ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ОЧАГОВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ПОДЖЕЛУДОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ПО ДАННЫМ ЭНДОСКОПИЧЕСКОЙ УЛЬТРАСОНОГРАФИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЭХОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

В.А. Белозеров¹, О.И. Охотников¹, Н.А. Корневский², С.Н. Григорьев¹

¹ Курская областная клиническая больница; Россия, 305004, Курск, ул. Сумская, 35а.

² Юго-Западный государственный университет; Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Контакты: Белозеров Владимир Анатольевич b9102107495@yandex.ru

Реферат

Актуальность: Дифференциальная диагностика очаговых образований поджелудочной железы является сложной клинической задачей из-за схожести их эхоэмоиотики различных патологий. Одним из путей объективизации и повышения точности данных ультразвукового исследования является использование методов искусственного интеллекта для интерпретации изображений.

Цель: Повышение качества дифференциальной диагностики очаговой патологии поджелудочной железы по данным эндоскопической ультрасонографии на основе анализа эхографической текстуры с использованием нечетких математических моделей.

Материал и методы: По поводу очаговых образований панкреатобилиарной зоны в Курской областной клинической больнице эндоскопическая ультрасонография выполнена у 272 пациентов. Использовалась эндоскопическая видеосистема фирмы Olympus EVIS EXERA II с ультразвуковым процессором EU-ME1. Солидные опухолевые образования поджелудочной железы выявлены у 109 (40,1 %) пациентов, локальные формы хронического панкреатита диагностированы у 40 (14,7 %) больных. По результатам исследований выделены основные типы эталонных эндосонограмм, соответствующих дифференцируемой патологии, на основании которых с использованием гибридных нечетких математических решающих правил получена нечеткая гибридная модель дифференциальной диагностики хронического очагового панкреатита и протоковой аденокарциномы поджелудочной железы.

Результаты: Выбранный источник информации и метод синтеза гибридных нечетких решающих правил позволили получить нечеткую гибридную модель дифференциальной диагностики хронического панкреатита и протоковой аденокарциномы. По результатам математического моделирования и статистических испытаний на репрезентативных контрольных выборках было показано, что полученная модель дифференциальной диагностики на основе эталонных эндосонограмм, отражающих эхографическую текстуру очаговых образований поджелудочной железы, обеспечивает уверенность в искомом диагнозе на уровне 0,6. Дополнительная информация, используемая при анализе эндосонограмм, повышает диагностическую уверенность до величины 0,9.

Заключение: Полученная модель дифференциальной диагностики хронического очагового панкреатита и протоковой аденокарциномы поджелудочной железы обеспечивает уверенность в принятии решений не хуже 0,9, что является приемлемым показателем качества в клинической практике, позволяя ставить диагноз в условиях недостаточной статистики при плохо формализуемой структуре данных.

Ключевые слова: поджелудочная железа, хронический очаговый панкреатит, протоковая аденокарцинома, дифференциальная диагностика, эталонная эндосонограмма, математическая модель, нечеткие решающие правила

Для цитирования: Белозеров В.А., Охотников О.И., Корневский Н.А., Григорьев С.Н. Дифференциальная диагностика очаговых образований поджелудочной железы по данным эндоскопической ультрасонографии на основе анализа эхографической текстуры с использованием нечетких математических моделей. Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2021;4(3):64-73.

DOI: 10.37174/2587-7593-2021-4-3-64-73

Введение

Дифференциальная диагностика очаговых образований поджелудочной железы (ПЖ) является сложной проблемой для клинической медицины. Основными факторами, затрудняющими диагностику, является трудная анатомическая доступность органа, близость и функциональная взаимосвязь органов панкреатобилиарной зоны [1], идентичность характера изменений, выявленных

при лучевых методах исследования (УЗИ, КТ, МРТ) и связанные с этим трудности интерпретации полученных изображений [2]. В связи с этим проблема дифференциальной диагностики злокачественных новообразований ПЖ и хронического панкреатита (ХП) остается и до настоящего времени крайне актуальной [3, 4].

Одним из наиболее информативных методов отображения паренхимы и протоковой системы ПЖ является эндоскопическая ультрасонография

(ЭУС) [5–7]. Метод используется для уточняющей и дифференциальной диагностики при опухолях, кистозных новообразованиях ПЖ и панкреатитах, а также позволяет определить показания к оперативному вмешательству и его характер [8]. Диагностическая эффективность ЭУС, которая первоначально и была разработана для диагностики патологии ПЖ, обусловлена близостью расположения ультразвукового датчика к органу и возможностью динамической визуализации [8–10]. Приближение ультразвукового датчика при эндоскопическом исследовании к зоне интереса дает возможность детально изучить структуру ПЖ [8]. Одним из ключевых диагностических признаков является эхографическая текстура очаговых образований ПЖ, визуально отражающая совокупность свойств внутренней среды объекта. Именно в оценке эхотекстуры максимально реализуются преимущества ЭУС, которая обладает уникальной способностью отображать детали паренхимы ПЖ и не полагается исключительно на размер, асимметрию железы или расширение протоков «вверх по течению», чтобы оценить наличие очаговых образований [11].

При этом в литературе отсутствуют систематизированные сведения об эхографической текстуре очаговых образований ПЖ, а описание эхопризнаков этой патологии часто противоречиво. Это, в частности, касается однородности очага, характера его контуров. Большинство авторов считает, что одним из ключевых эхопризнаков в дифференциальной диагностике очаговых образований ПЖ является панкреатический рисунок, который является отображением текстуры паренхимы органа [1, 8]. Вместе с тем, представления о его характере в литературе неполны. Предполагается что это однородный, мелкозернистый, крапчатый рисунок, имеющий вид «соли с перцем». Вариантов оценки характера качественных признаков, описывающих эхотекстуру различной патологии ПЖ с привлечением математического аппарата при анализе литературных данных мы не встретили. В связи с этим представляется актуальной проблема детализации эхографической текстуры очаговых образований ПЖ с целью объективизации данных эндосонаграфии и улучшения качества дифференциальной диагностики патологии органа.

