

Введение

Очень часто постановку достоверного диагноза затрудняет неудовлетворительное качество рентгеновских изображений (низкий контраст, нечеткость и размытость мелких анатомических деталей). Это обусловлено различными причинами, в частности, в маммографии связано с особенностями строения тканей молочной железы (МЖ), способность поглощать рентгеновское излучение которых практически одинакова [1], [2]. Разработано немало подходов к улучшению качества рентгеновских изображений. Так, например, в маммографии – это повышение дозы облучения, искусственное контрастирование и широко применяемая в последнее время компьютерная обработка исходных низкокачественных маммограмм. Естественно, что последний подход, используемый для улучшения качества всех типов рентгеновских изображений, наименее вреден для пациентов.

1. Анализ рентгенологической картины патологических образований в молочной железе

Проведем анализ патологических образований в молочных железах, рассмотрим требования к качеству маммограмм и выделим основные задачи, которые необходимо решить, чтобы помочь рентгенологу поставить достоверный диагноз.

Основные требования к качеству маммограмм очевидны:

- 1) отображение всего органа и близлежащих тканей (мышцы, аксиллярная область);
- 2) хорошая видимость структуры железы, что обеспечивается достаточной контрастностью и резкостью изображения;
- 3) отсутствие артефактов.

Последнее трудно переоценить, так как в маммографической диагностике особую роль играет выявление мельчайших отложений извести – микрокальцинатов.

При наличии патологического процесса необходимо указывать его распространенность, локализацию, характер очертаний.

Каждое патологическое образование, выявленное на маммограммах, должно быть охарактеризовано всесторонне. Необходимо описать следующие параметры:

- 1) положение – квадрант железы (можно с уточнением местонахождения очага по часовой стрелке), субареолярная область, отношение к коже или поверхностной фасции груди;
- 2) форма – шаровидная, овоидная, конусовидная, дольчатая, неправильная;
- 3) размеры – в сантиметрах или миллиметрах;
- 4) контуры – резкие или нерезкие, ровные или неровные, волнистые, с выступами (спикулами);
- 5) плотность – по интенсивности тени;
- 6) структура – однородная, с жировыми включениями, с отложениями извести, состоящая из тканей разной плотности.

Из форм рака рассмотрим узловую (местноинфильтрующий и ограниченно растущий рак) и диффузную формы, а также болезнь Педжета, а из доброкачественных образований – фиброаденому, мастопатию, олеогранулему, липому.

Местноинфильтрующий узловой рак — встречается примерно в 75% случаев злокачественных опухолей молочной железы. В рентгенологическом изображении имеет характерный признак — узел неправильной звездчатой, полигональной или амебовидной формы с неровными и нечеткими контурами; структура опухоли кажется неомогенной, а структура рентгеновской тени в значительной степени определяется формой опухоли. Фиброзная строма железы теряет радиальную ориентацию от основания железы в сторону соска. Для этой формы рака характерным является наличие расходящихся во все стороны от опухоли

тяжей, так называемых спикул, («раковой дорожки» или «ракового мостика»), связывающих опухолевый узел с соском или с кожей: между опухолью и соском или между опухолью и кожей вследствие лимфостаза появляется тяжистая дорожка ракового лимфангита. Премаммарное пространство вследствие этого суживается и теряет свою прозрачность. При расположении опухоли в глубине железы вблизи грудной стенки можно видеть сужение ретромаммарного пространства. При распространении инфильтрации на субареолярную область происходит втяжение соска, этот феномен известен клиницистам как симптом умбликации.

Скиррозные опухоли сопровождаются мелкоточечными обызвествлениями (микрокальцинатами — гидроксилфосфаты кальция), напоминающие песчинки неправильной формы, расположенные группами внутри или в непосредственной близости к опухоли. Морфологическим субстратом микрокальцинатов является отложение извести в некротические участки опухоли, а также сгущение и обызвествление секрета в просвете млечных путей. Форма, размер, количество и характер распределения микрокальцинатов имеют большое значение в дифференциальной диагностике. При раке обызвествления носят мелкоточечный характер, напоминают песчинки неправильной формы, размеры которых составляют от 0,1 до 0,6 мм.

