидания возможных аварийных ситуаций и поражения электрическим током и т. д.

Часто вместе с основным промышленным электромагнитным полем частотой в 50 Гц на организм человека воздействуют сочетанные и смешанные электромагнитные поля, способные вызвать мультипликативный эффект воздействия на организм человека, приводя к повышенным рискам профессиональной заболеваемости [1, 2, 3, 4, 5].

В сочетании с индивидуальными особенностями организма производственные факторы риска приводят к появлению и развитию заболеваний нервной и иммунной систем, которые в свою очередь провоцируют заболевания сердечно-сосудистой и мочеполовой систем, систем дыхания и пищеварения.

Одним из способов повышения качества медицинского обслуживания работников, занятых в электроэнергетике, является современное выявление отрицательных тенденций в организме человека под воздействием комплекса эндогенных и экзогенные факторов риска с последующей оптимизацией схем профилактики и лечения профессиональных заболеваний исследуемого контингента работников.

Материалы и методы

Анализ литературных данных и собственные исследования показали, что задачи прогнозирования появления и развития выбранных типов заболева-

ний относятся к классу плохоформализуемых задач с неполной и нечеткой структурой данных [6, 7, 8, 9].

В этих условиях в соответствии с рекомендациями [10–23] в качестве базового математического аппарата была выбрана методология синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), общие положения которой описаны в работах [24, 6, 7].

В данной работе с учетом специфики воздействия электромагнитных полей (ЭМП) разной модальности и интенсивности на организм человека предлагается конкретизация МСГНРП применительно к рассматриваемому типу задач, которая оформлена в виде метода состоящего из следующих основных этапов:

Формируется группа экспертов, имеющих опыт синтеза гибридных нечетких решающих правил для прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний, понимающих механизмы воздействия на человека электромагнитных полей, владеющих методами системного анализа в биомедицинских исследованиях и подготовленных к экспертной работе по методу Дельфи. Количественный и качественный состав экспертной группы определяется требованиями, принятыми в квалиметрии [25, 26].

Определяется тип предприятий электроэнергетики, (теплоэлектростанции (ТЭС), атомные электростанции (АЭС), гидроэлектрические станции (ГЭС), электрические подстанции, обслуживание высоковольтных линий электропередач (ЛЭП) и др.). Для выбранного типа предприятий определяется спектр частот электромагнитного воздействия, средняя мощность и индивидуальное (персональное для каждого работника) оценочное время воздействия.

При синтезе элементов нечетких решающих правил, учитывающих влияние электромагнитных излучений на организм человека, следует учитывать нелинейный характер рисков, который характеризуется тем, что при малом времени даже очень интенсивных воздействий риск возникновения профессиональных заболеваний практически отсутствует, а по мере увеличения этого времени риск появления и развития заболеваний нервной и иммунной систем растет существенно нелинейно, имея естественней порог «насыщения» при возникновении профессиональной патологии.

Изучаются условия труда в конкретных производственных условиях и определяются производственные факторы риска (кроме электромагнитных полей), порождающие появление и развитие профессиональных заболеваний. Анализ источников литературы и собственные наблюдения позволили сделать вывод, что наибольшие риски (при отсутствии чрезвычайных ситуаций) характерны для тепловых электростанций (микроклимат с повышенной температурой и сквозняками, высокий уровень шумов и вибрация (паровые кот-

лы, мельницы помола угля, насосы, вентиляторы и др.), содержание в воздухе некоторых цехов химических веществ (бензапирен, диоксид озота и серы, фенол, оксид углерода, токсичная пыль и др.).

По выделенным факторам риска формируется алфавит классов исследуемых профессиональных заболеваний. Считается, что в условиях ТЭС повышены риски онкологических заболеваний, заболеваний системы дыхания, вибрационная болезнь, кохлеарный неврит, заболевания нервной системы, заболевания, вызываемые интоксикацией, и др.

Изучаются дополнительные экологические и природные факторы риска, не связанные с производством и транспортировкой электроэнергии, по которым уточняется список алфавита исследуемых классов состояния здоровья.

Для выбранных классов заболеваний в соответствии с рекомендациями [6, 13, 7, 27, 28, 8] определяются индивидуальные факторы риска и списки показателей, которые с учетом имеющихся медико-технических и экологических ограничений целесообразно измерять у обследуемых традиционными методами, а с учетом рекомендаций [11, 29, 30, 31, 32], возможное применением методов рефлексодиагностики.

При наличии медико-технологических возможностей организуется независимое наблюдение за состоянием здоровья обследуемых с целью установления точных диагнозов.

Наличие независимых средств принятия решений о состоянии здоровья и его изменениях позволяет сформировать обучающие и контрольные выборки, позволяющие исследовать структуру изучаемых классов состояний с формированием рекомендаций по синтезу искомых решающих правил, а так же произвести статистическую проверку качества работы синтезированных решающих правил в соответствии с общей методологией синтеза гибридных нечетких решающих правил [24, 6, 14, 7, 15, 19, 20, 21, 22, 23].

С учетом того, что сочетанные и смешанные воздействия электромагнитных полей в сочетании с другими факторами риска могут вызвать мультипликативный эффект в изменении состояния здоровья и функционального состояния работников, обслуживающих энергопредприятия, энергоустановки и линии электропередач, в аппарат разведочного анализа необходимо включить нечеткую модификацию метода группового учета аргументов ориентированного (в составе общей методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил) на выявление возможных мультипликативных связей между исследуемыми классами состояний и исследуемой структурой признаков (факторов риска) с получением частных и (или) финальных правил принятия решений

включая задачи прогнозирования и ранней диагностики [6, 7, 8].

Синтез частных решающих правил производится с учетом наличия репрезентативных обучающих выборок и компетенции экспертов.

При наличии репрезентативных обучающих выборок с использованием алгоритмов МГУА устанавливаются взаимосвязи между выбранными диапазонами частот $\left(\Delta f_j\right)$; средними мощностями излучений, воздействующих на человека на этих частотах P_j; стажем работы в течение которого обследуемый находился в зоне воздействия диапазона $\Delta f_j - T_j$ и откликом в виде прогнозов и ранних диагнозов по классу ωℓ.

В соответствии с методикой, описанной в работах [6, 7], определяется частная уверенность UEPℓ в прогнозе (раннем диагнозе) заболеваний класса ωℓ в виде выражения

$$UEP_\ell = \max_r \left[\mu_{r_\ell}\left(Z_{r_\ell}\right)\right], \qquad (1)$$

где Z_{r_ℓ} – базовая переменная, определяемая полиномами Колмогорова-Габора для модели с номером r в классе ωℓ.

В общем виде базовая переменная Z_{r_ℓ} является функционалом от параметров $\Delta f_j, P_j$ и T_j, то есть

$$Z_{r_\ell} = F_{r_\ell}\left(\Delta f_j, P_j, T_j\right),$$

где F_{r_ℓ} – функции связи между базовой переменной, параметрами электромагнитных полей и стажем работы; $j = 1,....,m,$ m – число исследуемых частотных диапазонов (составляющих) с обязательным включением основной генерируемой частоты (50 Гц) и при необходимости постоянного магнитного поля, являющегося внешним экологическим фактором.

В работах [6, 7] дается развернутое описание процедур синтеза нечетких моделей принятия решений на базе МГУА. При наличии репрезентативной обучающей выборки модель (1) будет наиболее точной, но её синтез требует проведения большой и продолжительной исследовательской работы, значительных трудовых и временных ресурсов при наличии кадров соответствующей квалификации.

Приемлемые по точности модели с меньшими ресурсами для ее синтеза могут быть получены исходя из предположения, что для каждого из выбранных частотных диапазонов на конкретных рабочих местах может быть определена средняя напряженность электрического E и магнитного H полей, причем в соответствующих санитарных нормах и правилах определены предельно допустимые уровни этих полей и приводится список патологий, характерных для воздействия полей промышленной частоты (50 Гц) и радиочастотного диапазона.

Для постоянного магнитного поля, характерного для некоторых регионов расположения предприятий электро-

энергетики, основным фактором риска является напряженность магнитного поля H_0, а соответствующие стандартные нормы и правила устанавливают предельно допустимый уровень для производственных условий.

Для Курской магнитной аномалии напряженность геомагнитного поля земли достигает 2 Эрстсда при пороговом значении 0,45 Эрстсда, что соответствует 35,8 А/м.

С учетом сказанного и с учетом рекомендаций [6, 7, 8] в качестве базовых переменных для построения функций принадлежности $\mu_{\ell_j}\left(Z_{\ell_j}\right)$ целесообразно использовать выражение

$$Z_{\ell_j} = f_{\ell_j}\left(\frac{\mathrm{Q}_j}{\mathrm{Q}_j^{\Pi}}\right)\cdot f^*_{\ell_j}\left(t_j\right), \qquad (2)$$

где Q_j – среднее значение характеристик электромагнитного поля частотного диапазона Δf_j (Ej и Hj для электромагнитных полей промышленных и радиочастот, H_{0_j} – средняя напряженность постоянного магнитного поля земли; Q_j^{Π} – предельно допустимый уровень напряженности; t_j – время нахождения человека в зоне действия электромагнитного (магнитного) поля диапазона Δf_j; $f_{\ell_j}(\cdot)$ – нормировочная функция степени влияния электромагнитного поля диапазона Δf_j на появление и развитие заболевания $\omega\ell$ с областью определения [0,…,1]; $f^*_{\ell_j}\left(t_j\right)$ – нормировочная функция степени влияния времени нахождения обследуемого под воздействием электромагнитного (магнитного) поля диапазона Δf_j.