В процессе ЭУС формируются сложноструктурируемые изображения, сегментация и классификация которых требует высокой квалификации врача, так как из-за особенностей субъективного зрительного восприятия теряется информативность, оценка параметров производится субъективно, что затрудняет формулировку стандартизированного заключения.

Одним из подходов к повышению точности анализа медицинских изображений, включая эндосонаграммы, является использование методов

искусственного интеллекта для анализа и интерпретации первичных данных исследуемого класса.

Широкое распространение компьютерной техники и информационных технологий создало условия для увеличения объема и точности автоматизированной обработки медицинских изображений. В области построения систем интеллектуальной поддержки принятия диагностических решений активно используются: концепции построения автоматизированных медицинских информационных систем (МИС), теоретические принципы создания медицинских экспертных систем, модели представления знаний, нейронные сети и нечеткие логические выводы [12–26].

В мировой практике для автоматизированной обработки изображений используют методы распознавания, основанные на идее Виолы — Джонса, технологии бустинга и нейросетевых моделях классификаторов.

В настоящее время получили широкое распространение так называемые гибридные технологии, позволяющие объединять в одном классификаторе технологии обучаемых классификаторов и технологии мягких вычислений, успешно функционирующие в условиях неопределенности и реализующие комплексное использование различных методов искусственного интеллекта, что позволяет сформировать новую методологию построения таких систем. Однако во многих случаях они не обеспечивают получения достоверных решений ввиду малообоснованного выбора параметров моделирования, при этом нахождение адекватных решений из-за необходимости многократного выполнения реализаций используемых методов, алгоритмов и моделей, с целью выбора наиболее оптимальных параметров, сопровождается большими временными и материальными затратами.

В определенной степени перечисленные и ряд других недостатков устраняются методологией синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), разработанной в Юго-Западном государственном университете [14–16, 25, 27–31]. Отличительной особенностью МСГНРП является активное соединение естественного интеллекта врачей (клиническое мышление) и интеллекта инженера-когнитолога с искусственным гибридным интеллектом. Клиническое мышление экспертов восполняет недостаток необходимых статистических данных и позволяет при взаимодействии с инженером-когнитологом строить формальные модели для плохоформализуемых задач. Инженер-когнитолог, используя данные разведочного анализа, подбирает математические модели, адекватные структуре данных решаемых задач. Рациональное взаимодействие интеллектуальных составляющих обеспечивается соответствующим алгоритмическим обеспечением МСГНРП [16, 27, 28]. Такой подход дает возможность создавать качественно новые МИС, позволяющие решать более

широкий круг задач интерпретации изображений и диагностики заболеваний, обеспечивая эффективность прилагаемых решений в условиях неполноты и неопределённости исходных данных [15].

Целью исследования явилось повышение качества дифференциальной диагностики очаговой патологии поджелудочной железы по данным эндоскопической ультрасонографии на основе анализа эхографической текстуры с использованием нечетких математических моделей, при синтезе которых формальные процедуры строятся с использованием клинического опыта высококвалифицированных специалистов ультразвуковой диагностики.

Материал и методы

С 2014 г. в отделении эндоскопии Курской областной клинической больницы ЭУС панкреатобилиарной области выполнена у 729 пациентов. Использовалась эндоскопическая видеосистема фирмы Olympus (Япония) EVIS EXERA II с ультразвуковым процессором EU-ME1. Эндосонография выполнялась ультразвуковыми видеогастроскопами GF UM160 с радиальным датчиком и GF UC140P-AL5 с конвексным. Подготовка к исследованию включала отказ от приема пищи в течение 8 ч. Все исследования выполнялись в условиях общей анестезии. Методика проведения исследования соответствовала стандартной эндосонографии панкреатобилиарной зоны [32].

По поводу очаговых образований панкреатодуоденальной зоны обследовались 272 (37,3 %) пациента. Женщин было 112 (41,2 %), мужчин — 160 (58,8 %). Возраст больных варьировал от 27 до 88 лет (средний возраст $54,6 \pm 6,8$ года). Сравнение признаков, описывающих эхотекстуру очаговых образований, проводили в группе, включающей 149 пациентов. В исследование включены больные с очаговыми солидными образованиями ПЖ по данным ЭУС. Критерием невключения было наличие кистозного компонента в образовании при ЭУС. Критериями исключения являлось отсутствие морфологической верификации патологии или неизвестный исход заболевания при динамическом наблюдении не менее двух лет. Ограничениями к выполнению ЭУС явились ранее выполненные резекционные вмешательства или патология, препятствующая проведению датчика аппарата в двенадцатиперстную кишку.

Солидные опухолевые образования ПЖ выявлены у 109 (40,1 %) пациентов, локальные формы ХП диагностированы у 40 (14,7 %) больных. Окончательный диагноз устанавливался на основании данных гистологического исследования материала, полученного интраоперационно, данных цитологических исследований клеточного материала, полученного при перкутанной аспирационной биопсии и ЭУС контролируемой тонкоигольной пункции очаговых образований, при условии

наблюдения за пациентами не менее 12 мес после исследования. Кроме того, учитывались результаты щипковой биопсии, из слизистой двенадцатиперстной кишки в случаях инвазии опухоли в стенку органа. С целью анализа первичных данных производилась видеофиксация всех исследований с последующей архивацией информации на электронных носителях.