Установлена совершенно четкая зависимость между числом, характером распределения кальцинатов и вероятностью рака. С увеличением числа микрокальцинатов на единицу площади вероятность рака возрастает. Так, при 15 микрокальцинатах на 1 см^3 вероятность рака достигает 87%. Выявление микрокальцинатов даже при отсутствии опухолевого узла весьма подозрительно на рак, поскольку кальцинаты нередко являются единственным признаком, позволяющим заподозрить рак молочной железы.

В общем же рак узловой формы создает затемнение более высокой оптической плотности по сравнению с опухолями модулярного строения. Размеры рентгеновского изображения опухоли, как правило, меньше тех, что определены в результате пальпации и имеют неправильный звездчатый или амёбовидный характер.

Ограниченно растущий узловой рак — составляет около 20% злокачественных опухолей молочной железы. По гистологическому строению ограниченно растущий рак, это медуллярная коллоидная или слизистая аденокарцинома.

В рентгенологическом изображении ограниченно растущие опухоли имеют округлую или неправильную форму. Контуры опухоли обычно неровные, полициклические, волнистые, но четкие. В некоторых случаях вокруг ограниченно растущего ракового узла наблюдается прозрачный ободок, рак имеет большое сходство с доброкачественной опухолью. Структура медуллярных опухолей обычно однородна, микрокальцинаты в большинстве случаев отсутствуют.

Структура окружающих опухоль тканей молочной железы, как правило, не изменена. Только достигая значительных размеров, опухоль оттесняет соседние структуры молочной железы. Часто вблизи узла видна расширенная штопорообразно извитая вена. Вероятность рака возрастает, когда на маммограмме выявляется нечеткость части контура. Особую тревогу должна вызывать дополнитель-

ная тяжесть по ходу млечных протоков, обусловленная раковым лимфангитом. При этом на рентгеновском изображении возникает симптом, именуемый «хвостом кометы»: от изображения относительно малой опухоли отходит пространственное изображение тяжа по ходу молочного протока.

Пальпаторно определяемые размеры опухоли обычно совпадают с размерами, определяемыми на маммограмме.

Диффузно-инфильтративная форма рака – для рентгенодиагностики представляет наибольшие трудности, так как она не имеет опухолевого узла и по этой причине распознать ее удастся только в случаях, когда опухоль имеет большую распространенность.

О заболевании свидетельствует обширное однородное понижение прозрачности железы на маммограмме. Границы опухоли очерчены нечетко, напоминают языки пламени. Структурные элементы железы утолщены, премаммарное пространство сужено, прозрачность его понижена. Пальпаторно утолщение кожи обычно носит отечный характер, более заметно в области ареолы и вблизи локализации патологического очага. Часто можно наблюдать расслоение внутренних слоев кожи, при этом внутренний контур становится неровным, зубчатым и теряет четкость. Нормальный нежный рисунок подкожного жирового слоя сменяется грубыми, тяжелыми структурами, идущими косо или перпендикулярно ткани кожи, что придает подкожно жировому слою сетчато-ячеистый характер. Значительные изменения выявляются и в строме железистой части молочной железы. Как правило, наблюдается ретракция соска. Уплотнение железистой ткани сопровождается деформацией железистого треугольника, контуры его становятся более выпуклыми в сторону кожи, неровными и нечеткими. Структурный рентгеновский рисунок стромы в одних случаях приобретает вид грубых, хаотично переплетающихся между собой трабекулярно-тяжистых образований; в некоторых случаях наблюдается веерообразный характер деформации. Отечная молочная железа на рентгенограмме становится однородной, теряется разница плотностей подкожного жирового слоя и конуса более плотной железистой части. Отечная форма рака в рентгенологическом изображении имеет большое сходство с другими заболеваниями, в первую очередь с маститом.