При построении графиков функций принадлежности $\mu_{\ell_j}\left(Z_{\ell_j}\right)$ эксперты руководствуются данными литературы, собственными знаниями о частоте заболеваний ω_ℓ, вызываемых действием электромагнитных полей различной модальности, интенсивности и длительности.

«Хорошей» подсказкой для построения соответствующих графиков является наличие гистограмм распределения объектов из исследуемых классов состояний по шкалам Q_j, t_j, и Z_{ℓ_j}. Рекомендации по построению графиков $\mu_{\ell_j}\left(Z_{\ell_j}\right)$ с получением соответствующих аналитических моделей приведены в работах [6, 7].

Агрегация этих функций принадлежности осуществляется в соответствии с общей методологией синтеза гибридных нечетких решающих правил:

$$UEP_\ell = F_{\ell Ag}\left[\mu_{\ell j}\left(Z_{\ell j}\right)\right], \qquad (3)$$

где $F_{\ell Ag}$ – функция агрегации по всем выбранным диапазонам частот Δf_j по классу ω_ℓ.

При недостатке информации об искомых свойствах функций агрегации целесообразно проверить качество ра-

боты агрегатора на основе модифицированной формулы Е. Шортлифа.

$$UEP_\ell(p+1) = UEP_\ell(p) + \\ +\mu_{\ell(j+1)}\left(Z_{\ell(j+1)}\right)\left[1 - UEP_\ell(p)\right], \quad (4)$$

где p – номер итерации; $UEP_\ell(0) = \mu_{\ell 1}(Z_{\ell 1})$; j=1 – для наиболее «существенного» диапазона частот Δf_1.

Формула (4) учитывает возможное нелинейное влияние входящих в неё параметров на появление и развитие заболеваний ωℓ своим нелинейным свойством и нелинейными характеристиками входящих в неё функций.

При наличии репрезентативных контрольных выборок следует проверить качество работы модели типа (4) и при необходимости скорректировать параметры $\mu_{\ell j}(Z_{\ell j})$ в сторону минимизации количества ошибок, а при необходимости дальнейшего увеличения качества принятия решений проверить эффективность агрегаторов на основе нечетких модификаций МГУА и теории измерения латентных переменных [6, 7].

Определяются дополнительные факторы риска, связанные с экологией, эргономикой и образом жизни обследуемых (употребление алкоголя, табакокурение, наследственность и т. д.).

При этом следует иметь в виду, что действие значительного числа факторов риска на здоровье человека определяется двумя параметрами: величиной (уровнем, концентрацией и др.) и временем воздействия. Для таких факторов риска целесообразно базовые переменные Yj соответствующих функций принадлежности определять через нормировочные функции $f_{\ell i}(X_i)$ степени влияния среднего значения параметра Xi на появление и развитие заболевания ωℓ и нормировочные функции $f_{\ell i}(t)$ степени влияния времени соответствующего параметра Xi на появление и развитие патологии ωℓ, т. е.

$$Y_i = f_{\ell i}(X_i) \cdot f_{\ell i}(t), \quad (5)$$

где область определения нормирующих функций удобно выбрать в интервале [0,….,1].

По вычисляемым и выбранным базовым переменным, используя общие рекомендации методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил, определяются соответствующие функции принадлежности $\mu_{\omega_\ell}(Y_i)$, которые агрегируются в частные решающие правила вида

$$UV_\ell = F_{\ell V}\left[\mu_{\omega_\ell}\left(Y_i\right)\right], \quad (6)$$

где $F_{\ell V}$ – соответствующая функция агрегации.

Определяется алфавит признаков Sr, которые могут быть измерены с использованием инструментальных и лабораторных методов исследования, включая (по возможности) измерение электрических характеристик БАТ, по которым определяются соответствующие функции принадлежности $\mu_{\omega_\ell}(S_r)$

с их агрегацией в частные решающие правила вида

$$UD_\ell = F_{\ell D}\left[\mu_{\omega_\ell}\left(S_r\right)\right], \qquad (7)$$

где $F_{\ell D}$ – соответствующая функция агрегации.

Полученные частные решающие правила агрегируются в финальное решающее правило типа:

$$UF_\ell = F_{F\ell}\left[UEP_\ell, UV_\ell, UD_\ell\right]. \qquad (8)$$

В алфавите признаков S_r целесообразно использовать показатели, характеризующие функциональное состояние и функциональный резерв организма и (или) его систем.

При наличии обучающих выборок параметры полученных решающих правил могут быть скорректированы в сторону минимизации ошибок принятия решений с помощью специализированного пакета прикладных программ кафедры БМИ ЮЗГУ [6, 7].

Результаты и их обсуждение

В качестве конкретного примера решается задача синтеза математической модели прогнозирования заболеваний нервной системы, провоцируемых действием электромагнитного поля промышленной частоты с учетом индивидуальных факторов риска.

Для синтеза прогностического решающего правила по электромагнитной составляющей промышленной частоты выбрана математическая модель (3), для которой определенные нормирующие функции вида:

$$f_{H50}\left(E_{50}/E_{50}^{П}\right) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_1 < 0,5; \\ 0,4x_1 - 0,2, & \text{если } 0,5 \le x_1 < 3; \\ ЗС, & \text{если } x_1 \ge 3, \end{cases}$$

$$f_{H50}(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t < 1; \\ 0,031(t-1)^2, & \text{если } 1 \le t < 5; \\ 1 - 0,031(t-9)^2, & \text{если } 5 \le t < 9; \\ 1, & \text{если } x_1 \ge 9, \end{cases}$$

где E50 – электрическая напряженность электромагнитного поля промышленной частоты (50 Гц); $x_1 = E_{50}/E_{50}^{П}$; ЗС – запрещена работа без защитных средств.

Функция принадлежности к уверенности в появлении и развитии заболеваний нервной системы (класс ω_H) от действия ЭМП промышленной частоты аналитически описывается выражением

$$\mu_{H50}\left(Z_{H50}\right) = \begin{cases} 0, & \text{если } Z < 1; \\ 3,06\left(Z_{H50} - 0,1\right)^2, & \text{если } 0,1 \le Z_{H50} < 0,4; \\ 0,55 - 3,06\left(Z_{H50} - 0,7\right)^2, & \text{если } 0,4 \le Z_{H50} < 0,7; \\ 0,55, & \text{если } Z_{H50} \ge 0,7. \end{cases}$$

В соответствии с рекомендациями [27, 17] в качестве индивидуальных факторов риска по классу ωH выбраны признаки: прием лекарственных средств, оказывающих вредное воздействие на нервную систему; прием алкоголя; психоэмоциональные нагрузки; болезни нервной системы у близких родственников; разбаланс энергетических характеристик меридианных БАТ, связанных с ситуацией болезни нервной системы.

В работах [6, 27] по этому набору признаков описана математическая модель расчета уверенности в появлении и развитии заболеваний нервной системы UPH.

Агрегация UEPH и UPH дает финальную прогностическую модель вида:

$$UHB = UEP_H + \\ +UPH - UEP_H \cdot UPH. \quad (9)$$

В ходе математического моделирования и экспертного оценивания было показано, что модель (9) обеспечивает уверенность в правильном прогнозе появления и рецидива нервных болезней и работников предприятия электроэнергетики не ниже 0,85, что является достаточно «хорошим» результатом для задач медицинской диагностики.

Выводы

В работе получены нечеткие математические модели прогнозирования и развития нервных болезней у работников электроэнергетики, где ведущий фактором риска является электромагнитное поле промышленной частоты в сочетании с индивидуальным фактором риска. В ходе экспертного оценивания и математического моделирования показано, что уверенность в правильном принятии решений по прогнозу появления и развития заболеваний нервной системы превышает величину 0,85, что позволяет рекомендовать полученные результаты в практику работы профильных врачей профпатологов.

Список литературы

1. Амиров Н. Х., Илюхин Н. Е., Русин М. Н. Значение электромагнитных полей 50 Гц в формировании экологии окружающей среды и профессиональной деятельности оперативных работников энергообъектов // Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований: труды всероссийской научной конференции. Т. IY: Экологическая безопасность, инновации и устойчивое развитие. Образование для устойчивого развития. Казань, 2009. С. 17–20.

2. Амиров Н. Х., Русин М. Н., Илюхин Н. Е. Гигиеническая оценка суточной экспозиции ЭМП 50Гц оперативного персонала энергообъектов // Материалы Всероссийской конференции, посвящённой 85-летию ГУ НИИ МТ РАМН «Медицина труда: Реализация Глобального плана действий по здоровью работающих на 2008–2017 гг.». М., 2008. С. 275–276.

3. Аналитический доклад объединения РаЭл. «Вопросы сохранения и укрепления здоровья работающих, состояние профессиональных заболеваний в электроэнергетике». М., 2008. URL: http//www.rael.elektra.ru.

4. Кореневский Н. А., Авилова И. А. Магнитные и электромагнитные поля как экологический фактор внешней и производственной среды // Материалы международной НТК «Проблемы региональной экологии». Израиль, Тель-Авив, 1999. С. 28–31.