Результаты

В связи с поставленной целью исследования особое внимание уделяли дифференциальной диагностике очаговой формы ХП и протоковой аденокарциномы ПЖ, поскольку данная патология вызывает наибольшие диагностические трудности в связи со схожестью эндосонографических характеристик этих образований.

При проспективном и ретроспективном анализе ультразвуковых видеоизображений пациентов с очаговой патологией ПЖ нами сформирован ряд эндосонограмм, формирующий шкалу эхотекстур изучаемой патологии. Собственные исследования и экспертный анализ показали, что анализируя сонограмму, врач визуализирует некоторую интегральную картину единого целостного изображения, практически не разделяя его на составляющие, что относится и к эхографической текстуре. Для надежной классификации объектов информативными считали следующие признаки, описывающие текстуру: яркость, форму, размеры и пространственное соотношение элементов, составляющих текстуру. Поскольку формальной процедуры задания исходной системы признаков пока не существует, признаки, используемые при решении задачи дифференциальной диагностики очаговых образований ПЖ, задаются на основании опыта специалиста-эндосонографиста.

Из совокупности изображений эндосонограмм были выделены основные типы эхографической текстуры, соответствующие дифференцируемой нами патологии ПЖ. Выделенные типы эхотекстур соответствуют ХП и протоковой аденокарциноме. При этом анализировались только видеоматериалы эндосонографических исследований пациентов с окончательно установленным диагнозом. Среди них группа пациентов с локальными формами ХП составила 18 человек, с аденокарциномами — 39 больных. Кроме того, для объективизации оценки нормального панкреатического рисунка в очаговых образованиях, а также для описания его эхогистологической корреляции приводятся сонограммы эхографической текстуры (панкреатического рисунка) нормальной ПЖ из группы пациентов, у которых наличие очаговых образований не подтверждено при эндосонографии.

Отсутствие гистологической верификации диагноза у значительной части пациентов закономерно, поскольку большинство больных с очаговым

панкреатитом не нуждалось в оперативном лечении, а доля больных с радикальными резекциями также невелика вследствие неоперабельности выявленных опухолей ПЖ.

Сложность получения объемов данных, достаточных для корректного использования методов математической статистики, является одной из особенностей исследуемой патологии. Для решения таких задач в современной математике разработан ряд подходов, один из которых реализуется в рамках МСГНРП, используемой в данной работе. Недостаток статистики в выбранной методологии компенсируется теоретическими и практическими знаниями экспертов, позволяющими формировать функции принадлежности к исследуемым классам состояний. Полученные таким образом функции принадлежности обеспечивают синтез высоконадежных решающих правил прогнозирования и медицинской диагностики, объединяющих достоинства статистических и экспертных методов обработки сложноструктурированных данных.

Учитывая особенности восприятия зрительных образов и различный опыт будущих пользователей разрабатываемых решающих правил (гибридных диагностических моделей), каждый из пяти типов эхографической текстуры был представлен двумя изображениями. Первое изображение представляет собой типовую (эталонную) сонограмму, а второе — искусственно созданное, идеализированное изображение (репер), позволяющий исследователю сосредоточиться на том, какую реальную сонограмму он увидит в той или иной диагностической ситуации. Такое двойное отображение типовой эхотекстуры, на наш взгляд, позволит исследователю более точно акцентировать свое внимание на диагностируемой патологии, обеспечив в дальнейшем более точную диагностику.

Бесспорно, эхографическая текстура коррелирует и отображает гистологические элементы сканируемых тканей. Однако эхогистологические корреляции патологии ПЖ недостаточно изучены и освещены в научной литературе. Эндосонографические критерии хронического панкреатита описаны Jones S.N. et al и дополнены Wiersema M.J. et al. Среди них к паренхиматозным, которые отражаются в текстуре, относятся гиперэхогенные очаги, тяжи, включения, гипоехогенные дольки и кисты. Однако фактическое их гистологическое соответствие неизвестно. Предложены их гипотетические корреляции. Последовательного описания текстуры опухолевых образований ПЖ в литературе не встречается, а ЭУС-критерии рака ПЖ дискуссионны. Тем не менее, в нашей работе на основании собственного опыта и имеющихся в литературе публикаций описаны характеристики типовых эхотекстур

очаговой патологии ПЖ с учетом теоретически возможных эхогистологических корреляций.

Основные типовые эхографические текстуры мы описали следующим образом.

1. Эхографическая текстура нормальной ПЖ. Равномерно чередующиеся округлые, линейные и извитые гипо- и гиперэхогенные эхоструктуры, размеры которых не превышают 2 мм. Эхоструктуры ориентированы в различных направлениях относительно плоскости изображения (рис. 1).

В литературе нормальная эхотекстура описывается как мелкий диффузно-крапчатый рисунок с чередующимися темными и светлыми участками, имеющими вид «соли с перцем». При этом темные участки соответствуют ацинарным структурам, а светлые — междольковым соединительнотканым септам. Поперечные, косые и продольные ультразвуковые «срезы» определяют различную форму эхоструктур от округлой до линейной. Описанная текстура соответствует нормальному панкреатическому рисунку.

2. Эхографическая текстура при ХП с диффузным характером изменений. Панкреатический рисунок отличается формированием дольчатой структуры железы за счет гипоехогенных лобул, подчеркнутых гиперэхогенными тяжами. Размеры эхоструктур как гиперэхогенных, так и гипоехогенных увеличиваются и превышают 2 мм (рис. 2).

Характерная эхотекстура при ХП с диффузным характером изменений обусловлена, главным образом, воспалительными фиброзными изменениями железы: развитие соединительной ткани приводит к выраженной псевдолобулярности железы и развитию очагов фиброза с последующим кальцинозом. Гиперэхогенные структуры могут соответствовать также мелким кальцинатам, белковым пробкам, а лобулярность железы подчеркивается перилобулярным фиброзом с отеком паренхимы.

