Math-Net.Ru
Общероссийский математический портал

И. А. Семенов, Г. Д. Копаница, Разработка и внедрение экспертной телемедицинской системы генерации заключений врача на основе результатов лабораторных исследований,
Искусственный интеллект и принятие решений, 2016, выпуск 3, 3–10

https://www.mathnet.ru/iipr288

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
https://www.mathnet.ru/rus/agreement

Параметры загрузки:
IP: 18.97.14.87
17 января 2026 г., 04:02:02

И.А. Семенов Г.Д. Копаница

Разработка и внедрение экспертной телемедицинской системы генерации заключений врача на основе результатов лабораторных исследований

Аннотация. В статье представлены результаты разработки и внедрения телемедицинской экспертной системы автоматической генерации заключений врача на основании лабораторных исследований. Язык представления знаний системы основывается на исчислении предикатов первого порядка. Система была разработана и внедрена в лабораторной службе «Хеликс».

Ключевые слова: ЛИС, экспертные системы, телемедицина, язык представления знания.

Введение

Опыт применения ИМИС для поддержки принятия решений врачей на этапе диагностики показывает эффективность подобных решений. Однако многочисленные попытки реализации систем поддержки принятия решений, ориентированных на пациентов, показали, что требуется большая осторожность и особенная форма представления пациенту автоматически сформированных врачебных заключений. Опыт также показывает, что подобные решения эффективно работают с хроническими пациентами, которые прошли специальное обучение и хорошо осведомлены как о своей болезни, так и об особенности работы медицинской информационной системы [5, 6].

Основной проблемой при формулировании и обработке медицинских знаний является такая их характеристика как нечеткость, которая в виде вероятностных величин используется в стандартах оказания медицинской помощи и диагностики. Из этого следует, что расширение практики применения ИМИС для поддержки принятия решений широкого круга пациентов потребует реализации математических моделей, способных обрабатывать медицинские знания и правила, сформулированные с использованием нечеткостей и персонифицированности [1, 2].

Также существует проблема восприятия автоматически сгенерированных врачебных заключений пациентами. Многие телемедицинские проекты завершились неудачно из-за плохого восприятия и недоверия пациентов. Одним из способов повышения доверия пациентов и улучшения их восприятия системы является генерация заключений врачей на языке максимально приближенном к естественному.

Целью настоящего исследования является разработка ориентированной на пациента системы поддержки принятия решений при формировании заключений врача на основе анализа результатов лабораторных исследований. Для достижения поставленной цели разрабатывается экспертная система, решающая следующие задачи:

- постановка диагноза (группы диагнозов);
- описание состояния здоровья на естественном языке;
- формирование рекомендаций по проведению дальнейших исследований на естественном языке;
- выбор специалиста для дальнейшего обращения.

Решение перечисленных задач сводится к решению задачи классификации, которая в общем виде формулируется следующим образом. Имеется множество *объектов* (ситуаций), раз-

деленных некоторым образом на *классы*, задано конечное множество объектов, для которых известно, к каким классам они относятся. Это множество называется *обучающей выборкой*. Классовая принадлежность остальных объектов не известна. Требуется построить алгоритм, способный классифицировать произвольный объект из исходного множества.

Фактически задача заключается в том, чтобы в автоматическом режиме сопоставить вектору результатов лабораторных тестов множество возможных значений диагнозов, рекомендаций и специалистов.

1.Методы

Для общения с экспертами отражения их знаний в системе на основе исчисления предикатов первого порядка был реализован язык представления знаний (ЯПЗ). В рамках языка, на котором реализована экспертная система (ЭС) DoctorEase, явным образом выделяется его прямое использование и его расширение за счет пакетов функций и создания «автономного» ЯПЗ с последующей интерпретацией программ на созданном языке. Но в последнем случае базовый язык, как правило, становится инструментальным средством для реализации ЯПЗ.

ЯПЗ отвечает следующим требованиям:

- наличие простых и вместе с тем достаточно мощных средств представления сложно-структурированных и взаимосвязанных объектов;
- наличие гибких средств управления выводом, учитывающих необходимость структурирования правил работы решателя;
- «прозрачность» системных механизмов для программиста, т.е. возможность их доопределения и переопределения на уровне входного языка.