Болезнь Педжета (рак соска) – форма, напоминающая экзему. Источником возникновения является эпителий крупных протоков, откуда опухолевый процесс распространяется на сосок и ореолярную область. При пальпации только в 25% удается определить опухолевое уплотнение тканей.

На маммограмме участок опухолевой инфильтрации располагается в субареолярной зоне и может сопровождаться ограниченным полем точечных обызвествлений в той же области и вдоль млечных протоков.

Фиброаденома — доброкачественная опухоль фиброэпителиального строения. Это наиболее частая форма из доброкачественных опухолей молочной железы. Лишь четвертая часть фиброаденом достигает таких размеров, что они могут быть выявлены на маммограммах, остальные остаются на микроскопическом уровне. Фиброаденомы, достигнув определенной стадии, прекращают рост и могут сохранять стабильность. Во время беременности и лактации фиброаденомы достигают размеров от 50 до 150 мм.

На маммограмме фиброаденомы выглядят в виде узла округлой или овальной формы с четкими ровными или слегка волнистыми контурами. Фиброаденомы диаметром до 30 мм обычно имеют однородную структуру. По интенсивности они более плотные по сравнению с окружающей железистой тканью. Вокруг опухоли наблюдают прозрачный ободок жировой ткани, который способствует ее выявлению. Фиброаденомы обызвествляются с такой же частотой, как и рак (около 30% случаев), но характер кальцинатов другой: они более крупные (0,6 — 1 мм), имеются в меньшем количестве.

Мастопатия — представляет большую группу различных по морфологическому строению гиперпластических состояний, в основе которых лежат дисгармонические процессы. Для большинства из них характерны замещения железистой ткани фиброзной и образование кист.

Различают узловую и диффузную формы мастопатии. Узловая форма характеризуется наличием одиночного или множественного фокуса уплотнения. Фиброзные узлы имеют неправильную форму, неровные и нечеткие контуры. Узел без резких границ переходит в окружающую железистую ткань. В отличие от рака узлы имеют неоднородную структуру. Наличие множественных кист при пальпации придает молочной железе сходство с мешком, наполненным дробью. На рентгеновском изображении множественные мелкие кисты, суммируясь, создают картину зернистости, что затрудняет определение размеров отдельных кист. Величина кист варьируется от 10 до 50 мм.

Диффузную мастопатию следует отличать от инфильтративной формы рака по отсутствию узловых образований и утолщению кожи. Диффузная мастопатия на рентгеновском изображении характеризуется массивным уплотнением всей или значительной части железистой ткани. На фоне обширных полей фиброза выделяются грубые линейные тени резко утолщенных фиброзно-измененных млечных ходов.

Олеогранулема — представляет последствие жирового некроза. Клинически и рентгенологически олеогранулема трудно отличить от рака. Такое же узловое образование высокой плотности, спаянное с кожей, которая так же, как и при раке, втянута. Гистологически при жировом некрозе обнаруживается разрастание фиброзной ткани, многоядерные гигантские клетки и отложения жира. На рентгеновском изображении олеогранулема дает затемнение неправильной формы с неровными нечеткими контурами. Структура узла чаще однородна, хотя в ряде случаев чередование полей фиброза с жировыми массами создает неоднородность олеогранулемы. Фиброзирование очага некроза ведет к сморщиванию пораженного участка. По этой причине тяжистые структуры окружающих тканей конвергируют к очагу некроза. В результате возникает картина, напоминающая спиккулы вокруг раковой опухоли. Сморщивание некротического очага сопровождается втягиванием кожи и соска. Все это придает олеогранулема большое сходство с раковой опухолью.

Липома — жировая опухоль — в рентгеновском изображении на фоне железистой ткани выглядит в виде просветления окруженного кольцом фиброзной капсулы.