3. Эхографическая текстура при ХП с очаговыми изменениями. Панкреатический рисунок характеризуется дольчатой структурой железы со сливным характером распределения гипоехогенных лобул (рис. 3).

Характерная эхотекстура при ХП с очаговыми изменениями обусловлена отечно-воспалительными и фиброзными изменениями железы с их неравномерным распределением и выраженностью.

4. Эхографическая текстура при ХП с преимущественно очаговым характером изменений. Панкреатический рисунок характеризуется неоднородной текстурой в очаге с преобладанием гипоехогенных структур со сливным характером распределения, частично маскирующих гиперэхогенные эхоструктуры. Размеры гипоехогенных структур преобладают (рис. 4).

Изменения эхотекстуры при ХП с очаговым характером изменений обусловлены преобладанием воспалительной инфильтрации ацинарной ткани в очаге, на фоне которых участки фиброза,

Рис. 1. Эхографическая текстура нормальной ПЖ: А — эталонная эндосонограмма; Б — реперная схема

Fig. 1. Echographic texture of the normal pancreas: A — reference endosonogram; Б — reference scheme

Рис. 2. Эхографическая текстура при ХП с диффузным характером изменений: А — эталонная эндосонограмма; Б — реперная схема

Fig. 2. Echographic texture of the chronic pancreatitis with diffuse parenchyma disease: A — reference endosonogram; Б — reference scheme

Рис. 3. Эхографическая текстура при ХП с очаговыми изменениями: А — эталонная эндосонограмма; Б — реперная схема

Fig. 3. Echographic texture of the chronic pancreatitis with focal lesions: A — reference endosonogram; Б — reference scheme

Рис. 4. Эхографическая текстура при ХП с преимущественно очаговым характером изменений: А — эталонная эндосонограмма; Б — реперная схема

Fig. 4. Echographic texture of the focal chronic pancreatitis: A — reference endosonogram; Б — reference scheme

Рис. 5. Эхографическая текстура протоковой аденокарциномы ПЖ: А — эталонная эндосонограмма; Б — реперная схема

Fig. 5. Echographic texture of of ductal pancreatic adenocarcinoma: A — reference endosonogram; Б — reference scheme

микрокальцинаты и белковые преципитаты становятся менее заметны.

5. Эхографическая текстура протоковой аденокарциномы ПЖ. Панкреатический рисунок в очаге отсутствует, эхоструктуры теряют идентичность по форме и размерам, теряется равномерное чередование эхопозитивных и эхонегативных структур, формируются сливные области со значительным

преобладанием гипоехогенных с нечеткими границами неправильной формы между ними в пределах очага (рис. 5).

Массив опухолевых клеток, инфильтрирующих паренхиму ПЖ, обеспечивает пониженную эхогенность очага. Протоковая аденокарцинома представлена массивом клеток, значительно отличающихся от нормальных ацинарных и характери-

зуется значительным преобладанием паренхимы над стромой опухоли. Обычный панкреатический рисунок вместе с протоковыми, сосудистыми структурами и фиброзной тканью маскируется в гипоехогенных однородных массах, что наряду с минимальной десмопластической реакцией обуславливает эндосонографическую картину гипоехогенного однородного очага.

Для синтеза решающих правил дифференциальной диагностики очагового панкреатита и рака ПЖ в соответствии с общими рекомендациями МСГНРП под руководством инженера-когнитолога, имеющего опыт работы по синтезу гибридных нечётких решающих правил, формируется группа экспертов по ультразвуковой диагностике патологии органов панкреатобилиарной зоны. Организуется их подготовка в области синтеза гибридных нечетких решающих правил. Количественный состав экспертной группы определяется требованиями, принятыми в квалиметрии, а их качественный состав корректируется с учетом коэффициента конкордации. С учетом сложности и особенностей решаемой задачи количественный состав экспертной группы был определен в составе 8 человек. Далее перед экспертами была поставлена задача для каждой из типовых эхотекстур определить коэффициенты уверенности в отнесении пациентов к одному из классов состояний: панкреатита — ω_{Π} и рака ПЖ — $\omega_{\text{Р}}$.

Результаты работы экспертов и усредненные результаты по исследуемым диагностическим классам приведены в таблицах (табл. 1, табл. 2).

Совместный анализ типовых эхотекстур и усредненных коэффициентов уверенности позволил сделать вывод о том, что специалисты достаточно уверенно оценивают степень совпадения и близость наблюдаемых ими реальных эндосонограмм к эталонным сонограммам и реперным изображениям. Это создает предпосылки значительного увеличения точности в принимаемых решениях путем перехода от шкалы порядка к более мощной шкале интервалов с отображением на ней меры близости между типовыми эхоструктурами ПЖ. Такая шкала S позволяет судить о том, насколько близко располагается объект наблюдений со «своей картинкой» к исследуемым классам состояний по построенным на ней функциям принадлежности $\mu_{\omega_{\Pi}}(S)$ и $\mu_{\omega_{\text{Р}}}(S)$. Это позволяет использовать общие рекомендации МСГНРП для построения нечетких решающих правил к исследуемым классам состояний $\omega_{\text{Р}}$ и ω_{Π} с базовыми элементами в виде функций принадлежности $\mu_{\omega_{\Pi}}(S)$ и $\mu_{\omega_{\text{Р}}}(S)$.

