

## Экспертная система оценки состояния здоровья операторов человеко-машинных систем, подвергающихся воздействию электромагнитных полей радиочастотного диапазона

### Аннотация

Получены гибридные нечеткие модели прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы, развивающихся под воздействием электромагнитных полей исследуемого диапазона. Показано, что если при наличии электромагнитных факторов риска использовать дополнительную информацию о состоянии здоровья обследуемых, то уверенность в правильном прогнозе достигает величины 0,85, а в наличии ранних стадий заболеваний нервной системы – 0,92.

### Введение

Исследованию влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона (ЭМПРД) посвящено достаточно много работ отечественных и зарубежных ученых [1]-[3]. При этом для высокоинтенсивной энергетической экспозиции установлены опасные уровни, предусматривающие проведение социально-гигиенических мероприятий по предупреждению появления и развития профессиональных заболеваний у представителей соответствующих профессий.

Вредное воздействие ЭМП малой интенсивности подтверждается многочисленными исследованиями, но научно обоснованных мероприятий, ориентированных на ограничение этого воздействия, практически не разработано [1]-[4]. Одним из способов повышения качества медицинского обслуживания людей, подвергающихся вредному воздействию ЭМПРД, является своевременное выявление отрицательных тенденций в организме человека под воздействием комплекса эндогенных и экзогенных факторов риска с последующей оптимизацией схем профилактики и лечения профессиональных заболеваний исследуемого контингента работников, включая операторов человеко-машинных систем.

Анализ литературных данных и собственные исследования показали, что задачи прогнозирования появления и развития выбранных типов заболеваний относятся к классу плохо формализуемых задач с неполной и нечеткой структурой данных [1]-[7], которые в соответствии с рекомендациями [4]-[10] целесообразно решать, используя методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), общие положения которой описаны в работах [8]-[10].

### Методы исследования

Радиочастотный диапазон занимает большую полосу частот от 3 кГц до 300 ГГц, которые, имея различные механизмы взаимодействия с тканями человеческого тела, порождают многообразные отклики организма, приводя к различным патологическим процессам.

Проведенный анализ показал, что в таких условиях использование МСГНРП для синтеза соответствующих прогностических и диагностических решающих правил требует творческого подхода, учитывающего специфику решаемых задач, конкретизирующего способы и последовательность выбора частных моделей и их агрегации в финальные модели принятия решений.

С учетом специфики воздействия ЭМП радиочастотного диапазона в сочетании с другими факторами риска предлагается метод синтеза математических моделей прогнозирования и диагностики заболеваний, проводимых воздействием ЭМПРД, состоящий из следующих основных этапов.

1. С учетом общих требований МСГНРП формируется экспертная группа, которая на начальном этапе исследований определяет информативные по отношению к исследуемым заболеваниям диапазоны частот  $f_i$  и значения их энергетической экспозиции  $\mathcal{E}_i$ . Рекомендуется пользоваться принятой у рос-

сийских специалистов градацией [3...30 кГц (*VLF*), 30...300 кГц (*LF*), 300...3000 кГц (*MF*), 3...30 МГц (*HF*), 30...300 МГц (*VHF*), 300...3000 МГц (*UHF*), 3...30 ГГц (*SHF*), 30...300 ГГц], поскольку в рамках указанных диапазонов наблюдаются схожие биологические эффекты взаимодействия ЭМП с биоструктурами [4,] [7].

С учетом того, что для достаточно мощных ЭМП радиочастотного диапазона определены предельно допустимые уровни с известными последствиями, а для низкоинтенсивных ЭМП указаны лишь тенденции возможных заболеваний в основном на качественном уровне, предлагаются две различные ветви синтеза соответствующих решающих правил.

В основу синтеза решающих правил для ЭМП с 0,5 ПДУ и выше целесообразно выбрать механизм синтеза нечетких решающих правил, предложенный в работах [4]-[7].