Формирование базы знаний системы основывается на формализации стандартов диагностики, стандартов оказания медицинской помощи и экспертного опыта врачей.

На первом шаге были определены множества диагнозов, специалистов и исследований, по которым возможна поддержка принятия решений пациента. Для каждого типа исследований было определено множество диагнозов и специалистов, которым это исследование можно сопоставить. Для каждого диагноза был определен вектор результатов исследований, подтверждающих диагноз и вектор результатов лабораторных исследований, исключающих диагноз с установлением коэффициента уверенности для каждого элемента вектора. Коэффициенты уверенности формировались на основании стандартов диагностики из вероятностей проявления определенных симптомов. На основании данных множеств были сформированы правила логического вывода на основе логики исчисления предикатов первого порядка.

Для формализации правил и реализации пользовательской логики был разработан интерфейс, позволяющий для каждого исследования формировать набор правил на языке описания знаний, используемом экспертной системой.

Для более точной диагностики на этапе формирования базы знаний привлекались практикующие врачи-эксперты для формирования обучающей выборки.

Был разработан алгоритм классификации со следующими возможными исходами:

1. Найдено множество диагнозов, которые можно с высокой уверенностью сопоставить данному набору показателей.
2. Не найдено ни одного диагноза, который можно было бы с высокой долей уверенности сопоставить данному набору параметров.
3. Найдено множество диагнозов, для уверенной постановки которых требуются дополнительные исследования или антропометрические параметры пациента.

Экспертная система DoctorEase, предназначенная для анализа результатов лабораторного исследования и выработки рекомендаций врача, была разработана и внедрена в лабораторной службе «Хеликс».

2.Результаты

Разработанная экспертная система DoctorEase состоит из следующих основных компонентов: база данных (БД), база знаний (БЗ), решатель, редактор БЗ, система тестирования, система объяснений (Рис. 1).

База данных с динамической структурой данных предназначена для хранения промежуточных, разреженных данных решаемой задачи, основанных на результатах (фактах) исследований заказа пациента, источником которых является лабораторная информационная система (ЛИС).

Хранилище данных ЭС DoctorEase содержит модель исследования пациента, его мета-

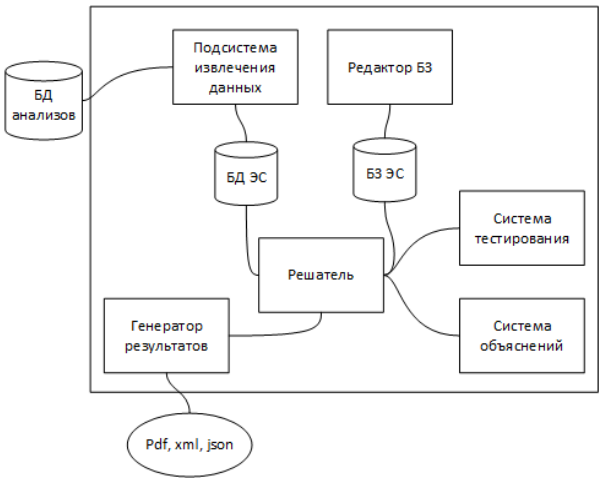

Рис.1. Структурная схема экспертной системы

описание, представляющую все его компоненты и сущности, на основе которых строятся процессы анализа данных, в удобном для обработки виде. Подход к организации разреженных и не сгруппированных данных в БД ЭС основан на их хранилище, позволяющем лучше выразить знания предметной области в понятных для анализа структурах.

База знаний DoctorEase предназначена для хранения экспертных знаний предметной области и правил, описывающих их взаимодействие.

Решатель, используя исходные данные из БД и знания из БЗ, формирует такую последовательность правил, которые, будучи применёнными к исходным данным, приводят к решению задачи классификации.

Редактор БЗ автоматизирует процесс наполнения ЭС знаниями, осуществляемый врачом экспертом.

Система объяснений показывает, как система получила решение задачи, и какие знания она при этом использовала, что облегчает эксперту тестирование системы.