5. СанПИн 2.2.4.1191-03. Физические факторы производственной среды. Электромагнитные поля в производственных условиях: утв. Главным государственным врачем Российской Федерации, первым заместителем министра здравооохранения Российской Федерации Г.Г. Онищенко 30.01.2003. URL: http//www/vrednost.ru / 2241191 – 03.php.

6. Оценка и управление состоянием здоровья обучающихся на основе гибридных интеллектуальных технологий: монография / Н. А. Кореневский, А. Н. Шуткин, С. А. Горбатенко, В. И. Серебровский. Старый Оскол: ТНТ, 2016. 472 с.

7. Кореневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.

8. Степашов Р. В., Кореневский Н. А., Потапова Е. С. Синтез решающих правил для прогнозирования и диагностики заболеваний сельскохозяйственных рабочих контактирующих с ядохимикатами // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2018. Т. 17. № 3. С. 709–717.

9. Танака К. Итоги рассмотрения факторов неопределенности и неясности в инженерном искусстве // Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения: [пер. с англ.] / под ред. Р.Р. Ягеря. М.: Радио и связь, 1986. 408 с.

10. Кореневский Н. А. Проектирование нечетких решающих сетей, настраиваемых по структуре данных для задач медицинской диагностики // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. М., 2005. Т. 4, № 1. С. 12–20.

11. Кореневский Н. А., Крупчатников Р. А., Аль-Касасбех Р. Т. Теоретические основы биофизики акупунктуры с приложениями в медицине, психологии и экологии на основе нечетких сетевых моделей. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 528 с. ISBN 978-5-94178-398-4.

12. Кореневский Н. А. Метод синтеза гетерогенных нечетких правил для анализа и управления состоянием биотехнических систем // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 2. С. 99–103.

13. Кореневский Н. А. Принципы и методы построения интерактивных систем диагностики и управления состоянием здоровья человека на основе полифункциональных моделей: автореф. дис. … доктора техн. наук. СПб., 1993. 32 с.

14. Кореневский Н. А., Крупчатников Р. А., Горбатенко С. А. Синтез нечетких сетевых моделей, обучаемых по структуре данных для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2008. № 2. С. 18–24.

15. Кореневский Н. А., Разумова К. В. Синтез нечетких классификационных правил в многомерном пространстве признаков для медицинских приложений // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2. Ч. 1. С. 223–227.

16. Нечеткие модели оценки уровня эргономики технических систем и её влияния на состояние здоровья человека оператора с учетом функционального резерва его организма / Н. А. Кореневский, С. Н. Родионова, Т. Н. Говорухина, М. А. Мясоедова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Выпуск 1. URL: https://moit. vivt.ru.

17. Использование технологий мягких вычислений для пронозирования и диагностики профессиональных заболеваний работников агропромышленного комплекса: монография / Р. В. Степашов, Н. А. Кореневский, А. В. Серебровский, Т. Н. Говорухина. Курск, 2016. 224 с.

18. Шуткин А. Н., Кореневская С. Н., Федянин В. В. Проектирование баз знаний медицинских экспертных систем с использованием коллективов нечетких правил // Информационные проекты в медицине и педагогике: материалы международной научно-практической конференции. М., 2014. С. 61–64.

19. Al-Kasabeh R.T., Korenevskiy N.A., Ionescu F., Kuzmin A.A. Synthesis of combined fuzzy decision rules based on the exploration analysis data. Proc. 4th IAFA Intern. Conference Interdisciplinary Approaches in Fractal Analysis. Bucharest, Romania, May 26-29, 2009. P. 71–78. ISSN 2066-4451.

20. Use of an Interactive Method for Classification in Problems of Medical Diagnosis / N. A. Korenevsky, S. V. Degtyarev, S. P. Seregin, A. V. Novikov // Biomedical Engineering November. 2013. Vol. 47, is. 4. P. 169–172.

21. Design of network-based fuzzy knowledge bases for medical decision-making support systems / N. A. Korenevsky, S. A. Gorbatenko, R. A. Krupchatnikov, M. I. Lukashov // Biomedical Engineering. 2009. Vol. 43, no. 4. P. 187–190.

22. Korenevskiy N. A., Krupchatnikov R. A., Gorbatenko S. A. Generation of fuzzy network models taught on basic of data structure for medical expert systems, Biomedical Engineering Journal. Vol.42, no. 2. P. 67–72.

23. Korenevskiy N. A. Application of Fuzzy Logic for Decision-Making in MedicalExpert Systems // Biomedical Engineering. May 2015. Vol. 49. P. 46–49.

24. Кореневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1 (289). С. 33–35.

25. Кореневский Н. А., Юлдашев З. М. Проектирование биотехнических систем медицинского назначения. Общие вопросы проектирования. Старый Оскол: ТНТ, 2018. 312 с.

26. Методика применения экспертных методов для оценки качества продукции. М.: Стандарт, 1975. 31 с.

27. Кореневский Н. А. Прогнозирование и диагностика заболеваний, вызываемых вредными производственными и экологическими факторами на основе гетерогенных моделей / Н. А. Кореневский, Н. А. Серебровский, В. И. Коптева, Н. А. Говорухина. Курск, 2012. 231 с.

28. Синтез комбинированных нечетких решающих правил для прогнозирования послеоперационных осложнений в урологии / С. П. Серегин, С. Д. Долженков, С. Н. Кореневская, Т. Н. Сапитонова // Известия Юго-Западного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2. Ч. 3. С. 293–297.

29. Кореневский Н. А., Крупчатников Р. А. Информационно-интеллектуальные системы для врачей рефлексотерапевтов: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 424 с.

30. Кореневский Н. А., Буняев В. А., Крупчатников Р. А. Синтез прогностических и диагностических нечетких решающих правил по электрическим характеристикам проекционных зон для медико-экологических приложений // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2009. № 4. С. 39–46.

31. Кореневский Н. А., Гадалов В. Н., Снопков В. Н. Математические модели рефлекторных систем организма человека и их использование для прогнозирования и диагностики заболеваний // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2012. Т. 11, № 2. С. 515–521.

32. Al-Kasasbeh R., Korenevskiy, N., Ionescou, F., Alshamasin M. Kuzmin, A. Synthesis of fuzzy logic for prediction and medical diagnostics by Energy Characteristics of Acupuncture Points // Journal of Acupuncture and Meridian Studies. Korea. 2011. Vol. 4, № 3. P. 175–182.

Поступила в редакцию 20.03.2019
Подписана в печать 26.04.2019

Reference

1. Amirov N. H., Ilyukhin N. E., Rusin M. N. Znachenie elektromagnitnykh polei 50 Gts v formirovanii ekologii okruzhayushchei sredy i professional'noi deyatel'nosti operativnykh rabotnikov energoob"ektov. Okruzhayushchaya sreda i ustoichivoe razvitie regionov: novye

metody i tekhnologii issledovanii: trudy vserossiiskoi nauchnoi konferentsii. T. IY: Ekologicheskaya bezopasnost', innovatsii i ustoichivoe razvitie. Obrazovanie dlya ustoichivogo razvitiya. Kazan', 2009, pp. 17–20 (In Russ.).

2. Amirov N. H., Rusin M. N., Ilyukhin N. E. Gigienicheskaya otsenka sutochnoi ekspozitsii EMP 50Gts operativnogo personala energoob"ektov. Materialy Vserossiiskoi konferentsii, posvyashchennoi 85-letiyu GU NII MT RAMN “Meditsina truda: Realizatsiya Global'nogo plana deistvii po zdorov'yu rabotayushchikh na 2008–2017 gg.”. Moscow, 2008, pp. 275–276 (In Russ.).

3. Analiticheskii doklad ob"edineniya RaEl. “Voprosy sokhraneniya i ukrepleniya zdorov'ya rabotayushchikh, sostoyanie professional'nykh zabolevanii v elektroenergetike”. Moscow, 2008. (In Russ.). Available at: http//www.rael.elektra.ru.

4. Korenevskii N. A., Avilova I. A. Magnitnye i elektromagnitnye polya kak ekologicheskii faktor vneshnei i proizvodstvennoi sredy. Materialy mezhdunarodnoi NTK “Problemy regional'noi ekologii”. Izrail', Tel'-Aviv, 1999, pp. 28–31 (In Russ.).

5. SanPIn 2.2.4.1191-03. Fizicheskie faktory proizvodstvennoi sredy. Elektromagnitnye polya v proizvodstvennykh usloviyakh: utv. Glavnym gosudarstven-nym vrachem Rossiiskoi Federatsii, pervym zamestitelem ministra zdravoookhraneniya Rossiiskoi Federatsii G.G. Onishchenko 30.01.2003. Available at: http//www/vrednost.ru / 2241191 – 03.php (In Russ.).

6. Korenevskii N. A., Shutkin A. N., Gorbatenko S. A., Serebrovskii V. I. Otsenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya obuchayushchikhsya na osnove gibridnykh intellektual'nykh tekhnologii. Staryi Oskol, TNT Publ., 2016, 472 p. (In Russ.).

7. Korenevskii N. A., Rodionova S. N., Khripina I. I. Metodologiya sinteza gi-bridnykh nechetkikh reshayushchikh pravil dlya meditsinskikh intellektual'nykh sistem podderzhki prinyatiya reshenii. Staryi Oskol, TNT Publ., 2019, 472 p. (In Russ.).

8. Stepashov R. V., Korenevskii N. A., Potapova E. S. Sintez reshayushchikh pravil dlya prognozirovaniya i diagnostiki zabolevanii sel'skokhozyaistvennykh rabochikh kontaktiruyushchikh s yadokhimikatami. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh*, 2018, vol. 17, no. 3, pp. 709–717 (In Russ.).