Для ЭМП частотного диапазона от 30 кГц до 300 МГц, энергетическая экспозиция электрического ( $\mathcal{E}_E$ ) и магнитного ( $\mathcal{E}_H$ ) полей которых превышает 0,5 ПДУ, базовым элементом решающих правил является функция принадлежности  $\mu_i(z_{ij})$  к исследуемым классам  $\omega_j$  состояний с базовой переменной  $z_{ij}$  для частотного диапазона  $i$ , определяемой с учетом энергетической экспозиции электрической и магнитной составляющих и общего времени воздействия ЭМП  $i$ -го диапазона на организм человека.

В соответствии с рекомендациями [4], [7] и при условии, что исследуемые частотные диапазоны действуют на обследуемого одно и то же время  $t_0$ , базовую переменную для класса заболеваний  $\omega_j$  предлагается определять по формуле

$$Z_j = f_j(Q) \cdot f_j^*(t_0),$$

где  $Q$  – показатели энергетической экспозиции для воздействующих ЭМП;  $f_j(Q)$  – нормировочная функция степени влияния ЭМП исследуемых диапазонов на появление и развитие заболеваний  $\omega_j$  с областью определения  $[0, \dots, 1]$ ;  $f_j^*(t_0)$  – нормировочная функция степени влияния времени нахождения обследуемого под воздействием исследуемого диапазона частот ЭМП.

В соответствии с рекомендациями СНиП и ГОСТ, если на обследуемого действует ЭМП одного частотного диапазона  $f_i$ , то

$$Q = \frac{\mathcal{E}_{Ei}}{\mathcal{E}_{EiПДУ}} + \frac{\mathcal{E}_{Hi}}{\mathcal{E}_{HiПДУ}}, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_{Ei} = E_i^2 T$  – энергетическая экспозиция электрического поля для диапазона частот  $f_i$ ;  $E_i$  – напряженность электрической составляющей ЭМП;  $T$  – время воздействия за смену в часах;  $\mathcal{E}_{Hi} = H_i^2 T$  – энергетическая экспозиция магнитного поля для  $i$ -го диапазона частот;  $H_i$  – напряженность магнитной составляющей ЭМП;  $\mathcal{E}_{EiПДУ}$ ,  $\mathcal{E}_{HiПДУ}$  – соответствующие предельно допустимые уровни.

При облучении от нескольких источников ЭМП, работающих в различных частотных диапазонах, для которых установлены различные ПДУ,

$$Q = \sum_i \left( \frac{\mathcal{E}_{Ei}}{\mathcal{E}_{EiПДУ}} + \frac{\mathcal{E}_{Hi}}{\mathcal{E}_{HiПДУ}} \right). \quad (2)$$

2. Для ЭМП частотного диапазона от 30 МГц до 300 ГГц электрическая экспозиция для выражений (1) и (2) определяется по значениям плотности потока энергии ППЭ. При этом  $\mathcal{E}_E$  заменяется на  $\mathcal{E}_{ППЭ} = ППЭ \cdot T$  со «своими» ПДУ ( $\mathcal{E}_{ППЭПДУ}$ ).

Если несколько источников различных диапазонов «облучают» обследуемого с различной продолжительностью  $t_i$ , то определяются различные базовые переменные  $z_{li}$  с построением «своих» функций принадлежности  $\mu_{li}(z_{li})$ , которые агрегируются в решающие правила типа

$$UEP_l = F_{lag}[\mu_{li}(z_{li})],$$

где  $UEP_l$  – частная уверенность в прогнозе, раннем или дифференциальном диагнозе для класса заболеваний  $\omega_l$  по электромагнитной составляющей;  $F_{lag}$  – функция агрегации по анализируемым диапазонам частот.

Учитывая возможные резонансные и нелинейные эффекты действия на организм человека различных частотных диапазонов ЭМП, целесообразно функцией агрегации определять по обучающей выборке с использованием нечеткой модификации метода группового учета аргументов [4], [7], [9], [10].