ЭС работает в двух режимах: приобретение знаний и решение задачи. В режиме приобретения знаний эксперт описывает правила, при положительном выполнении которых будет сгенерировано заключение. Правило – комплексный объект в ЭС, добавляющий к итоговому заключению свой элемент заключения, если выполняются условия, указанные в данном правиле. Полученный набор правил позволяет ЭС в режиме решения самостоятельно проводить анализ результата заказа пациента и решать задачу без помощи эксперта.

В режиме решения (генерации заключения врача) данные с результатами исследований ЛИС поступают в БД. Решатель на основе входных данных из БД и правил из БЗ формирует решение задачи.

3. Разработка языка представления знаний

Разделим знания экспертной системы на две группы – факты и эвристики. Факты указывают на хорошо известные в предметной области обстоятельства. Такие знания часто называют текстовыми, имея в виду достаточную их освещенность в специальной литературе, учебниках, документациях, справочных системах. Эвристические знания основываются на индивидуальном опыте специалиста (эксперта) в предметной области, накопленном в результате многолетней практики. Эта категория играет решающую роль при работе интеллектуальной программы. Сюда относятся такие знания, как «способы использования нечеткой информации», «способы разрешения противоречий» и т.п.

Имея два типа знаний, должно существовать два подхода к процессу построения модели предметной области. Знания о фактах порождает признаковый или *атрибутивный подход*, который предполагает получение от эксперта информации в виде троек – объект-атрибут-значение атрибута. Второй подход, основанный на эвристических знаниях, называют *структурным* (или когнитивным), осуществляется путём выделения элементов предметной области, их взаимосвязей и семантических отношений.

Язык представления знаний (ЯПЗ) ЭС DoctorEase соединяет в себе оба подхода и способен работать с двумя базами знаний. Первая БЗ опирается на поверхностные знания или факты, вторая - на эвристики.

Рассмотрим виды знаний. Результаты анализа и референсные значения определим, как факты – *поверхностные знания*. Нам известно, что каждый из них в отдельности означает. Совокупность нескольких элементов результата анализа, влияющих друг на друга, образуют поле действия. *Глубинные знания* экспертов о структурном влиянии элементов друг на друга образуют базу эвристических знаний. Таким образом, первая БЗ хранит информацию о структурных элементах результатов анализа (лабораторного исследования), а вторая хранит

знания о влиянии компонентов анализа друг на друга, суть которых неявная реализация, т.е. не один к одному.

Для *атрибутивного подхода* характерно наличие наиболее полной информации о предметной области: об объектах, их атрибутах и о значениях атрибутов. Кроме того, существенным моментом является использование дополнительной обучающей информации, которая задается группированием объектов в классы по тому или иному содержательному критерию.

Структурный подход к построению предметной области предполагает выделение следующих когнитивных элементов знаний: понятия; взаимосвязи; метапонятия; семантические отношения.

Выделенные выше сущности образуют языковую систему, под которой будем понимать совокупность понятий, обладающую следующими свойствами: уникальностью (отсутствие избыточности), полнотой (достаточно полным описанием различных процессов, фактов и явлений предметной области), достоверностью (валидностью – соответствием выделенных единиц смысловой информации их реальным наименованиям) и непротиворечивостью (отсутствием омонимии).

Созданный на основе логики исчисления предикатов первого порядка [3] ЯПЗ является расширяемым языком. Если пользователю нужна новая команда или набор условий, то он может реализовать ее самостоятельно. Пользователям дается возможность определять командные отношения так же свободно, как и обычные. Это позволяет создавать программы, ориентированные на решение задач конкретной предметной области.

Основной задачей считается создание таких отношений в языке, использование которых освобождает пользователей от необходимости конструирования сложных запросов. Сложные запросы, близкие к предложениям естественного языка, создаются для того, чтобы ответы экспертной системы содержали максимально возможное количество информации в удобной для восприятия форме.

Экспертная система DoctorEase (Модуль «Редактор БЗ», Рис.1) позволяет составлять запросы на интуитивно понятном языке, основанном на правилах логики. Используется описание ПО в понятиях приближенных к реальным объектам ПО.