9. Tanaka K. Itogi rassmotreniya faktorov neopredelennosti i neyasnosti v inzhenernom iskusstve. Nechetkie mnozhestva i teoriya vozmozhnostei. Poslednie dostizheniya; ed. by Yagerya R. R. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986, 408 p. (In Russ.).

10. Korenevskii N. A. Proektirovanie nechetkikh reshayushchikh setei, nastraivaemykh po strukture dannykh dlya zadach meditsinskoi diagnostiki. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh*. Moscow, 2005. vol. 4, no. 1, pp. 12–20 (In Russ.).

11. Korenevskii N. A., Krupchatnikov R. A., Al'-Kasasbekh R. T. Teoreticheskie osnovy biofiziki akupunktury s prilozheniyami v meditsine, psikhologii i ekologii na osnove

nechetkikh setevykh modelei. Staryi Oskol, TNT Publ., 2013, 528 p. (In Russ.). ISBN 978-5-94178-398-4.

12. Korenevskii N. A. Metod sinteza geterogennykh nechetkikh pravil dlya analiza i upravleniya sostoyaniem biotekhnicheskikh system. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2013, no. 2, pp. 99–103 (In Russ.).

13. Korenevskii N. A. *Printsipy i metody postroeniya interaktivnykh sistem diagnostiki i upravleniya sostoyaniem zdorov'ya cheloveka na osnove polifunktsional'nykh modelei*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk. St. Petersburg, 1993, 32 p. (In Russ.).

14. Korenevskii N. A., Krupchatnikov R. A., Gorbatenko S. A. Sintez nechetkikh setevykh modelei, obuchaemykh po strukture dannykh dlya meditsinskikh ekspertnykh sistem. *Meditsinskaya tekhnika*, 2008, no. 2, pp. 18–24 (In Russ.).

15. Korenevskii N. A., Razumova K. V. Sintez nechetkikh klassifikatsionnykh pra-vil v mnogomernom prostranstve priznakov dlya meditsinskikh prilozhenii. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2012, no. 2, pt. 1, pp. 223–227 (In Russ.).

16. Korenevskii N. A., Rodionova S. N., Govorukhina T. N., Myasoedova M. A. Nechetkie modeli otsenki urovnya ergonomiki tekhnicheskikh sistem i ee vliyaniya na sostoyanie zdorov'ya cheloveka operatora s uchetom funktsional'nogo rezerva ego organizma. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii*. 2019, vyp. 1. Available at: https://moit. vivt.ru (In Russ.).

17. Stepashov R. V., Korenevskii N. A., Serebrovskii A. V., Govorukhina T. N. Ispol'zovanie tekhnologii myagkikh vychislenii dlya pronozirovaniya i diagnostiki professional'nykh zabolevanii rabotnikov agropromyshlennogo kompleksa. Kursk, 2016, 224 p. (In Russ.).

18. Shutkin A. N., Korenevskaya S. N., Fedyanin V. V. Proektirovanie baz znanii meditsinskikh ekspertnykh sistem s ispol'zovaniem kollektivov nechetkikh pravil. Informatsionnye proekty v meditsine i pedagogike. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Moscow, 2014, pp. 61–64 (In Russ.).

19. Al-Kasabeh R.T., Korenevskiy N.A., Ionescu F., Kuzmin A.A. Synthesis of combined fuzzy decision rules based on the exploration analysis data. Proc. 4th IAFA Intern. Conference Interdisciplinary Approaches in Fractal Analysis. Bucharest, Romania, May 26-29, 2009, pp. 71–78. ISSN 2066-4451.

20. Korenevsky 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 November*, 2013, vol. 47, is. 4, pp. 169–172.

21. Korenevsky N. A., Gorbatenko S. A., Krupchatnikov R. A., Lukashov M. I. Design of network-based fuzzy knowledge bases for medical decision-making support systems. Biomedical Engineering, 2009, vol. 43, no. 4, pp. 187–190.

22. Korenevskiy N. A., Krupchatnikov R. A., Gorbatenko S. A. Generation of fuzzy network models taught on basic of data structure for medical expert systems. *Biomedical Engineering Journal*, vol. 42, no. 2, pp. 67–72.

23. Korenevskiy N. A. Application of Fuzzy Logic for Decision-Making in MedicalExpert Systems. *Biomedical Engineering*, May 2015, vol. 49, pp. 46–49.

24. Korenevskii N. A. Ispol'zovanie nechetkoi logiki prinyatiya reshenii dlya meditsinskikh ekspertnykh system. *Meditsinskaya tekhnika*. 2015. no. 1 (289). pp. 33–35 (In Russ.).

25. Korenevskii N. A., Yuldashev Z. M. Proektirovanie biotekhnicheskikh sistem meditsinskogo naznacheniya. Obshchie voprosy proektirovaniya. Staryi Oskol, TNT Publ., 2018. 312 p. (In Russ.).

26. Metodika primeneniya ekspertnykh metodov dlya otsenki kachestva produktsii. Moscow, Standart Publ., 1975, 31 p. (In Russ.).

27. Korenevskii N. A., Serebrovskii N. A., Kopteva V. I., Govorukhina N. A. Korenevskii N. A. Prognozirovanie i diagnostika zabolevanii, vyzyvaemykh vrednymi proizvodstvennymi i ekologicheskimi faktorami na osnove geterogennykh modelei. Kursk, 2012, 231 p. (In Russ.).

28. Seregin S. P., Dolzhenkov S. D., Korenevskaya S. N., Sapitonova T. N. Sintez kombinirovannykh nechetkikh reshayushchikh pravil dlya prognozirovaniya posleoperatsionnykh oslozhnenii v urologii. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie,* 2012, no. 2, pt. 3, pp. 293–297 (In Russ.).

29. Korenevskii N. A., Krupchatnikov R. A. Informatsionno-intellektual'nye sistemy dlya vrachei refleksoterapevtov. Staryi Oskol, TNT Publ., 2013, 424 p. (In Russ.).

30. Korenevskii N. A., Bunyaev V. A., Krupchatnikov R. A. Sintez prognosticheskikh i diagnosticheskikh nechetkikh reshayushchikh pravil po elektricheskim kharakteristikam proektsionnykh zon dlya mediko-ekologicheskikh prilozhenii. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki*, 2009, no. 4, pp. 39–46 (In Russ.).

31. Korenevskii N. A., Gadalov V. N., Snopkov V. N. Matematicheskie modeli reflektornykh sistem organizma cheloveka i ikh ispol'zovanie dlya prognozirovaniya i diagnostiki zabolevanii. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh*, 2012, vol. 11, no. 2, pp. 515–521 (In Russ.).

32. Al-Kasasbeh R., Korenevskiy, N., Ionescou, F., Alshamasin M. Kuzmin, A. Synthesis of fuzzy logic for prediction and medical diagnostics by Energy Characteristics of Acupuncture Points. *Journal of Acupuncture and Meridian Studies*. Korea, 2011, vol. 4, no. 3, pp. 175–182.

Received 20.03.2019
Accepted 26.04.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Николай Алексеевич Кореневский, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой биомедицинской инженерии, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru)

Nikolay A. Korenevskiy, Doctor of Engineering Sciences, Professor, head of the Department of biomedical engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Марина Анатольевна Мясоедова, старший преподаватель кафедры электротехники и электроэнергетики, Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Marina A. Myasoedova, Senior lecturer Department of electrical engineering and power engineering, Kursk State Agricultural Academy named after Professor I. I. Ivanov, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Ксения Викторовна Разумова, программист II кат. кафедры биомедицинской инженерии, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Kseniya V. Razumova, Programmer II cat. Department of biomedical engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Андрей Вадимович Серебровский, магистрант кафедры биомедицинской инженерии, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Andrey V. Serebrovskiy, Undergraduate Department of biomedical engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

УДК 57.087

Контроль динамики развития критической ишемии нижних конечностей по энергетической реакции биологически активных точек

С. Н. Родионова[1]✉, О. В. Мельник[2]

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Российская Федерация, 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

[2] ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехническмй университет», Российская Федерация, 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1

✉ e-mail: knsofia@mail.ru

Резюме

Целью исследования *является повышение качества медицинского обслуживания пациентов, страдающих критической ишемией нижних конечностей за счет организации оперативного контроля за динамикой развития заболевания по энергетической реакции биологически активных точек.*

Методы*. В качестве базового математического аппарата исследований выбрана методология синтеза гибридных нечетких моделей принятия решений, с помощью которого получена модель оценки степени тяжести критической ишемии нижних конечностей, динамика которой оценивается по величине отклонения сопротивлений биологически активных точек, «связанных» с состоянием сосудов ног от своих номинальных значений. Оценка сопротивлений биологически активных точек производится с использованием портативного прибора со специализированным аналоговым интерфейсом*

Результаты*. В ходе проведенных исследований для оценки динамики развития критической ишемии нижних конечностей был определен состав информативных точек: E_{40}, E_{42}, E_{31}, E_{32} и RP_{10}, для которых были получены гибридные нечеткие решающие правила контроля динамики развития заболевания с выделением четырех классов состояний: состояние стабильное; существует небольшой риск осложнений; риск осложнений достаточно высокий; высокий риск осложнения.*

В ходе математического моделирования и экспертного оценивания была проведена оценка степени доверия к полученной модели на уровне 0,9, что позволяет рекомендовать полученные результаты к внедрению в медицинскую практику.