В ходе проведенных исследований, с учетом мнений высококвалифицированных экспертов и структуры данных решаемой задачи, шкала интервалов S была построена по следующим правилам. Номерам типовых эхографических текстур были поставлены в соответствие целые числа от 1 до 5 с учетом того, что с ростом этих чисел увеличивается уверенность в принимаемых решениях по классу $\omega_{\text{Р}}$ через класс ω_{Π} . В качестве единицы измерений выбран отрезок шкалы величиной 0,1. Используя метод Дэлфи, эксперты на интервальной шкале S построили графики функций принадлежности к классам панкреатита и рака, приведенные на

Таблица 1

Результаты опроса экспертов по классу $\omega_{\text{Р}}$
Results of the survey of experts by class $\omega_{\text{Р}}$

Сонограммы Sonograms	C1	C2	C3	C4	C5
Э1	0	0,15	0,18	0,45	0,75
Э2	0	0,15	0,18	0,50	0,82
Э3	0	0,25	0,20	0,45	0,80
Э4	0	0,25	0,30	0,48	0,85
Э5	0	0,08	0,15	0,50	0,82
Э6	0	0,10	0,15	0,48	0,78
Э7	0	0,15	0,20	0,50	0,75
Э8	0	0,15	0,20	0,50	0,78
Среднее Average	0	0,17	0,19	0,48	0,79

Примечание: C_i — сонограмма с номером i ; Э $_j$ — эксперт с номером j

Таблица 2

Результаты опроса экспертов по классу ω_{Π}
Results of the survey of experts by class ω_{Π}

Сонограммы Sonograms	C1	C2	C3	C4	C5
Э1	0	0,80	0,75	0,65	0,30
Э2	0	0,85	0,80	0,6	0,25
Э3	0	0,85	0,85	0,65	0,30
Э4	0	0,90	0,85	0,70	0,15
Э5	0	0,85	0,80	0,70	0,15
Э6	0	0,90	0,80	0,70	0,10
Э7	0	0,75	0,70	0,65	0,10
Э8	0	0,75	0,70	0,60	0,15
Среднее Average	0	0,83	0,78	0,66	0,18

Примечание: C_i — сонограмма с номером i ; Э $_j$ — эксперт с номером j

рис. 6. При построении графиков функций принадлежности учитывалось, что панкреатит и рак у обследуемого могут существовать одновременно.

Частные уверенности U_{ω_l} в исследуемых классах состояний П и Р по признаку текстуры определяется соответствующими функциями принадлежности:

$$U_{\omega_{\text{П}}} = \mu_{\omega_{\text{П}}}(S); \quad (1)$$

$$U_{\omega_{\text{Р}}} = \mu_{\omega_{\text{Р}}}(S). \quad (2)$$

Логика работы этих решающих правил заключается в том, что по выбранной врачом сонограмме с точностью 0,1 определяется значение S с расчетом соответствующих значений функций принадлежности, которые определяют уверенности по исследуемым классам состояний $U_{\omega_{\text{П}}}$ и $U_{\omega_{\text{Р}}}$.

Принятие решения о принадлежности пациента к одному из исследуемых классов состояний осуществляется по максимальному значению:

$$\Omega_l = \max\{U_{\omega_{\text{П}}}, U_{\omega_{\text{Р}}}\}. \quad (3)$$

Уверенности в классах панкреатита $\omega_{\text{П}}$ и рака $\omega_{\text{Р}}$ между третьей и четвертой эндосонограммами отличаются достаточно мало в связи со сходностью ультразвуковой эхоосемиотики, поэтому отнести патологию ПЖ к какому-либо из классов не представляется возможным, тем более что необходимо учесть возможность сочетания рака и ХП. В ходе математического моделирования и экспертного оценивания было установлено, что использование модели (3) для наиболее часто встречающихся текстурных картин без учета других особенностей анализируемых сонограмм обеспечивает уверенность в правильном принятии решений по классу $\omega_{\text{Р}}$ не ниже 0,45, и по классу $\omega_{\text{П}}$ — не ниже 0,72. Между третьей и четвертой эндосонограммами высока вероятность сочетания рака и ХП.

Рис. 6. Графики функций принадлежности к классам панкреатита $\omega_{\text{П}}$ и рака $\omega_{\text{Р}}$

Fig. 6. Graphs of functions belonging to the classes pancreatitis $\omega_{\text{П}}$ and cancer $\omega_{\text{Р}}$

Если в ходе исследований учитывать фактор очагового характера наблюдаемой эхотекстуры, уверенность в правильной классификации по классу возрастает до 0,7.

Дополнительный учет анализируемых структур во взаимосвязи их отношения к протоковым системами печени и ПЖ, а также магистральным сосудам увеличивает диагностическую уверенность по классу $\omega_{\text{Р}}$ до 0,85 и т.д. Уверенность по классу $\omega_{\text{Р}}$ превышает величину 0,95.

Для статистической оценки точности классификации с помощью полученных математических моделей была сформирована контрольная выборка из пациентов с верифицированным диагнозом в количестве 50 человек для класса $\omega_{\text{П}}$ и 32 для класса $\omega_{\text{Р}}$. Дополнительно к каждому классу были сформированы альтернативные классы, включающие другую патологию ПЖ, включая альтернативную патологию, и относительно здоровых людей (100 и 82 человека соответственно). В ходе контроля качества работы решающего правила (3) определялось количество ошибок, совершаемых этим правилом по пациентам, имеющим исследуемую патологию по отношению к альтернативному классу. Результаты контрольных испытаний приведены в табл. 3.

По результатам срабатывания решающих правил определялись такие показатели качества классификации, принятые в теории распознавания образов, как диагностическая специфичность (ДС), диагностическая чувствительность (ДЧ) и диагностическая эффективность (ДЭ) [17, 19].