На Рис. 2 приведен пример интерфейса заведения знаний в ЭС.

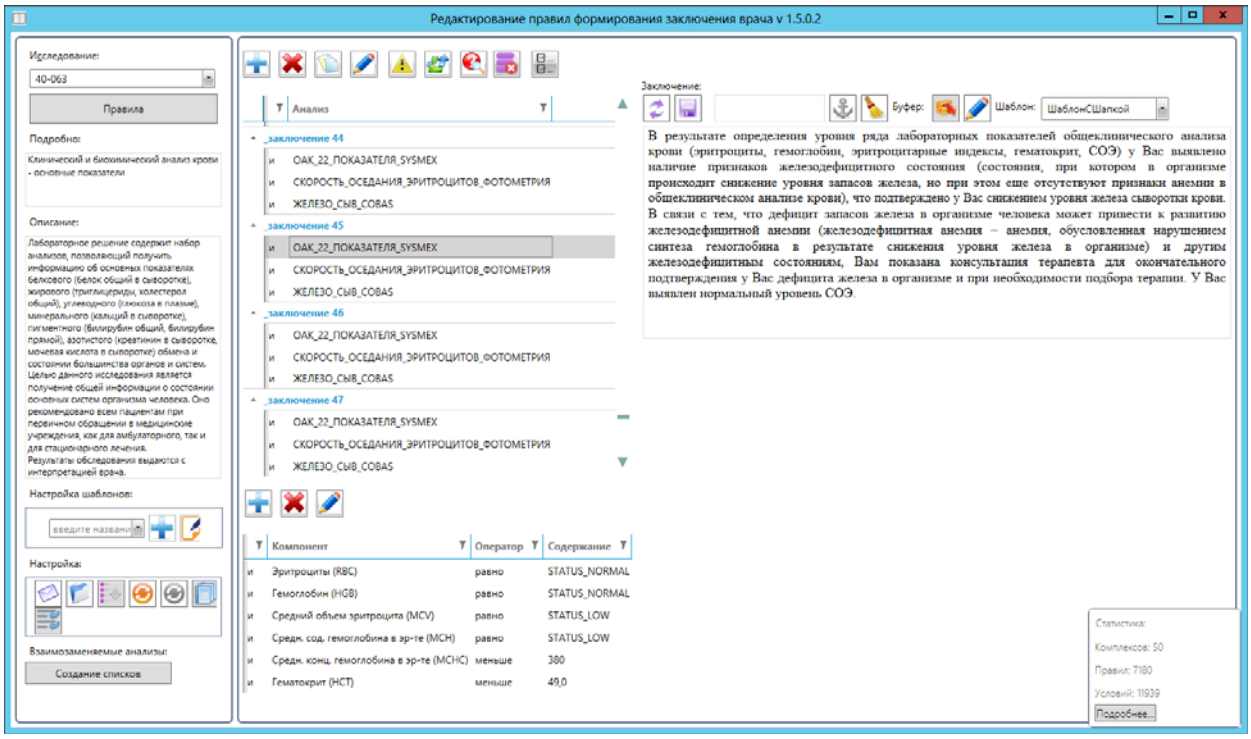

Рис.2. Интерфейс работы со знаниями ЭС DoctorEase

4. Формирование базы знаний экспертной системы на основе правил

На первом этапе определяется конфигурация исследования – составной объект, который содержит необходимые и достаточные данные для создания заключения по заказу пациента. В конфигурацию входят анализы и правила логического вывода (Рис. 3).

Правило представляет собой комплексный объект, определенный для конкретного исследования и состоящий из наборов анализов и условий их обработки. Правило добавляет к итоговому заключению свой результат после оценки выполнимости условий, указанных в данном правиле.

Для каждого правила определен список исключаемых правил, перестающих влиять на заключение, если выполнимо определенное условие.

Анализ является шаблоном теста, выполняемым в ЛИС, и состоит из компонентов анализа – шаблонов для компонента теста (Рис. 4-Рис. 6), например, в тесте Общий анализ крови (ОАК) – 22 компонента.

Анализы группируются в исследования – коммерческие единицы номенклатуры, наличие которых в заказе является основанием для обработки заказа.