Заключение*. Предлагаемые математические модели позволяют оценивать динамику развития КИНК по величине энергетического разбаланса биологически активных точек, «связанных» с заболеваниями сосудов ног. Предложенные решения позволяют оперативно контролировать состояние ног пациента в домашних условиях с привлечением врачей-специалистов в критических ситуациях.*

Ключевые слова*: нечеткая логика; энергетические характеристики биологически активных точек; критическая ишемия нижних конечностей; динамика развития.*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: Родионова С. Н., Мельник О. В. Контроль динамики развития критической ишемии нижних конечностей по энергетической реакции биологически активных точек // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 2. С. 144–157.

© Родионова С. Н., Мельник О. В., 2019

UDC 57.087

The Method and Fuzzy Models for Evaluating the Dynamics of Development and the Degree of the Critical Ischemia of the Lower Extremities

S. N. Rodionova[1]✉, O. V. Melnik[2]

[1] Southwest State University, 94, 50 Let Oktyabrya str., Kursk, 305040, Russian Federation

[2] Ryazan state radio engineering University (RSREU), 59/1, Gagarin str., Ryazan, 390005, Russian Federation

✉ e-mail: knsofia@mail.ru

Abstract

Purpose of research. *The aim of the work is to improve the quality of medical care for patients suffering from critical lower limb ischemia through the organization of operational control over the dynamics of the disease by the energy reaction of biologically active points.*

Metods. *The methodology of synthesis of hybrid fuzzy models of decision-making is chosen as the basic mathematical apparatus of research. the model of evaluation of severity of critical lower limb ischemia, the dynamics of which is estimated by the magnitude of the deviation of resistance of biologically active points, "associated" with the state of the vessels of the legs from their nominal values. Evaluation of resistance of biologically active points is performed using a portable device using a specialized analog interface*

Results. *In the course of the studies to assess the dynamics of critical lower limb ischemia, the composition of informative points was determined: E40, E42, E31, E32 and RP10, for which hybrid fuzzy decisive rules for monitoring the dynamics of the disease were obtained with the allocation of four classes of States: stable state; there is a small risk of complications; the risk of complications is high enough; high risk of complications.*

In the course of mathematical modeling and expert evaluation, the degree of confidence in the obtained model was assessed at the level of 0.9. that allows us to recommend the results to be introduced into medical practice.

Conclusion. *The proposed mathematical models allow us to assess the dynamics of KINK development by the magnitude of the energy imbalance of biologically active points "associated" with diseases of the leg vessels. The proposed solutions allow you to quickly monitor the condition of the patient's legs at home with the involvement of doctors in critical situations.*

Keywords: *Fuzzy logic; energy characteristics of biologically active points; critical lower limb ischemia; dynamics of development.*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Rodionova S. N., Melnik O. V. The Method and Fuzzy Models for Evaluating the Dynamics of Development and the Degree of the Critical Ischemia of the Lower Extremities. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, 9(2): 144–157 (In Russ.).

***

Введение

В исследованиях многочисленных отечественных и зарубежных ученых неоднократно указывалось на необходимость повышения качества оказания медицинской помощи пациентам, стра-

дающим хроническими облитерирующими заболеваниями нижних конечностей (ХОЗАНК) и особенно такой их тяжелой стадией, как критическая ишемия нижних конечностей (КИНК) [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Ошибки в оценке степени тяжести этого заболевания с назначением неадекватных схем профилактики и лечения часто приводят к необходимости ампутации нижних конечностей.

Существует множество методов и средств оценки состояния пациентов с КИНК [1–6]. Среди множества известных работ наибольшего внимания заслуживают работы доктора А. В. Быкова, в которых рассматриваются различные методы оценки степени тяжести и динамики развития КИНК, как с учетом только кровоснабжения ног, так и с учетом системных взаимосвязей региональной и центральной гемодинамики [1–5].

Описанные в работах [1–5] методы и средства оптимизации ведения пациентов с КИНК позволяют значительно сократить количество ампутаций ног пациентов с исследуемой патологией, повышая при этом качество жизни людей, однако известные методы оценки степени тяжести КИНК и динамики развития этой патологии предлагают использование специальных методов лабораторного и инструментального исследования, а известные опросники не обеспечивают достаточно точной оценки состояния пациентов.

В предлагаемой работе исследуются прогностические и диагностические возможности биологически активных точек (БАТ), «реагирующих» на изменение кровообращения в нижних конечностях. При этом предполагается, что первичная оценка степени тяжести КИНК и динамики ее развития достаточно точно определяется с помощью методов и средств, описанных в работах доктора А. В. Быкова, а оперативный контроль динамики развития исследуемой патологии осуществляется по результатам изменения энергетических характеристик БАТ, «связанных» с поражением сосудов ног. При этом ввиду простоты аппаратуры и методики регистрации энергетических характеристик БАТ эта процедура может проводиться в домашних условиях, а при выходе регистрируемых параметров за рамки определенных значений пациент направляется на специализированные обследования к врачу-специалисту.

Материалы и методы

В качестве базовой модели оценки динамики развития и степени тяжести критической ишемии нижних конечностей выбрана нечёткая модель оценки степени тяжести КИНК, описанная в работе [5]. В описанной модели интегральный показатель степени тяжести критической ишемии нижних конечностей IST_j для сегмента с номером j определяется выражением

$$IST_j = STI_j + \beta_j \cdot STR(1 - STI_j), \qquad (1)$$

где STI_j – показатель степени тяжести ишемического поражения нижних конечностей, определяемый по объему кровоснабжения сегмента *j* с учетом регионального систолического артериального давления; STR – показатель степени тяжести ишемического поражения по группе реологических показателей (D – диммер, лейкоциты, тромбоциты, фибрикаген); β_j – поправочный коэффициент, учитывающий влияние STR на IST_j.

Для оценки динамического развития критической ишемии нижних конечностей в сторону увеличения, стабилизации и уменьшения степени тяжести исследуемого заболевания с использованием энергетических показателей БАТ. В работах [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13] предлагается оценивать величины относительного отклонения электрического сопротивления информативных точек от их номинальных значений. Измерения рекомендуется проводить на переменном токе частотой 1 кГц с амплитудой 2, … , 5 мА.

Алгоритмы выбора информативных БАТ и методы синтеза математических моделей прогнозирования, динамики и оценки степени тяжести исследуемых заболеваний по энергетическим характеристикам биологически активных точек достаточно подробно описаны в работах [7–11, 14, 15].

В качестве базовой модели динамики развития КИНК по величине энергетического разбаланса БАТ в работе используется модель вида:

$$\text{ЕСЛИ } [Z_j \in (ДЗТ)_K : \delta R_j > \delta R^n], \text{ ТО}$$
$$\{STB_K(q+1) =$$
$$= STB_K(q) + f_K(\delta R_{q+1})[1 - STB_K(q)]\},$$
$$\text{ИНАЧЕ } (STB_K = 0), \qquad (1)$$

где Z_j – идентификатор отобранных информативных БАТ; $STB_K(q)$ – степень тяжести КИНК, определяемая по энергетическим характеристикам БАТ; δR_j – величина относительного отклонения сопротивления БАТ с номером *j* от своего номинального значения; $f_K(\delta R_{q+1})$ – функция степени тяжести КИНК, определяемая по точке с номером *q+1*; *q* – номер итерации при расчете STB_K; $STB_K(1) = f_K(\delta R_1)$; $(ДЗТ)_K$ – диагностически значимые точки, отобранные для оценки КИНК, позволяющие исключать «метающие» параметры, определяемые с использованием алгоритмов, описанных в работах [10, 11].

В общем виде положительные и отрицательные значения δR_j имеют не симметричные ветви функций $f_K(\delta R_{q+1})$ [10, 11, 12].

Первичные значения STB_K рассчитываются одновременно с показателями IST_j. Далее врач назначает периодичность $T_И$ измерения сопротивлений БАТ и условия, при которых для уточнения степени тяжести КИНК необходимо

проводить повторные исследования для оценки величины IST_j.

В ходе измерений энергетических характеристик БАТ для принятия последующих решений рекомендуется определять следующий набор параметров:

$$\begin{aligned} Q_1 &= STB_K(t) - STB_K(t-1), \\ Q_2 &= [STB_K(t) - STB_K(t-1)] / T_И, \\ Q_3 &= STB_K(N) - STB_K(0), \\ Q_4 &= [STB_K(N) - STB_K(0] / T_И, \end{aligned} \quad (2)$$

где $STB_K(t)$ – значение STB_K в текущий момент времени; $STB_K(t-1)$ – предыдущие измерения STB_K в момент времени $t - T_И$; $STB_K(0)$ – значение STB_K, измеренные до стандартной нагрузки (ходьба, подъем по ступенькам, велоэргометрия); $STB_K(N)$ – значение STB_K, измеренное сразу после выполнения нагрузки; $T_И$ – интервал времени, позволяющий оценивать время «возврата» энергетических характеристик БАТ в исходное состояние при выполнении нагрузочных проб.

Если при расчете параметров STB использовать БАТ, «связанные» с сердцем, головным мозгом, центральной гемодинамической системой, то можно решать задачу оценки слежения за динамикой состояния этих систем.