При отсутствии обучающей выборки достаточного объема в качестве агрегатора целесообразно проверить применимость итерационной формулы Е. Шортлифа, определяя параметры функций принадлежности в соответствии с рекомендациями [7], [10]:

$$UEP_l(p+1) = UEP_l(p) + \mu_{li+1}(z_{li+1})[1 - UEP_l(p)], \quad (3)$$

где  $p$  – номер итерации;  $UEP_l(1) = \mu_{li}(z_{li})$ .

3. Для низкоинтенсивных ЭМП связь между параметрами электромагнитного поля и возникающими от его действия заболеваниями носит более неопределенный и неустойчивый характер, что определяется ослаблением взаимодействия с биологическими структурами, работой адаптационных механизмов организма, неравномерной интенсивностью воздействия, часто чередующейся паузами, например при использовании мобильной связи, и т. д.

В этих условиях при постоянно действующих полях достаточно стабильной интенсивности синтезируется модель типа (2) в варианте выбора вида и параметров функций принадлежности высококвалифицированными экспертами в отсутствие репрезентативных обучающих выборок. При этом низкое качество принятия решений при достаточно низких значениях функций принадлежности для ЭМП компенсируется увеличением числа дополнительных информативных признаков, характеризующих индивидуальные характеристики организма, с включением показателя, характеризующего защитные функции организма, определяемые, например, в соответствии с рекомендациями работ [4], [10], [11].

Для нестабильных во времени и (или) пространстве ЭМП радиочастотного диапазона с плохо определяемыми классами состояний предлагается использовать нечеткие табличные модели, аналогичные моделям, описанным в [4], [7].

По столбцам моделей выписываются характеристики источника излучения: например, классы мобильных телефонов, типы персональных компьютеров, типы роутеров и т. д.

По столбцам определяется время воздействия. Элементарные таблицы являются показатели уверенности  $UF_{ij}$  появления и развития заболевания  $\omega_j$  для источника ЭМП с номером  $i$  для временного интервала  $j$ .

Для нескольких источников с различными временными экспозициями уверенность определяется агрегацией  $UE_{ij}$ :

$$UEP_l = F_{UE}(UE_{ij}). \quad (4)$$

4. Определяются сопутствующие факторы риска, связанные с экологией (геомагнитные поля, работа и проживание в условиях действия вредных производств и др.), эргономикой (рабочая поза, микроклимат, первичный уровень психоэмоционального напряжения и утомления и др.), индивидуальными особенностями организма (психофизиологический индивидуальный портрет, наличие хронических заболеваний, возраст, адаптационный резерв, функциональное состояние, употребление алкоголя и лекарств, наследственность и т. д.). Для этих факторов риска в соответствии с рекомендациями [4], [7], [10], [11] синтезируются гибридные нечеткие модели принятия решений по классам состояний  $\omega_l$  с расчетом частной прогностической и (или) диагностической уверенности  $UD_l$ .

Полученные частные решающие правила агрегируются в финальные математические модели

$$UF_l = FF_l(UEP_l, UD_l), \quad (5)$$

где  $FF_l$  – финальные функции агрегации.

## Результаты

Эффективность рассмотренного метода проверялась на математических моделях прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы у операторов, чья работа связана с длительным использованием персональных компьютеров в сочетании с мобильными телефонами.

С учетом высокой неопределенности и нестационарности режима работы операторов с мобильными телефонами (МТ) и персональными компьютерами (ПК) для оценки влияния ЭМП этих технических средств на появление и развитие нервных болезней (класс  $\omega_H$ ) эксперты в качестве базовой модели выбрали нечеткую табличную модель, фрагмент которой приведен в табл. 1.

В табл. 1 приведены варианты подключения на связь МТ в сутки и продолжительность работы с ПК, подключенным к беспроводной сети Интернет, в сутки.