Набор условий – список условий, соединенных между собой логическими операциями между условиями.

Возможные операции:

- Операции сравнения внутри условий.
- Логические операции между условиями.
- Список исключаемых правил.

Условия, содержащиеся в правилах, являются комплексным объектом, который может включать в себя сравнение фактических значений компонентов анализов с нормой, а также сравнение правил с их выполнимостью. Каждый тип компонента имеет свои операции сравнения: числовой (=, <>), текстовый (=, неравно, включает), значение список (=, неравно). Условия связаны между собой логическими операциями И, ИЛИ и унарной операцией НЕ.

5. Процесс генерации заключения врача

После получения фактических результатов тестов система логического вывода начинает формировать заключение по следующему алгоритму:

1. Данные с результатами исследований ЛИС поступают в БД.
2. Заказ пациента анализируется на предмет вхождения в него исследований, на которые существует конфигурация исследования.
3. Значение компонентов его тестов анализируется для определения выполнимых правил из БЗ.

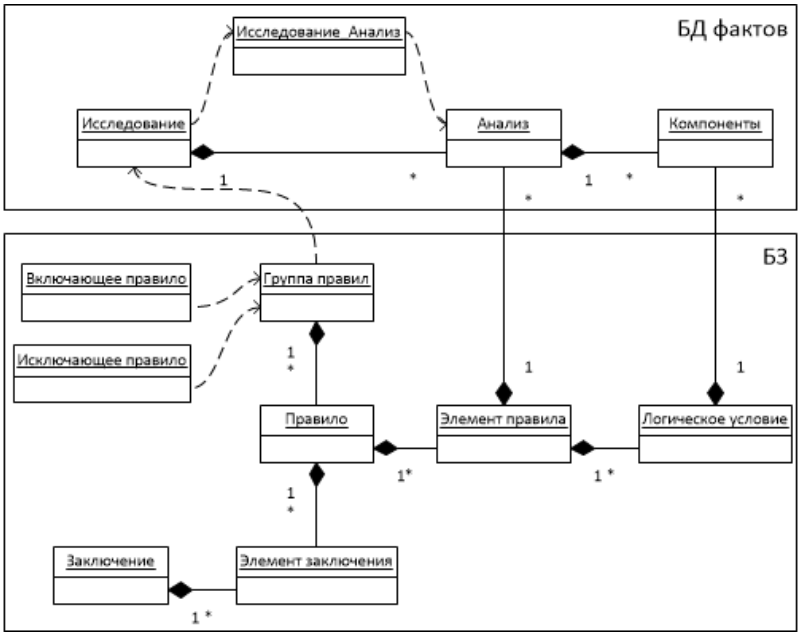

Рис. 3. Объектная модель ЭС DoctorEase

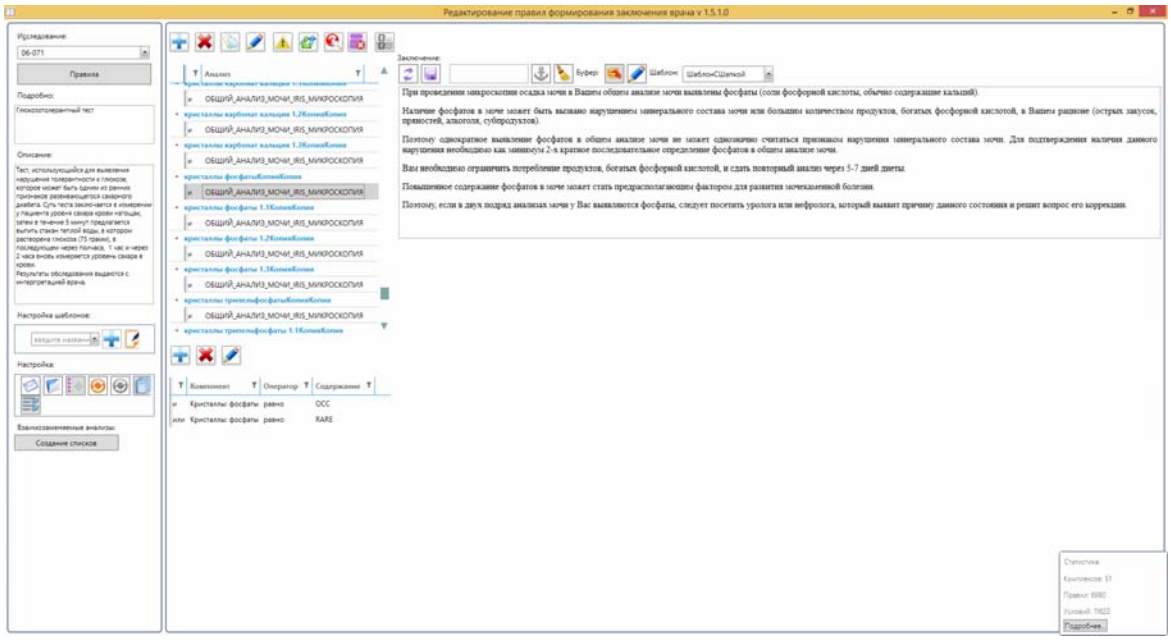

Рис.4. Формирование правил вывода для общего анализа мочи

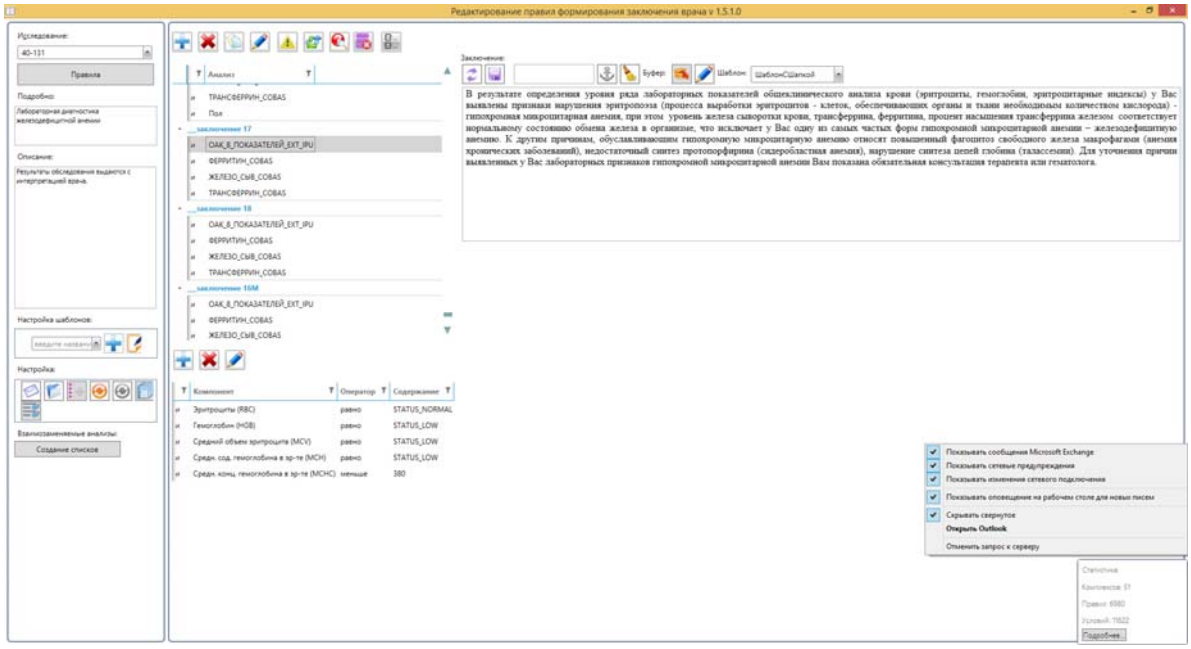

Рис.5. Формирование правил вывода для общего анализа крови

4. Формируется список выполнимых правил.
5. Из списка исключаются правила, которые должны быть исключены по причине выполнимости какого-либо правила.
6. Элементы заключения полученного списка правил вставляются в итоговый документ заключения в порядке следования правил в конфигурации.

Пример сгенерированного заключения представлен на Рис. 7.