В общем виде показатели Q_1, Q_2, Q_3 и Q_4 могут быть агрегированы в единый показатель DRK динамики развития КИНК, сравнение которого с пороговым значением $DRK^П$ будет определять тактику поведения обследуемого, например:

ЕСЛИ
$[(DRK = F_D(Q_1, Q_2, Q_3, Q_4) \le DRK^П]$,
ТО
[продолжить автономное наблюдение без вмешательства врача-специалиста],
ИНАЧЕ
[уведомление врача-специалиста]. (3)

Аналитическое выражение $DRK = F_D(Q_1, Q_2, Q_3, Q_4)$ может быть определено с использованием методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил [16, 17, 18, 19, 12, 13, 20, 21, 22].

Результаты и их обсуждение

Анализ атласа меридиан по работе [23] позволил установить списки БАТ, «связанных» с заболеваниями ног:

- Меридиан желудка: E_{31}, E_{32}, E_{40}, E_{42}, E_{43}.
- Меридиан селезенки – поджелудочной железы: RP_3, RP_4, RP_5, RP_6, RP_7, RP_{10}.
- Меридиан мочевого пузыря: V_{25}, V_{36}, V_{37}, V_{38}, V_{39}, V_{54}, V_{56}, V_{61}, V_{63}.

С учетом технологичности съема информации и информативности БАТ для оценки динамики развития КИНК были отобраны точки E_{31}, E_{32} (голень), E_{40}, E_{42} (наружная поверхность стопы), RP_{10}. (боковая сторона ноги).

Точки меридиан желудка «связаны» с парезом и параличом нижних ко-

нечностей, а точка RP_{10} – трофическими язвами ног.

На рисунке 1 приведено анатомическое расположение точек на ноге человека [23].

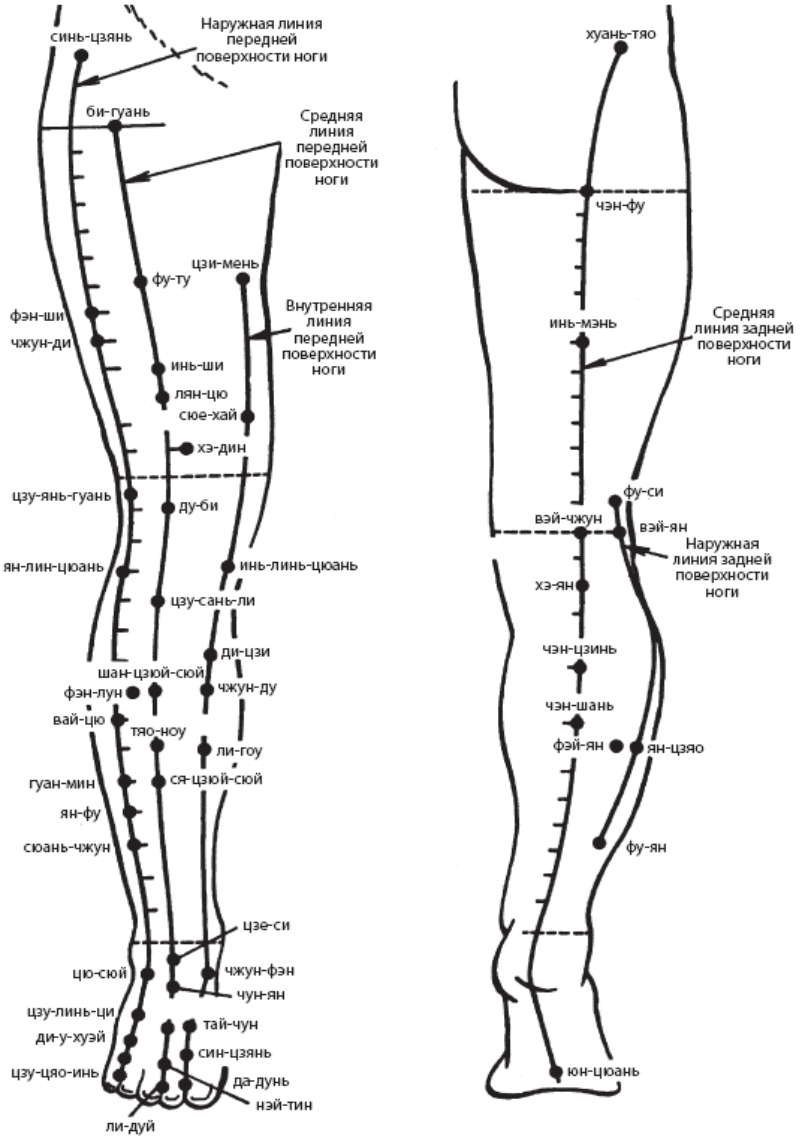


Рис. 1. Расположение выбранных БАТ: а – меридиан желудка; б – меридиан селезенки-поджелудочной железы [23]

По «связи» с парезом и параличом нижних конечностей состав ДЗТ образуют точки E_{40} и E_{42}.

С учетом этого величина энергетического разбаланса выражения (2) модифицируются до выражения:

$$\begin{aligned}&\text{ЕСЛИ } [(|\delta R_{E40}| > 10\%) \text{ И } (|\delta R_{E42}| > 10\%)], \text{ ТО}\\&\{STB_K(q+1) = STB_K(q) + f_K(\delta R_{q+1})[1 - STB_K(q)]\},\\&\text{ИНАЧЕ } (STB_K = 0),\end{aligned} \tag{4}$$

где $STB_K(1) = f_K(\delta R_{E40})$; $R_2 = R_{E42}$; $R_3 = R_{E31}$; $R_4 = R_{E32}$; $R_5 = R_{RP10}$.

Частные функции $f_K(\delta R_q)$ определяются выражениями:

$$f_K(\delta R_{E40}) = \begin{cases} 0,5, \text{ если } \delta R_{E40} < -70\%; \\ -0,0083 \cdot \delta R_{E40} - 0,083, \text{ если -}70\% \le \delta R_{E40} < -10\%; \\ 0, \text{ если -}10\% \le \delta R_{E40} < 10\%; \\ -0,012 \cdot \delta R_{E40} - 0,12, \text{ если } 10\% \le \delta R_{E40} < 60\%; \\ 0,6, \text{ если } \delta R_{E40} \ge 60\%. \end{cases}$$

$$f_K(\delta R_{E42}) = \begin{cases} 0,5, \text{ если } \delta R_{E42} < -70\%; \\ -0,0083 \cdot \delta R_{E42} - 0,083, \text{ если -}70\% \le \delta R_{E42} < -10\%; \\ 0, \text{ если -}10\% \le \delta R_{E42} < 10\%; \\ 0,012 \cdot \delta R_{E42} - 0,12, \text{ если } 10\% \le \delta R_{E42} < 60\%; \\ 0,6, \text{ если } \delta R_{E42} \ge 60\%. \end{cases}$$

$$f_K(\delta R_{E31}) = \begin{cases} 0,3, \text{ если } \delta R_{E31} < -80\%; \\ -0,0043 \cdot \delta R_{E31} - 0,043, \text{ если -}80\% \le \delta R_{E31} < -10\%; \\ 0, \text{ если -}10\% \le \delta R_{E31} < 10\%; \\ 0,067 \cdot \delta R_{E31} - 0,67, \text{ если } 10\% \le \delta R_{E31} < 70\%; \\ 0,4, \text{ если } \delta R_{E31} \ge 70\%. \end{cases}$$

$$f_K(\delta R_{E32}) = \begin{cases} 0,3, \text{ если } \delta R_{E32} < -80\%; \\ -0,0043 \cdot \delta R_{E32} - 0,043, \text{ если -}80\% \le \delta R_{E32} < -10\%; \\ 0, \text{ если -}10\% \le \delta R_{E32} < 10\%; \\ 0,067 \cdot \delta R_{E32} - 0,67, \text{ если } 10\% \le \delta R_{E32} < 70\%; \\ 0,4, \text{ если } \delta R_{E32} \ge 70\%. \end{cases}$$

$$f_K(\delta R_{RP10}) = \begin{cases} 0,5, \text{ если } \delta R_{RP10} < -70\%; \\ -0,0083 \cdot \delta R_{RP10} - 0,083, \text{ если -}70\% \le \delta R_{RP10} < -10\%; \\ 0, \text{ если -}10\% \le \delta R_{RP10} < 10\%; \\ 0,012 \cdot \delta R_{RP10} - 0,12, \text{ если } 10\% \le \delta R_{RP10} < 60\%; \\ 0,6, \text{ если } \delta R_{RP10} \ge 60\%. \end{cases}$$

Используя рекомендации [3, 4, 5] на шкале STB_K определили четыре функции принадлежности $\mu_{\omega_\ell}(STB_K)$ к классам:

- ω_1 – состояние стабильное;
- ω_2 – существует небольшой риск осложнения КИНК;
- ω_3 – риск осложнения КИНК достаточно высокий;
- ω_4 – высокий риск осложнения КИНК.

График функций принадлежности $\mu_{\omega_\ell}(STB_K)$, построенный группой экс-

пертов, работающих по методу Делфи, приведен на рисунке 2.