Из табл. 3 следует, что показатель ДЧ, характеризующий качество срабатывания решающего правила (3) для класса $\omega_{\text{П}}$, равен 0,74 (ДЧ = 0,74). Показатель ДС, характеризующий качество срабатывания решающего правила (3) для класса $\omega_{\text{П}}$ равен 0,68 (ДС = 0,68), а показатель ДЭ — 0,70 (ДЭ = 0,70). Для класса $\omega_{\text{Р}}$: ДЧ = 0,68, ДС = 0,78, ДЭ = 0,75.

Таблица 3

Результаты срабатывания решающих правил
The results of the operation of decision rules

Пациенты		Результаты наблюдения	
		Положительные	Отрицательные
Классы	$N_{\text{П}} = 50$ $N_{\text{ап}} = 100$	37 32	13 68
	$N_{\text{Р}} = 32$ $N_{\text{ап}} = 82$	22 18	10 64

Примечание: $N_{\text{Р}}$ — количество пациентов класса $\omega_{\text{Р}}$; $N_{\text{П}}$ — количество пациентов класса $\omega_{\text{П}}$

Обсуждение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что информация об эхографической текстуре без дополнительных информативных признаков не может использоваться для надежной дифференциальной диагностики исследуемых классов патологии. Однако введенный показатель эхографической текстуры обладает достаточно высокой информативностью, что позволяет рекомендовать его для включения в состав гибридных нечетких решающих правил, обеспечивающих дифференциальную диагностику панкреатита и рака ПЖ с требуемой для медицинской практики точностью.

Использование МСГНРП позволяет компенсировать недостаток статистически достоверных данных благодаря клиническому опыту высококвалифицированных экспертов ультразвуковой диагностики, что позволяет формировать функции принадлежности к исследуемым классам состояний и улучшить качество дифференциальной диагностики очаговой патологии ПЖ.

Сформированная шкала эхографической текстуры очаговых образований ПЖ в перспективе позволит описывать и дифференцировать другие солидные образования органа, а также выявлять различия в пределах определенной патологии, например, анализировать степень дифференцировки протоковой аденокарциномы.

Заключение

Разработка эхопризнаков очаговых образований ПЖ на основе анализа эхографической текстуры по данным ЭУС с использованием разработанных гибридных нечетких решающих правил позволяет объективизировать данные эндосонаграфии и улучшить результаты неинвазивной дифференциальной диагностики. Однако для повышения информативности нечеткой математической модели в решающих правилах необходимо учитывать все ключевые сонографические характеристики очага, а именно форму, размеры, эхогенность, характер контуров.

Список литературы / References

1. Неустроев ВГ, Ильичева ЕИ, Владимирова АА. Эндоскопическая ультрасонография в дифференциальной диагностике хронического панкреатита и опухолей поджелудочной железы. Клиническая эндоскопия. 2007;3(12):31-43. [Neustroev VG, Ilicheva EI, Vladimirova AA. Endoscopic ultrasonography in the differential diagnosis of chronic pancreatitis and pancreatic tumors. Clinical Endoscopy. 2007;3(12):31-43. (In Russian)].
2. Gandhi NS, Feldman MK, Le O, Morris-Stiff G. Imaging mimics of pancreatic ductal adenocarcinoma. Abdom Radiol (NY). 2018 Feb;43(2):273-84. DOI: 10.1007/s00261-017-1330-1. PMID: 29038855.
3. Рябин НС, Катрич АН, Быков МИ и др. Возможности эндоскопической ультрасонографии в диагностике солидных новообразований поджелудочной железы. Кубанский научный медицинский вестник. 2018;25(6):177-83. [Ryabin NS, Katrich AN, Bykov MI et al. The possibilities of endoscopic ultrasonography in the diagnostics of solid pancreatic neoplasms. Kuban Scientific Medical Bulletin. 2018;25(6):177-83. (In Russian)]. DOI: 10.25207/1608-6228-2018-25-6-177-183.
4. Костина ЮД, Павелец КВ. Диагностика и лечение рака поджелудочной железы современное состояние проблемы. Медицина: теория и практика. 2018;3(3):16-26. [Kostina JD, Pavelts KV. Diagnosis and treatment of pancreatic cancer the current state of the problem. Medicine: Theory and Practice. 2018;3(3):16-26. (In Russian)].
5. Kitano M, Yoshida T, Itonaga M, et al. Impact of endoscopic ultrasonography on diagnosis of pancreatic cancer. J Gastroenterol. 2019;54(1):19-32. DOI: 10.1007/s00535-018-1519-2. Epub 2018 Nov 7. PMID: 30406288.
6. Canto MI, Harinck F, Hruban RH, et al. International Cancer of the Pancreas Screening (CAPS) Consortium summit on the management of patients with increased risk for familial pancreatic cancer. Gut. 2013;62(3):339-47.
7. Welinsky S, Lucas AL. Familial Pancreatic Cancer and the Future of Directed Screening. Gut Liver. 2017 Nov 15;11(6):761-70. DOI: 10.5009/gnl16414. PMID: 28609837.
8. Старков ЮГ, Солодинина ЕН, Шишин КВ и др. Эндосонаграфия в диагностике заболеваний органов гепатопанкреатобилиарной зоны. Хирургия. 2009(6):10-6. [Starkov YuG, Solodina EN, Shishin KV et al. Ultrasound diagnostics of the hepatobiliary and pancreas diseases. Pirogov Russian Journal of Surgery. 2009(6):10-6. (In Russian)].
9. Шишин КВ, Быстровская ЕВ, Недолужко ИЮ и др. Роль эндоскопии и эндо-УЗИ в диагностике рака поджелудочной железы. Анналы хирургической гепатологии. 2019;24(3):36-43. [Shishin KV, Byistrovskaya EV, Nedoluzhko IYu, et al. Endoscopy and endosonography in the diagnostics of pancreatic cancer. Annals of HPB Surgery. 2019;24(3):36-43. (In Russian)]. DOI: 10.16931/1995-5464.2019336-44.
10. Helmstaedter L, Riemann JF. Pancreatic cancer – EUS and early diagnosis. Langenbecks Arch Surg. 2008 Nov;393(6):923-7. DOI: 10.1007/s00423-007-0275-1. Epub 2008 Feb 5. PMID: 18247044.
11. Hawes RH, Fockens P. Endosonography. Elsevier Inc, 2006. 329 p.
12. Ключкин ИВ, Кинзерский АЮ, Кинзерская МА и др. Количественная оценка ультразвукового изображения. Казанский медицинский журнал. 2005;86(3):237-40. [Klyushkin IV, Kinzerskii AYU, Kinzerskaya MA, et al. Quantitative assessment of ultrasound image. Kazan Medical Journal. 2005;86(3):237-40. (In Russian)].
13. Воронцов ИМ, Шаповалов ВВ, Шерстюк ЮМ. Здоровье. Опыт разработки и обоснование применения автоматизированных систем для мониторинга и скринирующей диагностики нарушений здоровья. СПб.: ООО ИПК «Коста», 2006. 432 с. [Vorontsov IM, Shapovalov VV, Sherstyuk YuM. Health. Experience in the development and justification of the use of automated systems for monitoring and screening diagnostics of health disorders. SPb. 2006. 432 p. (In Russian)].
14. Корневский НА. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем. Медицинская техника. 2015. №1. С. 33-35. [Korenevskiy NA. Application of fuzzy logic for decision-making in medical expert systems. Biomedical Engineering. 2015;49(1):33-5. (In Russian)].
15. Корневский НА, Родионова СН, Хрипина ИИ. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Старый Оскол: ТНТ. 2019. 472 с. [Korenevskiy NA, Rodionov SN, Khripina II. Methodology for the synthesis