Вышеприведенный качественный анализ показал, что рентгенологическая картина злокачественных и доброкачественных патологий молочной железы определяется морфологическим и гистологическим строением опухоли. Так, для рассмотренных основных форм патологии молочной железы в 50 – 60 процентах опухоли располагаются в верхненаружном квадранте, в остальных случаях опухоли распределяются с одинаковой частотой по другим квадрантам. Опухоль почти всегда локализуется в поверхностных отделах железы на расстоянии до 50 мм от кожи. Центральные отделы поражаются относительно редко. Примерно 4% опухолей располагаются в ретромаммарном пространстве.

Результаты анализа морфологического и гистологического строения новообразований и их рентгенологической картины рассмотренных заболеваний молочной железы обобщены в таблице 1.

Весьма тщательно следует оценить обнаруженные по маммограммам *отложения извести*. Примерный план их описания таков:

1) положение – в коже, в подкожном слое, в той или иной части волоконно-железистого массива, в сосудах, в выявленном патологическом образовании, в рубце, в капсуле имплантата;

2) количество – единичные, множественные, не поддающиеся счету;

3) распространение в тканях – рассеяние на большом протяжении, рассеяние в определенной части железы, расположение в виде кучки (группы), локализация в центральном или периферическом отделах патологического образования;

4) форма – шаровидная (точечная), кольцевидная, линейная (в виде полоски), червеобразная, ветвящаяся, игрек-образная, в форме полумесяца с горизонтальным уровнем ("известковое молоко" в полости кисты), в виде бесформенных глыбок;

5) размеры – мелкие (микрокальцинаты) – до 0,3 см; средние – от 0,4 до 0,9 см; крупные – более 0,9 см;

б) форма всего участка железы, в котором рассеяны обызвествления, – треугольная, ромбовидная, в виде хвоста ласточки и т.д.

Обызвествления в тканях молочной железы – нередкая находка при маммографии. И находка немаловажная. Достаточно вспомнить, что 90% всех протоковых раков *in situ* открывается по маммограммам благодаря симптому микрокальцинации, поскольку в этой ранней фазе они еще не обуславливают затемнения или уловимых по снимкам нарушений структурного рисунка железы.

Выделяют пять типов микрокальцинатов:

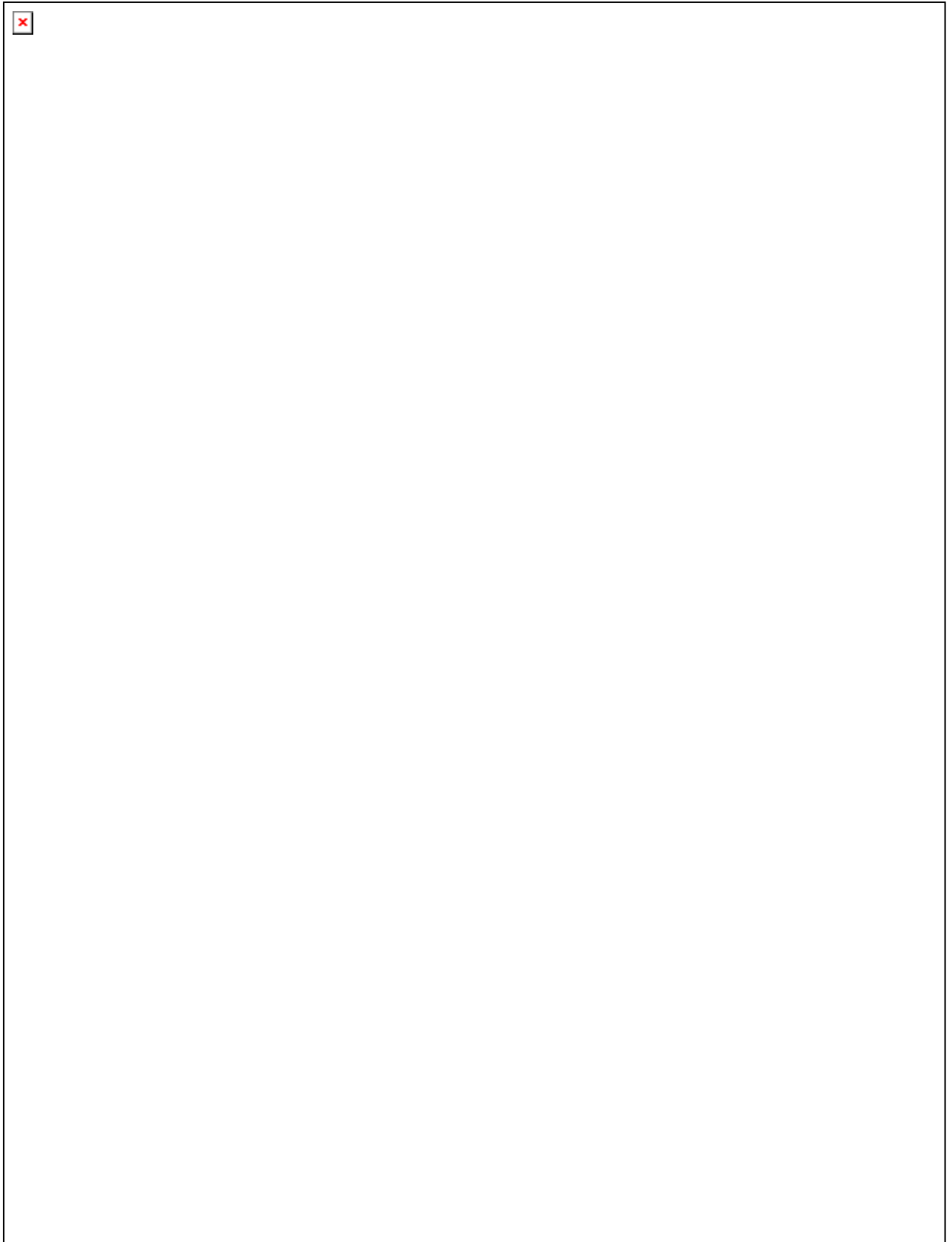
1) в виде кольца (встречаются только в доброкачественных образованиях);

2) в виде правильной точки (в 22% соответствуют раку);

3) слишком маленькие для определения формы (в 40% соответствуют раку);

4) в форме неправильной точки (66% таких обызвествлений наблюдаются при раке);

5) червеобразные (всегда в злокачественной опухоли).



Трактовка маммографической картины обызвествлений бывает простой, а бывает очень трудной. Здесь требуется по немногим скупым приметам - положению обызвествлений, их числу, форме, величине, очертаниям - расшифровать природу патологического процесса. Сердцевина диагностики - в скрупулезном изучении мелких петрификатов - так называемых микрокальцинатов, т.е. отло-

жений извести размерами в 0,3 см и менее. Петрификаты величиной в 0,4 - 0,9 см относят к средним, а более крупные - к большим.

Успех зависит не только от знаний и опыта врача, но также от качества маммограмм и отсутствия на них артефактов.

По рентгеновской картине можно установить локализацию известковых отложений. Проще всего определяются обызвествленные кожные образования (надо лишь при осмотре исключить нанесенные на кожу медицинские препараты). В подкожном жировом слое встречаются отложения извести в виде рассеянных точек при липоидной дегенерации, а также в гематоме. Группы петрификатов наблюдаются в рубцах после хирургических вмешательств. Типично распределение извести в стенках артерий. Оно встречается достаточно часто (у 3% обследуемых).

Разумеется, главная задача заключается в дифференциальной диагностике доброкачественных и злокачественных образований по характеру отложений извести. Кальцийгидроксиапатит и кальцийфосфат откладываются в уплотненный секрет в протоках и микрокистах, в участки дегенерации и некроза при раке, папилломатозе, склерозирующем аденозе, фиброаденоматозе. Различить обызвествления, присущие этим состояниям, позволяют следующие признаки.