Агрегация составляющих табл. 1 осуществляется с использованием частной модели вида

$$UEP_H = UE_H(MT) + UE_H(PK) - UE_H(MT) \cdot UE_H(PK),$$

где  $UE_H(MT)$ ,  $UE_H(PK)$  – уверенности в появлении и развитии заболеваний нервной системы от контакта человека с МТ и ПК соответственно.

Таблица 1

Оценка уверенности в появлении и развитии нервных болезней от использования МТ и ПК

Источник ЭМП с характером подключения	Время, лет											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	>10	
МТ – до 10 подключений	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
МТ – от 10 до 20 подключений	0	0	0	0	0	0,05	0,05	0,1	0,1	0,15	0,2	0,2
МТ – от 20 до 40 подключений	0	0	0	0,05	0,05	0,1	0,1	0,15	0,15	0,2	0,2	0,2
МТ – свыше 40 подключений	0	0,05	0,1	0,15	0,15	0,2	0,2	0,25	0,25	0,3	0,3	0,3
ПК – с продолжительностью до 1 ч	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,15	0,15
ПК – с продолжительностью от 1 до 3 ч	0	0	0	0	0	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,25
ПК – с продолжительностью от 3 до 5 ч	0	0	0	0	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,3
ПК – с подключением от 5 до 7 ч	0	0	0	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,35
ПК – с подключением от 7 до 9 ч	0	0	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,4
ПК – с подключением свыше 9 ч	0	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,45

Результаты математического моделирования и экспертного оценивания показали, что для наиболее часто встречающихся условий труда  $UEP_H$  определяется на уровне 0,42.

Составляющая  $UD_i$  модели (5) определялась в соответствии с общими рекомендациями МСГНРП. Подробное описание пространства информативных признаков и частных математических моделей прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы, включая энергетические характеристики БАТ, «связанные» с нервной системой, приведено в работах [10]-[12].

В результате математического моделирования и экспертного оценивания было доказано, что уверенность в правильном прогнозировании по классу  $\omega_H$  с использованием гибридной модели (4) превышает величину 0,85, что было подтверждено статистической проверкой на репрезентативных контрольных выборках.

Аналогичные результаты с уверенностью выше 0,92 были получены для гибридных моделей ранней диагностики заболеваний нервной системы.

Синтезируемые математические модели реализуются базой знаний экспертной системы, структурная схема которой показана на рис. 1.

Предлагаемая экспертная система (ЭС) по существу является системой поддержки принятия решений (СППР) для врачей, ведущих пациентов, для которых основным фактором риска является вредное воздействие электромагнитных полей

радиочастотного диапазона. В качестве лица, принимающего решения (ЛПР), может выступать специалист по охране труда, психолог и (или) профильный врач. Для полноценного функционирования СППР с его программным обеспечением (ПОСППР) к ПЭВМ могут дополнительно подключаться аппаратура контроля ЭМП (АКЭМП), прибор контроля функций внимания и памяти (ПКФВП), многоканальный анализатор электрических характеристик БАТ (МА ЭХБ), стандартная медицинская техника (СМТ) [7], [10]. Управление дополнительным оборудованием (ДО) и передача информации от него в базу данных (БД) обеспечивают драйвер связи (ДС) и система управления базой данных (СУБД).

При подготовке СППР к эксплуатации организуется ее обучение с использованием методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил пакетом обучающих программ (ПОП), состав и функции которого описаны в работах [9]-[11].

В состав оригинального программного обеспечения входят две подсистемы: подсистема принятия решений по оценке состояния (ППРОС) и подсистема формирования рекомендаций по коррекции состояния здоровья и функционального состояния.

В состав ППРОС входят: модуль прогнозирования, модуль ранней диагностики, модуль оценки функционального состояния (ФС) и функционального резерва (ФР) и их психологических и физиологических составляющих, модуль оценки работоспособности операторов человеко-машинных систем.