- of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems. 2019.472 p. (In Russian)].
16. Корневский НА. Проектирование нечетких решающих сетей, настраиваемых по структуре данных для задач медицинской диагностики. Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2005;4(1):12-20. [Korenevsky NA. Design of fuzzy decision networks, configurable by data structure for medical diagnostics tasks. Systems analysis and management in biomedical systems. 2005;4(1):12-20. (In Russian)].
 17. Круглов ВВ, Борисов ВВ. Искусственные нейронные сети. Теория и практика М.: Горячая линия – телеком, 2002. 382 с. [Kruglov VV, Borisov M. Artificial neural networks. Theory and practice. M. 2002. 382 p. (In Russian)].
 18. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. Пер. с польского. М.: Финансы и статистика. 2002. 344 с. [Osovsky S. Neural networks for information processing. Moscow. 2004. 343 p. (In Russian)].
 19. Попов ЭВ. Экспертные системы: Решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ. М.: Наука. 1987. 287 с. [Popov EV. Expert systems: Solving non-formalized problems in a dialogue with a computer. Moscow. 1987. 287 p. (In Russian)].
 20. Усков АА, Кузьмин АВ. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. М.: Горячая линия – телеком. 2004. 143 с. [Uskov AA, Kuzmin AV. Intelligent control technologies. Artificial neural networks and fuzzy logic. Moscow. 2004. 143 p. (In Russian)].
 21. Устинов АГ, Ситарчук ВА, Корневский НА. Автоматизированные медико-технологические системы. Курск. 1995. 390 с. [Ustinov AG, Sitarchuk VA, Korenevsky NA. Automated medical and technological systems. Kursk. 1995. 390 p. (In Russian)].
 22. Яшин АА, Еськов ВМ, Агарков НМ и др. Информационные технологии в медицине. Тула, 2006. 272 с. [Yashin AA, Eskov VM, Agarkov NM et al. Information technologies in medicine. Tula. 2006. 272 p. (In Russian)].
 23. Хайкин С. Нейронные сети: Полный курс. 2-е изд, испр. Пер. с англ. М.: ООО «И.Д. Вильямс». 2006. 1104 с. [Khaykin S. Neural networks: A complete course. 2nd ed. Moscow. 2006. 1104 p. (In Russian)].
 24. Buchanan BG, Shorliff EN. Rule Expert Systems – The MYCIN Experiments of the Stanford Neuritic Programming Project. Addison Wesley. 1984.
 25. Korenevskiy NA, Gorbatenko SA, Krupchatnikov RA, Lukashov MI. Design of network-based fuzzy knowledge bases for medical decision-making support. Biomedical Engineering. 2009 Jul-Aug;(4):38-42. (In Russian)]. PMID: 19777975.
 26. Zadeh LA. Advances in Fuzzy Mathematics and Engineering: Fuzzy Sets and Fuzzy Information-Granulation Theory. Beijing. Beijing Normal University Press. 2005.
 27. Корневский НА. 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):99-103. [Korenevsky NA. Method for the synthesis of heterogeneous fuzzy rules for the analysis and control of the state of biotechnical systems. Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, computer engineering, information science. Medical Instruments Engineering. 2013(2):99-103. (In Russian)].
 28. Корневский НА, Серебровский НА, Коптева ВИ и др. Прогнозирование и диагностика заболеваний, вызываемых вредными производственными и экологическими факторами на основе гетерогенных моделей. Курск: Изд-во Курск. гос. с.-х. ак. 2012. 231 с. [Korenevsky NA, Serebrovsky NA, Kopteva et al. Forecasting and diagnostics of diseases caused by harmful industrial and environmental factors on the basis of heterogeneous models. Kursk. 2012. 231 p. (In Russian)].
 29. Корневский НА, Разумова КВ. Синтез коллективов гибридных нечетких моделей оценки состояния сложных систем. Наукоемкие технологии. 2014;12(15):31-9. [Korenevskiy NA, Razumova KV. Synthesis collectives hybrid fuzzy evaluation model of the complex systems. Science intensive technologies. 2014;12(15):31-9. (In Russian)].
 30. Korenevskiy NA. Application of fuzzy logic for decision-making in medical expert systems. Biomedical engineering. 2015;49:46-9.
 31. Korenevskiy NA, Degtyarev SV, Seregin SP, Novikov AV. Use of an Interactive Method for Classification in Problems of Medical Diagnosis. Biomedical Engineering. 2013;47(4):169-72.
 32. Аабакен Л, Агапов МЮ, Артемьев АИ и др. ЭУСбука: Руководство по эндоскопической ультрасонографии. – Москва: ИД «практическая медицина», 2013. 399 с. [Aabaken L, Agapov MYu, Artemyev AI, et al. EUSbuka: Handbook of endoscopic ultrasonography. Moscow. 2013. 399 p. (In Russian)].
- Вклад авторов**
О.И. Охотников: редактирование, дизайн окончательного варианта статьи.
В.А. Белозеров: написание текста, обработка материала по солидным поражениям поджелудочной железы.
Н.А. Корневский: написание текста по методу синтеза гибридных нечетких решающих правил и созданию нечеткой гибридной модели дифференциальной диагностики хронического очагового панкреатита и протоковой аденокарциномы поджелудочной железы.
С.Н. Григорьев: написание и обработка текста и иллюстративного материала.
- Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests. Not declared.
- Финансирование.** Исследование проведено без спонсорской поддержки.
Financing. The study had no sponsorship.
- Сведения об авторах**
Белозеров Владимир Анатольевич — врач, кандидат медицинских наук. Персональный идентификатор в РИНЦ: 1106646
Охотников Олег Иванович — заведующий отделением РХМДЛ №2 КОКБ, доктор медицинских наук, профессор.
Корневский Николай Алексеевич — Юго-Западный государственный университет, заведующий кафедрой биомедицинской инженерии, доктор технических наук, профессор.
Григорьев Сергей Николаевич — заведующий отделением Гнойной хирургии КОКБ, кандидат медицинских наук.