Обызвествления в фиброаденомах отображаются в виде крупных глыбок и полосок, иногда соединенных мостиками. Форма глыбок разнообразна, контуры неровные. При длительном наблюдении может отмечаться как увеличение, так и уменьшение этих отложений. Обызвествление крупных кист происходит только в капсуле и очень редко. Что же касается микрокист, то известковые отложения в них достаточно характерны. Они крупные, однотипные, имеют вид округлых образований.

Патогномоничны случаи, когда в кистах находится жидкое известковое содержимое, и на маммограммах можно уловить его горизонтальный или менископодобный уровень. Нередко такие обызвествления при мелкокистозном аденозе располагаются группами, иногда на большом протяжении. Аналогичное поражение второй молочной железы также говорит в пользу аденоза и делает мысль о раке маловероятной.

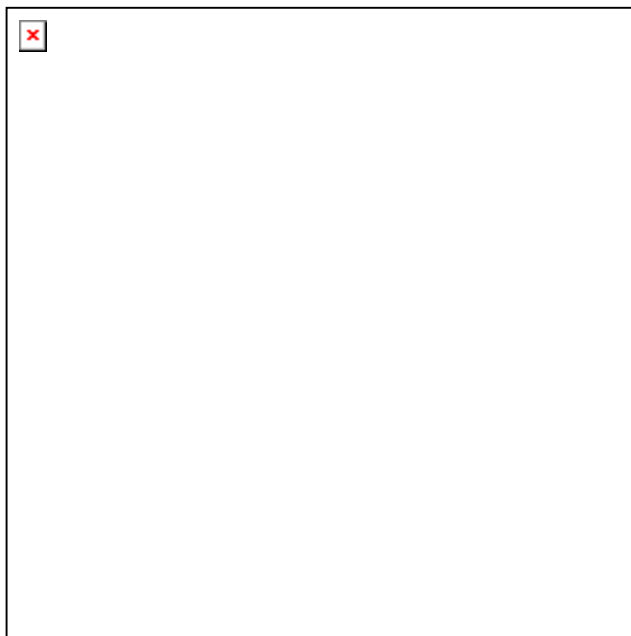
Своеобразна картина так называемых секреторных обызвествлений. На снимке видны линейные и ветвящиеся полоски разной длины, обусловленные отложениями извести в просвете расширенных молочных протоков.

Отложения извести при раке, как правило, относятся к микрокальцинатам. Они, в среднем, мельче, чем при доброкачественных процессах, и отличаются полиморфностью частиц. При дольковых раках преобладают мелкие округлые зерна разной величины (0,1 – 0,3 см), расположенные кучно. Их почти невозможно отличить от обызвествления при склерозирующем аденозе. Недавно подмечено, что для рака особенно типично большое число микрокальцинатов в 1 см³ ткани (более 15). Если в группе содержится более 30 микрокальцинатов, то рак обнаруживается в 80%.

При протоковых раках микрокальцинаты встречаются чаще, состоят обычно из кальцийфосфата. Прежде всего, обращает на себя внимание форма всего участка поражения. Она напоминает фигуру треугольника, обращенного верши-

ной к ареоле; основание же этой фигуры раздвоено как хвост у ласточки. Другим вариантом является форма пропеллера, ромба или сходной фигуры. Более разнообразны, чем при других состояниях, силуэты известковых зерен. Они в одной и той же опухоли имеют вид точек, запятых, Y-образную, X-образную форму. В особенности это относится к комедокарциноме.

На рис. 1 схематически представлены основные варианты маммографической картины внутримаммарных обызвествлений.



2. Методы цифровой обработки изображений, применяемые в маммографии

Анализ рентгенологической картины патологических образований показал, что задачи, которые необходимо решить, чтобы врач рентгенолог поставил достоверный диагноз, можно свести к следующим:

- 1) повышение контраста (качества) маммограмм;
- 2) детектирование краев новообразований;
- 3) детектирование микрокальцинатов на маммограммах;
- 4) классификация (распознавание) обнаруженных образований.