6. Внедрение и эксплуатация системы DoctorEase

Система была внедрена в лабораторной службе «Хеликс». В настоящий момент экспертная система DoctorEase находится в промышленной эксплуатации и генерирует порядка 3500 заключений в день или около 100 000 в месяц.

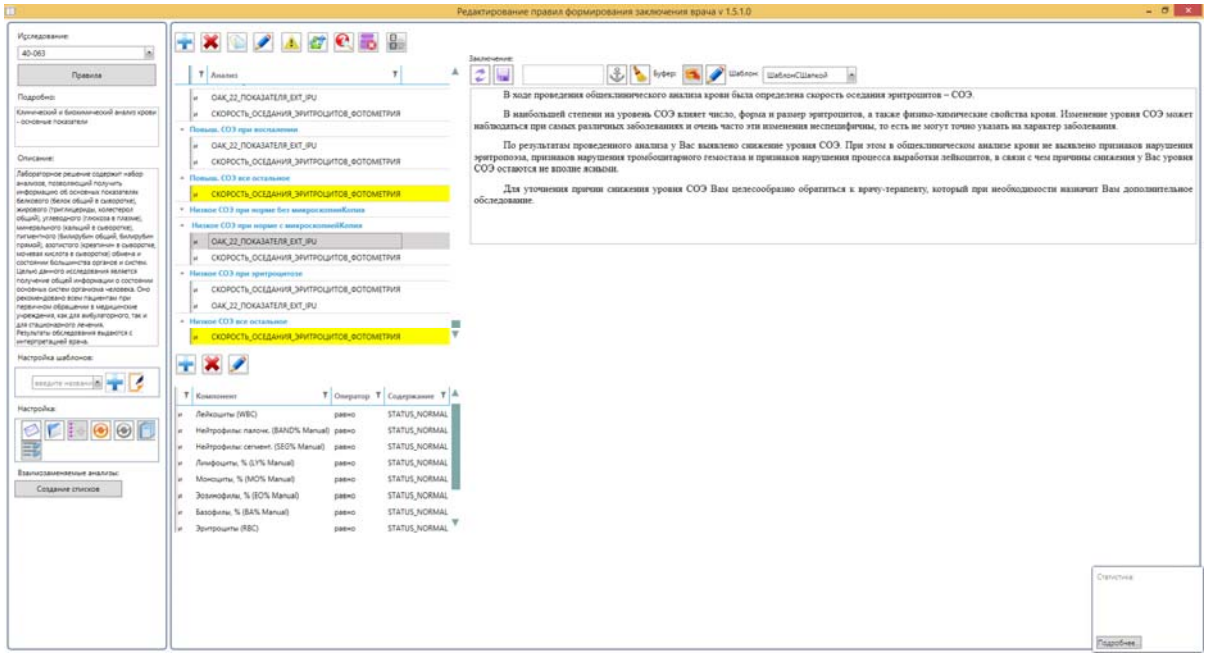

Рис.6. Формирование правил вывода для анализа скорости оседания эретроцитов

HELIX® Лабораторная служба Хеликс
Телефон: 8(800)700-03-03
Информация в интернете: www.helix.ru

Лицензия: ЛО-78-01-005165
ISO 9001:2008; ГОСТ Р ISO 15189-2009
Код в реестре внешнего контроля качества EQAS 8659
Код в реестре внешнего контроля качества ФСВОК 5871

Физико-химические показатели общего анализа мочи:

Интерпретация кислотности (реакции) мочи, удельного веса мочи в связи с их высокой вариабельностью и зависимостью от многих факторов, в том числе объема потребляемой жидкости, качественного состава потребляемых продуктов, по данным только одного общего анализа мочи не проводится.

В общем анализе мочи по всем физико-химическим показателям не выявлено никаких значимых отклонений от нормы.