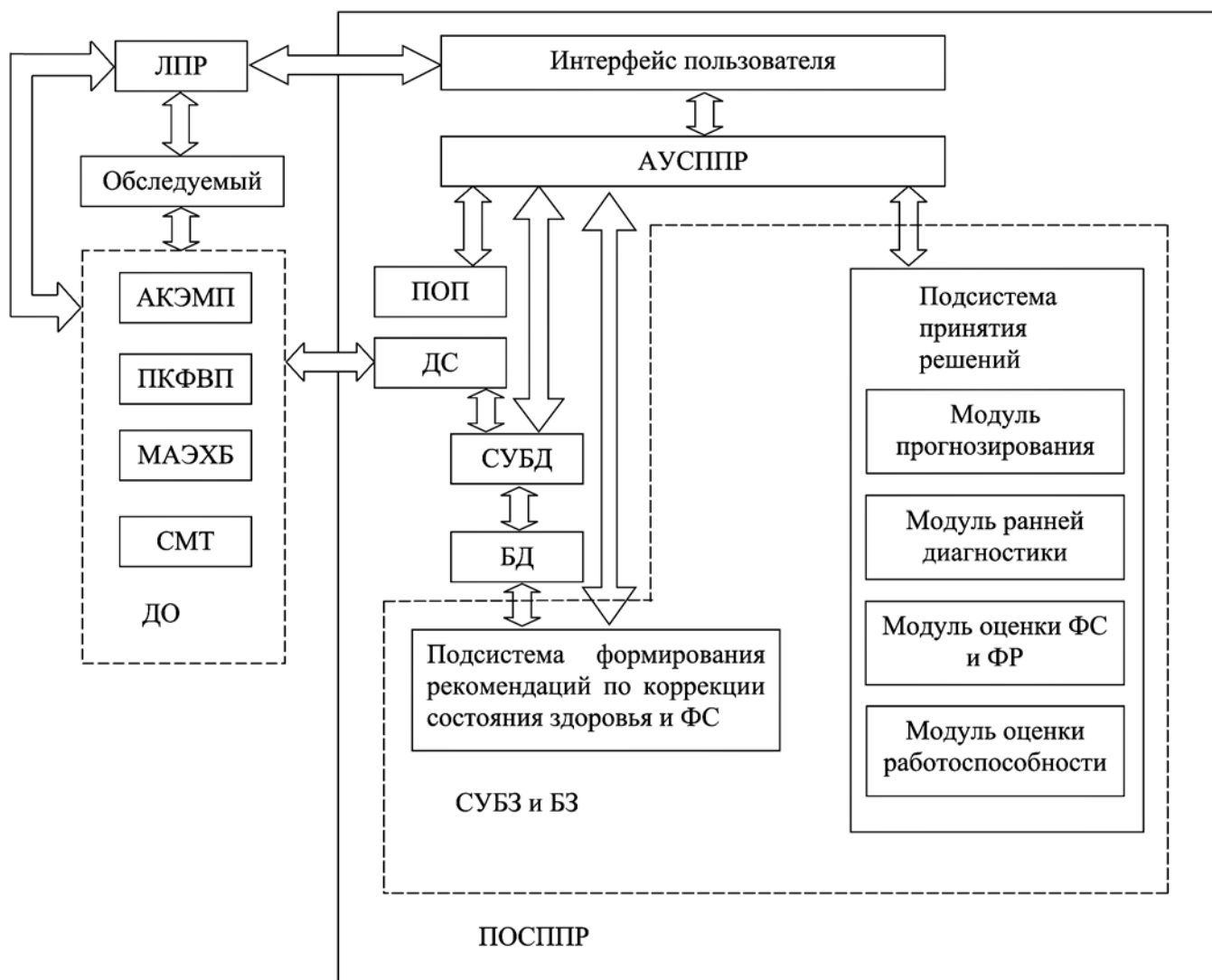


Рис. 1. Структурная схема экспертной системы

Получаемые результаты прогнозирования, ранней диагностики, оценки ФС и оценки надежности работы человека используются при решении задач формирования рациональных схем воздействия на состояние здоровья и функциональное состояние человека с целью их нормализации. Этот набор задач решается подсистемой формирования рекомендаций по коррекции состояния здоровья и ФС. Интеллектуальная часть ЭС поддерживается системой управления базой знаний (СУБЗ) и собственно базой знаний (БЗ).