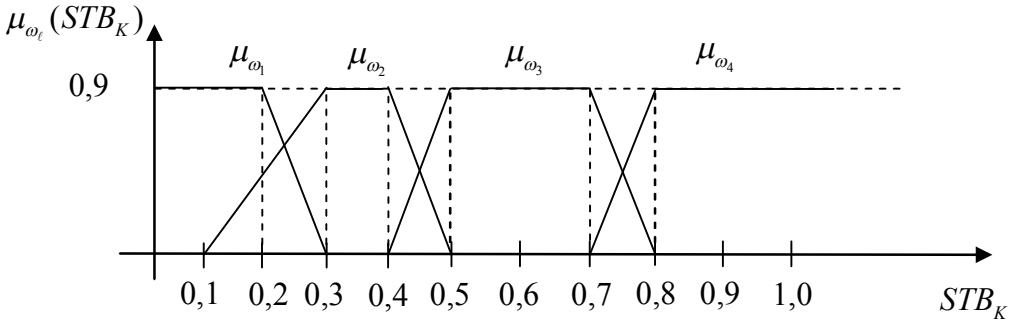


Рис. 2. Графики функций принадлежности к классам динамики развития КИНК

Решение о классификации Ω_ℓ принимается по максимальным значениям соответствующих функций принадлежности:

$$\Omega_\ell = \\ = \max[\mu_{\omega_1}(STB_r),\ \mu_{\omega_2}(STB_r),\ \mu_{\omega_3}(STB_r),\ \mu_{\omega_4}(STB_r)] \quad (5)$$

При равенстве двух функций принадлежности решение принимается в пользу более тяжелого состояния.

В ходе экспертного оценивания и математического моделирования была определена оценка степени доверия к модели (5) на уровне 0,9, что нашло отражение в максимальных значениях функций принадлежности, приведенных на рисунке 2.

Выбранное небольшое количество легко доступных биологически активных точек позволяет использовать для принятия необходимых решений портативную, дешевую и экономичную аппаратуру, вариант схемы которой приведен на рисунке 3 [24].

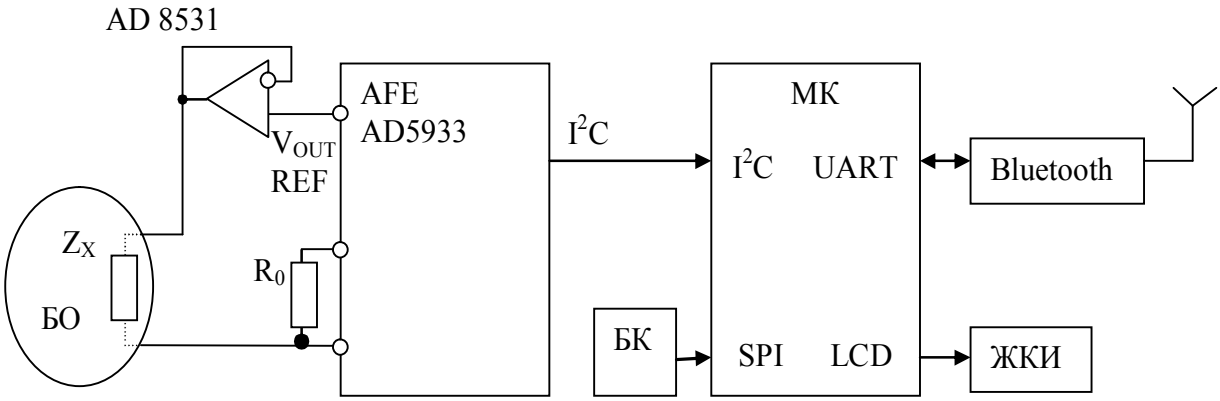


Рис. 3. Структурная схема портативного измерителя динамики развития КИНК по величине электрического сопротивления БАТ

В этой схеме измеритель сопротивления Z_X биообъекта (БО) построен с использованием специализированного аналогового интерфейса.

AFE типа AD5933 на операционном усилителе AD8531. Микроконтроллер МК выполняет все необходимые предварительные расчеты по программам, задаваемым с блока клавиатуры (БК). Результаты обработки отображаются на экране жидкокристаллического индикатора и могут быть переданы в эфир с помощью микросхемы с Bluetooth передатчиком. Этот же канал может быть использован для передачи тревожных сообщений «лечащему» врачу.

Обсуждение

В ходе проведенных исследований была показана возможность оперативного контроля динамики развития критической ишемии нижних конечностей по величине энергетического разбаланса биологически активных точек меридиан желудка и селезенки-поджелудочной железы. Обеспечивается возможность контроля энергетического разбаланса осуществлять в домашних условиях с помощью портативного прибора, использующего аналоговые интерфейсы, сопрягаемые с микроконтроллером.

Выводы

Предлагаемые математические модели позволяют оценивать динамику развития КИНК по величине энергетического разбаланса биологически активных точек, «связанных» с заболеванием сосудов ног. Экспертное доверие к выбранному методу критической ишемии нижних конечностей составляет 0,9. Предложенные решения позволяют оперативно контролировать состояние ног пациента в домашних условиях с привлечением врачей-специалистов в критических ситуациях.

Список литературы

1. Быков А. В., Устинов А. Г., Хрипина И. И. Модель прогнозирования возникновения осложнений ишемии нижних конечностей путем оценки функционального резерва организма // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. № 4 (17). С. 81–88.

2. Быков А. В., Кореневский Н. А., Устинов А. Г. Нечеткий алгоритм прогноза развития ишемической болезни конечностей для различных этапов ведения пациента // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2016. № 2 (19). С. 142–155.

3. Оптимизация ведения пациентов, страдающих критической ишемией нижних конечностей с учетом риска развития гангрены / А. В. Быков, Н. А. Кореневский, С. А. Пархоменко, И. И. Хрипина // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2019. № 18 (2). С. 38–44.

4. Пат. на изобретение №2648178. Способ прогнозирования степени тяжести ишемического процесса сердца, головного мозга и нижних конечностей / Быков А. В., Кореневский Н. А. Заявка: 2016151743, 28.12.2016. зарегистрировано 22.03.2018. Опубликовано 22.03.2018. Бюл. № 9.

5. Родионова С. Н., Мельник О. В., Быков А. В. Метод и нечеткие модели оценки динамики развития степени тяжести критической ишемии нижних конечностей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. № 1 (30). С. 146–160.

6. Савельев В. С., Кошкин В. М., Каралкин А. В. Патогенез и консервативное лечение тяжелых стадий облитерирующего атеросколероза артерий нижних конечностей: руководство для врачей. М.: Медицинское информационное агентство (МИА), 2010. 214 с.

7. Гадалов В. Н., Кореневский Н. А., Снопков В. И. Математические модели рефлекторных систем организма человека и их использование для прогнозирования и диагностики. заболеваний // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2012. Т. 11, № 2. С. 515–521.

8. Кореневский Н. А., Буняев В. В., Яцун С. М. Компьютерные системы ранней диагностики состояния организма методами рефлексологии. Новочеркасск: Юж. – Рос. гос. тех. ун-т (НПИ), 2003. 206 с.

9. Кореневский Н. А., Лазурина Л. П. Энергоинформационные модели рефлексодиагностики. Курск: ОМПЦ, 2000. 177 с.

10. Кореневский Н. А., Крупчатников Р. А. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений для врачей рефлексотерапевтов. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 424 с.

11. Кореневский Н. А., Крупчатников Р. А., Аль-Касасбех Р. Т. Теоретические основы биофизики акупунктуры с приложениями в медицине, психологии и экологии на основе нечетких сетевых моделей: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2018. 528 с.

12. Кореневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечётких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.

13. Оценка и управление состоянием здоровья обучающихся на основе гибридных интеллектуальных технологий: монография / Н. А. Кореневский, А. Н. Шуткин, С. А. Горбатенко, В. И. Серебровский. Старый Оскол: ТНТ, 2016. 472 с.

14. Fuzzy determination of the human's level of psycho-emotional / N. A. Korenevskiy, R. T. Al-Kasasbeh, F. Ionescouc, M. Alshamasin, E. Alkasasbeh, A. P. Smith // IFMBE Proceedings. 2013. V. 40. IFMBE. P. 213–216.

15. Use of Interactive Method for Classification in Problems of Medical Diagnosis / N. A. Korenevskiy, S. V. Degtyarev, S. P. Seregin, A. V. Novikov // Biomedical Engineering. November 2013. Vol. 47. Is. 4. P. 169–172.

16. Кореневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1 (289). С. 33–35.

17. Кореневский Н. А. Проектирование систем принятия решений на нечетких сетевых моделях в задачах медицинской диагностики и прогнозирования // Телекоммуникации. 2006. № 6. С. 25–31.

18. Кореневский Н. А. Метод синтеза гетерогенных нечетких правил для анализа и управления состоянием биотехнических систем // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 2. С. 99–103.

19. Кореневский Н. А., Разумова К. В. Синтез коллективов гибридных нечетких моделей оценки состояния сложных систем // Наукоемкие технологии. 2014. Т. 15, № 12. С. 31–40.

20. Шуткин А. Н., Федянин В. В., Кореневская С. Н. Проектирование баз знаний медицинских экспертных систем с использованием коллективов нечетких правил // Информационные проекты в медицине и педагогике. Материалы международной научно-практической конференции. М., 2014. С. 61–64.

21. Design of network-based fuzzy knowledge bases for medical decision-making support systems / N. A. Korenevsky, S. A. Gorbatenko, R. A. Krupchatnikov, M. I. Lukashov // Biomedical Engineering. 2009. Vol. 43. No. 4. P. 187–190.