Differential Diagnostics Focal Pancreatic Masses Based on the Analysis of the Echographic Texture of Endosonograms Using Fuzzy Mathematical Models

V.A. Belozеров¹, O.I. Ohotnikov¹, N.A. Korenevskij², S.N. Grigorev¹

¹ Kursk Regional Clinical Hospital; 35a Sumskaya str., Kursk, Russia 305004

² South-Western State University; 94, 50 Let Oktyabrya str., Kursk, Russia 305040.

Abstract

Relevance: Differential diagnosis of focal formations of the pancreas is particularly difficult due to the similarity of their echosemiotics. One of the ways to objectify and improve the accuracy of ultrasound data is to use artificial intelligence methods to interpret images.

Purpose: Improving the quality of diagnosis of focal pancreatic pathology according to endoscopic ultrasonography based on the analysis of the echographic texture using fuzzy mathematical models.

Material and methods: In the Kursk Regional Clinical Hospital, endoscopic ultrasonography was performed in 272 patients for pancreaticobiliary diseases. The endoscopic video system of the company Olympus EVIS EXERA II with the ultrasonic processor EU-ME1 was used. Solid tumors of the pancreas were detected in 109 (40.1 %) patients, focal pancreatic masses were diagnosed in 40 (14.7 %) patients. Based on the research results, the main types of reference endosonograms corresponding to differentiable pathology were identified. On the basis of endosonograms, using hybrid fuzzy mathematical decision rule, a fuzzy hybrid model of differential diagnosis of chronic focal pancreatitis and ductal adenocarcinoma of the pancreas was obtained.

Results: The selected source of information and the method of synthesis of hybrid fuzzy decision rules made it possible to obtain a fuzzy hybrid model of differential diagnosis of chronic focal pancreatitis and ductal adenocarcinoma of the pancreas. Based on the results of mathematical modeling and statistical tests on representative control samples, it was shown that the resulting model of differential diagnosis, using reference endosonograms reflecting the echographic texture of focal pancreatic masses, provides confidence in the desired diagnosis at the level of 0.6. The additional information used in the analysis of endosonograms increases the diagnostic confidence to a value of 0.9.

Conclusions: The resulting model of differential diagnosis of chronic focal pancreatitis and ductal adenocarcinoma of the pancreas provides confidence in decision-making no worse than 0.9, which is an acceptable quality indicator in clinical practice in conditions of insufficient statistics with poorly formalized data structure.

Key words: *pancreas, ductal adenocarcinoma, focal chronic pancreatitis, differential diagnosis, reference endosonogram, mathematical model, fuzzy decision rules*

For citation: Belozеров VA, Ohotnikov OI, Korenevskij NA, Grigorev SN. Differential Diagnostics Focal Pancreatic Masses Based on the Analysis of the Echographic Texture of Endosonograms Using Fuzzy Mathematical Models. Journal of Oncology: Diagnostic Radiology and Radiotherapy. 2021;4(3):64-73. (In Russian).

DOI: 10.37174/2587-7593-2021-4-3-64-73

Information about the authors:

Belozеров V.A. <https://orcid.org/0000-0003-2028-746X>

Ohotnikov O.I. <http://orcid.org/0000-0002-6685-3183>

Korenevskij N.A. <http://orcid.org/0000-0003-2048-0956>

Grigorev S.N. <http://orcid.org/0000-0002-6741-3358>