Микроскопическое исследование осадка мочи:

При проведении микроскопии осадка мочи в Вашем общем анализе мочи выявлены оксалаты (соли щавелевой кислоты, обычно содержащие кальций).
Наличие оксалатов в моче может быть вызвано нарушением минерального состава мочи или большим количеством продуктов, богатых щавелевой кислотой, в Вашем рационе (щавеля, шпината, бобовых, инжира, какао, шоколада, крепкого чая, натурального кофе и др.).
Поэтому однократное выявление оксалатов в общем анализе мочи не может однозначно считаться признаком нарушения минерального состава мочи. Для подтверждения наличия данного нарушения необходимо как минимум 2-х кратное последовательное определение оксалатов в общем анализе мочи.
Вам необходимо ограничить потребление продуктов, богатых щавелевой кислотой, и сдать повторный анализ мочи через 5-7 дней диеты.
Повышенное содержание оксалатов в моче может стать предрасполагающим фактором для развития мочекаменной болезни.
Поэтому, если в двух подряд анализах мочи у Вас выявляются оксалаты, следует посетить уролога или нефролога, который выявит причину данного состояния и решит вопрос его коррекции.

Врач: **А. Яковенко**

Заведующая лабораторией: **И. Скибо**

Дата: 05.02.2015

Лабораторная служба Хеликс для результатов клиники № 232 www.helix.ru

Рис.7. Пример заключения врача

Анализ корректности генерируемых заключений проводился путем оценки случайной выборки из 200 заключений двумя независимыми экспертами. Анализ заключений показал корректность 199 заключений из 200 при полном согласии экспертов. Некорректность заключения была вызвана опечаткой при составлении правила (был выбран неверный оператор сравнения).

Анализ повторных обращений к врачам лабораторной службы показал, что доля пациентов, обратившихся повторно после получения автоматически сгенерированного заключения, составляет около 40%.

Заключение

В статье описан процесс разработки и внедрения экспертной системы DoctorEase, которая позволяет в автоматическом режиме формировать заключения врача на основе результатов лабораторных исследований. Система позволяет пациентам лабораторной службы, не будучи специалистами в области медицины, получать результаты на языке пользователя, не ориентируясь в значениях показателей. Для лабораторной службы внедрение системы позволило повысить процент повторных обращений пациентов как за более глубокими исследованиями, так и за обследованием и лечением.

В дальнейшем планируется развитие языка представления данных и системы логического вывода для преодоления ограничений логики исчисления предикатов первого порядка. Решается задача использования нечеткой логики для работы с коэффициентами уверенности для организации более гибкого логического вывода.

Литература

1. Boegl K., Adlassnig K.P., Hayashi Y., Rothenfluh T.E., Leitich H. Knowledge acquisition in the fuzzy knowledge representation framework of a medical consultation system // Artif Intell Med. 2004. Т. 30. № 1. — С. 1-26.
2. Bratsas C., Koutkias V., Kaimakamis E., Bamidis P., Maglaveras N. Ontology-based vector space model and fuzzy query expansion to retrieve knowledge on medical computational problem solutions // Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc. 2007. Т. 2007. — С. 3794-7.
3. Morris B.J. Opposites attract: the role of predicate dimensionality in preschool children's processing of negations // J Child Lang. 2003. Т. 30. № 2. — С. 419-40.
4. Petersen M.J., LaMarche D. Telemedicine: evolving technology in an e-health care world // Manag Care Q. 2000. Т. 8. № 3. — С. 15-21.
5. Копаница Г.Д. Опыт и пути развития информатизации системы здравоохранения США// Врач и информационные технологии. 2013. № 5.- С. 70-73.
6. Копаница Г.Д., Цветкова Ж.Ю., Европейский опыт и пути развития информатизации системы здравоохранения// Врач и информационные технологии. 2013. № 1.- С. 49-53.

Семенов Илья Александрович. Директор департамента информационных технологий - Лабораторная служба «Хеликс». Окончил Санкт-Петербургский электротехнический университет в 1999 году. Кандидат технических наук. Автор восьми печатных работ. Область научных интересов: медицинская информатика. E-mail: semenov.i@spb.helix.ru

Копаница Георгий Дмитриевич. Доцент кафедры оптимизации систем управления, Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета. Доцент Томского государственного архитектурно-строительного университета. Окончил Томский политехнический университет в 2008 году. Кандидат технических наук. Автор 48 печатных работ. Область научных интересов: медицинская информатика. E-mail: georgy.kopanitsa@gmail.com