22. System for Studying Specific Features of Attention and Memory / N. A. Korenevskiy, D. E. Skopin, R. T. Al-Kasasbeh, A. A. Kuz'min // Biomedical Engineering Journal. 2010. Vol. 44. No 1. P. 32–35.

23. Гаваа Лувсан. Традиционные и современные аспекты восточной рефлексотерапии. М.:Наука, 1986. 576 с.

24. Кореневский Н. А., Юлдашев З. М. Проектирование биотехнических систем медицинского назначения. Средства воздействия на биообъект. Старый Оскол: ТНТ, 2017. 456 с.

Поступила в редакцию 12.04.2019
Подписана в печать 03.05.2019

Reference

1. Bykov A. V., Ustinov A. G., Khripina I. I. Model' prognozirovaniya vozniknoveniya oslozhnenii ishemii nizhnikh konechnostei putem otsenki funktsional'nogo rezerva organizma. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2015, no. 4 (17), pp. 81–88 (In Russ.).

2. Bykov A. V., Korenevskii N. A., Ustinov A. G. Nechetkii algoritm prognoza razvitiya ishemicheskoi bolezni konechnostei dlya razlichnykh etapov vedeniya patsienta. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2016, no. 2 (19), pp. 142–155 (In Russ.).

3. Bykov A. V., Korenevskii N. A., Parkhomenko S. A., Khripina I. I. Optimizatsiya vedeniya patsientov, stradayushchikh kriticheskoi ishemiei nizhnikh konechnostei s uchetom riska razvitiya gangreny. *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika*, 2019, no. 18 (2), pp. 38–44 (In Russ.).

4. Pat. na izobretenie №2648178. Sposob prognozirovaniya stepeni tyazhesti ishemicheskogo protsessa serdtsa, golovnogo mozga i nizhnikh konechnostei / Bykov A. V., Korenevskii N. A. Zayavka: 2016151743, 28.12.2016. zaregistrirovano 22.03.2018. Opublikovano 22.03.2018 Byul. № 9 (In Russ.).

5. Rodionova S. N., Mel'nik O. V., Bykov A. V. Metod i nechetkie modeli otsenki dinamiki razvitiya stepeni tyazhesti kriticheskoi ishemii nizhnikh konechnostei. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, no. 1 (30), pp. 146–160 (In Russ.).

6. Savel'ev V. S., Koshkin V. M., Karalkin A. V. Patogenez i konservativnoe lechenie tyazhelykh stadii obliteriruyushchego ateroskoleroza arterii nizhnikh konechnostei. Rukovodstvo dlya vrachei. Moscow, Meditsinskoe informatsionnoe agentstvo (MIA) Publ., 2010, 214 p. (In Russ.).

7. Gadalov V. N., Korenevskii N. A., Snopkov V. I. Matematicheskie modeli reflektornykh sistem organizma. cheloveka i ikh ispol'zovanie dlya prognozirovaniya i diagnostiki zabolevanii. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh*, 2012, vol. 11, no. 2, pp. 515–521 (In Russ.).

8. Korenevskii N. A., Bunyaev V. V., Yatsun S. M. Komp'yuternye sistemy rannei diagnostiki sostoyaniya organizma metodami refleksologii. Novocherkassk, 2003, 206 p. (In Russ.).

9. Korenevskii N. A., Lazurina L. P. Energoinformatsionnye modeli refleksodiagnostiki. Kursk, OMPTs Publ., 2000. 177 p. (In Russ.).

10. Korenevskii N. A., Krupchatnikov R. A. Intellektual'nye sistemy podderzhki prinyatiya reshenii dlya vrachei refleksoterapevtov. Staryi Oskol, TNT Publ., 2013, 424 p. (In Russ.).

11. Korenevskii N. A., Krupchatnikov R. A., Al'-Kasasbekh R. T. Teoreticheskie osnovy biofiziki akupunktury s prilozheniyami v meditsine, psikhologii i ekologii na osnove nechetkikh setevykh modelei. Staryi Oskol, TNT Publ., 2018, 528 p. (In Russ.).

12. Korenevskii N. A., Rodionova S. N., Khripina I. I. Metodologiya sinteza gibridnykh nechetkikh reshayushchikh pravil dlya meditsinskikh intellektual'nykh sistem podderzhki prinyatiya reshenii. Staryi Oskol, TNT Publ., 2019, 472 p. (In Russ.).

13. Korenevskii N. A., Shutkin A. N., Gorbatenko S. A., Serebrovskii V. I. Otsenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya obuchayushchikhsya na osnove gibridnykh intellektual'nykh tekhnologii. Staryi Oskol, TNT Publ., 2016, 472 p. (In Russ.).

14. Korenevskiy N. A., Al-Kasasbeh R. T., Ionescouc F., Alshamasin M., Al-kasasbeh E., Smith A. P. Fuzzy determination of the human’s level of psycho-emotional. *IFMBE Proceedings*, 2013, vol. 40, IFMBE, pp. 213–216.

15. Korenevskiy N. A., Degtyarev S. V., Seregin S. P., Novikov A. V. Use of Interactive Method for Classification in Problems of Medical Diagnosis. *Biomedical Engineering*, november 2013, vol. 47, is. 4, pp. 169–172.

16. Korenevskii N. A. Ispol'zovanie nechetkoi logiki prinyatiya reshenii dlya meditsinskikh ekspertnykh system. *Meditsinskaya tekhnika*, 2015, no. 1 (289), pp. 33–35 (In Russ.).

17. Korenevskii N. A. Proektirovanie sistem prinyatiya reshenii na nechetkikh setevykh modelyakh v zadachakh meditsinskoi diagnostiki i prognozirovaniya. *Telekommunikatsii*, 2006, no. 6, pp. 25–31 (In Russ.).

18. Korenevskii N. A. Metod sinteza geterogennykh nechetkikh pravil dlya analiza i upravleniya sostoyaniem biotekhnicheskikh system. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2013, no. 2, pp. 99–103 (In Russ.).

19. Korenevskii N. A., Razumova K. V. Sintez kollektivov gibridnykh nechetkikh modelei otsenki sostoyaniya slozhnykh system. *Naukoemkie tekhnologii*, 2014, vol. 15, no. 12, pp. 31–40 (In Russ.).

20. Shutkin A. N., Fedyanin V. V., Korenevskaya S. N. Proektirovanie baz znanii meditsinskikh ekspertnykh sistem s ispol'zovaniem kollektivov nechetkikh pravil. Informatsionnye proekty v meditsine i pedagogike. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Moscow, 2014, pp. 61–64 (In Russ.).

21. Korenevsky N. A., Gorbatenko S. A., Krupchatnikov R. A., Lukashov M. I. Design of network-based fuzzy knowledge bases for medical decision-making support systems. *Biomedical Engineering*, 2009, vol. 43, no. 4, pp. 187–190.

22. Korenevskiy N. A., Skopin D. E., Al-Kasasbeh R. T., Kuz'min A. A. System for Studying Specific Features of Attention and Memory. *Biomedical Engineering Journal*, 2010, vol. 44, no 1, pp.32–35.

23. Gavaa Luvsan. Traditsionnye i sovremennye aspekty vostochnoi refleksoterapii. Moscow, Nauka Publ., 1986, 576 p. (In Russ.).

24. Korenevskii N. A., Yuldashev Z. M. Proektirovanie biotekhnicheskikh sistem meditsinskogo naznacheniya. Sredstva vozdeistviya na bioob"ekt. Staryi Oskol, TNT Publ., 2017, 456 p. (In Russ.).

Received 12.04.2019
Accepted 03.05.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Софья Николаевна Родионова, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: knsofia@mail.ru)

Ольга Владимировна Мельник, доктор технических наук, профессор кафедры информационно-измерительной и биомедицинской техники, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет», 390005. Россия, г. Рязань, ул. Гагарина 59/1, e-mail: chel-juliya@yandex.ru

Sof'ya N. Rodionova, Southwest State University, Postgraduate of the Department of Biomedical Engineering, Prof. Ph.Dr. (Russia, Kursk, Cheliuskintsev str., 19, e-mail: knsofia@mail.ru)

Olga V. Melnik, Ryazan state radio engineering University (RSREU), Prof. Ph.Dr. (Russia, Ryazan, Gagarin street 59/1, chel-juliya@yandex.ru)

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2. Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

– статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;

– разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа;

– сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail).

3. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами, что означает их согласие на передачу Университету прав на распространение материалов статьи с помощью печатных и электронных носителей информации.

4. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

5. **Публикация бесплатная.**

6. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны – 2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

7. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (полужирный, строчные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, литература. Авторы, название, аннотация и ключевые слова приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается аннотация (200–250 слов), отражающая краткое содержание статьи.

Например:

> УДК 004.9:519.8
>
> **А.Л. Иванов**, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94) (e-mail: ivanov@gmail.com)
>
> **Построение модели прогнозирования обеспеченности кадрами градообразующего предприятия**
>
> В статье рассматривается агентная модель прогнозирования обеспеченности кадрами градообразующего предприятия, основанная на структуризации поведения агента и определения влияния его внутреннего представления об окружающем мире на его деятельность……
>
> **Ключевые слова:** агентное моделирование, градообразующее предприятие, событие.

8. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы (Ω, η, β, μ, ω, υ и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций (sin, cos, tg и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 *dpi* и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы**.

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются.**

12. **Список литературы к статье обязателен** и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы (не менее 10). Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26, тел/факс (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала: **http://www.swsu.ru/izvestiya/index.php.**