Управление взаимодействием между модулями, подсистемами, внешним аппаратным обеспечением и лицом, принимающим решение, обеспечивается алгоритмом управления СППР (АУСППР). Взаимодействие ЛПР с СППР осуществляется через интерфейс пользователя.

Таким образом, предложенный метод позволяет синтезировать гибридные нечеткие решающие правила для оценки состояния здоровья работников, контактирующих с ЭМП радиочастотного диапазона, обеспечивая повышение качества обследования пациентов.

#### *Список литературы:*

1. Пальцев Ю.П., Походзей Л.В., Рубцова Н.Б., Перов С.Ю., Богачева Е.В. Проблема изучения влияния электромагнитных полей на здоровье человека. Итоги и перспективы // Медицина труда и промышленная экология. 2013. № 6. С. 35-40.
2. Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А. Сотовая связь и здоровье: электромагнитная обстановка, радиобиологические и гигиенические проблемы, прогноз опасности. – М.: Экономика, 2013. 565 с.
3. Никитина В.Г., Ляшко Г.Г., Нечепоренко Э.Ю. и др. Электромагнитная обстановка на рабочих местах с ПЭВМ / Ежегодник Российского национального комитета по защите от неионизирующих излучений за 2011 год. – М.: Центр электромагнитной безопасности, 2012. С. 131-137.
4. Корневский Н.А., Титова А.В. Метод синтеза нечетких моделей оценки влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на состояние здоровья // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10. № 2. С. 102-117.
5. Мясоедова М.А., Корневский Н.А., Стародубцева Л.В., Писарев М.В. Математические модели оценки влияния электромагнитных полей на появление и развитие профессиональных заболеваний в электроэнергетической отрасли // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7. № 2. С. 27-42.
6. Корневский Н.А., Мясоедова М.А., Разумова К.В., Серебровский А.В. Метод синтеза математических моделей прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний работников предприятий электроэнергетики // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9. № 2. С. 127-143.

7. Мясоедова М.А. Прогнозирование и ранняя диагностика профессиональных заболеваний работников электроэнергетической отрасли на основе гибридных нечетких моделей / Дис. канд. техн. наук. – Курск, 2019. 162 с.
8. Корневский Н.А. Проектирование нечетких решающих сетей, настраиваемых по структуре данных для задач медицинской диагностики // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2005. Т. 4. № 1. С. 12-20.
9. Корневский Н.А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1. С. 33-35.
10. Корневский Н.А., Родионова С.Н., Хритина И.И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений. – Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.
11. Корневский Н.А., Серебровский Н.А., Коптева В.И., Говорухина Н.А. Прогнозирование и диагностика заболеваний, вызываемых вредными производственными и экологическими факторами, на основе гетерогенных моделей. – Курск: Изд-во Курск. гос. с.-х. академии, 2012. 231 с.
12. Корневский Н.А., Крупчатников Р.А., Аль-Касабех Р.Т. Теоретические основы биофизики акупунктуры с приложениями в медицине, психологии и экологии на основе нечетких сетевых моделей. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. 528 с.

*Николай Алексеевич Корневский,  
д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой,  
кафедра биомедицинской инженерии,  
Дмитрий Витальевич Титов,  
д-р техн. наук, профессор,  
кафедра вычислительной техники,  
Анна Владимировна Титова,  
аспирант,  
Софья Николаевна Родионова,  
аспирант,  
кафедра биомедицинской инженерии,  
ФГБОУ ВО «Юго-Западный  
государственный университет»,  
г. Курск,  
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru*

\* \* \* \* \*