2.1. Классические методы повышения контраста

Методы повышения контраста изображения широко используются в рентгенологии, где субъективное качество изображений важно для постановки правильного диагноза. Контраст – важный фактор в любой субъективной оценке качества изображения. Много алгоритмов, выполняющих повышение контраста, были разработаны и применены к проблемам в медицинской визуализации. Всесторонний обзор существующих методов может быть найден в [3]. Среди них, модификация гистограмм и методы усиления края наиболее употребительны наряду с традиционными методами обработки изображений.

Методы модификации гистограмм [4, 5] привлекательны из-за их простоты и скорости, и достигли приемлемых результатов для некоторых применений. В общем, функция преобразования получена из желательной гистограммы и гистограммы входного изображения и почти всегда нелинейная. Для непрерывных функций может быть достигнуто преобразование без потерь. Однако, для цифровых изображений с некоторым конечным числом уровней серого, в результате такого преобразования теряется информация, из-за ошибок квантования. Например, тонкий край может быть соединен с соседними пикселями и в результате – исчезнуть. Попытки включать локальный контекст в процесс преобразования достигли ограниченного успеха. Например, простое адаптивное выравнивание гистограммы [6] поддерживаемое фиксированными контекстными областями не может приспособиться к признакам отличных размеров.

Большинство алгоритмов усиления края разделяют общую стратегию неявно: обнаружение, сопровождаемое локальным "обострением края". Нерезкое маскирование является превосходным в этом, он стал популярным алгоритмом повышения контраста, чтобы помочь радиологу при постановке диагноза [7, 8]. "Нерезкое маскирование" обостряет края путем вычитания части фильтрованной Лапласианом компоненты от исходного изображения. Теоретически, эта техника была оправдана как аппроксимация процесса устранения размытости в [9]. Ло и др. [10] изучили расширение этой техники в контексте рентгенограмм. Другое расширение, основанное на фильтрации Лапласом, было предложено в [11]. Однако эти методы нерезкого маскирования остаются ограниченными их линейными и единомасштабными свойствами и менее эффективными для изображений, содержащих широкий диапазон существенных признаков, обычно присущих на

цифровой маммограмме. Авторы [12] попытались преодолеть эти ограничения. Полученные мера локального контраста и нелинейные функции преобразования впоследствии были усовершенствованы в [13]. К сожалению, в этих нелинейных методах также оставались ограничения:

- 1) они оперировали на единственном масштабе;
- 2) не была включена никакая явная стадия подавления шума (фактически шум мог быть усилен);
- 3) специально подобранные для данного случая функции нелинейного преобразования, были представлены без строгого математического анализа механизмов их усиления или возможного внесения артефактов.

2.2. Вейвлетные методы повышения контраста

Недавнее продвижение теории вейвлетов зажгло интерес исследователей в ее применении к решению задачи повышения контраста изображения [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]. Эти исследования показали перспективность вейвлетных методов, но были выполнены лишь на экспериментальном уровне.

Рассмотрим современные вейвлетные методов повышения контраста.

В [20] предполагается существование связи между контрастом полутонового изображения и величиной градиента интенсивности краев в окрестности измерения контраста. Это наблюдение мотивирует развитие методов повышения контраста на основе краев. В статье представлен простой и эффективный метод повышения контраста изображения, который основан на мультимасштабном представлении краев объектов изображения. Контраст изображения может быть увеличен просто, растяжением или увеличением мультимасштабных максимумов градиента изображения. Этот метод предлагает приспособляемость для выборочного увеличения признаков различных размеров и способность управлять шумовым усилением. Показаны преимущества предложенного вейвлетного подхода по сравнению с другими методами на основе края.

В [21] вейвлет коэффициенты поддиапазонов были изменены методом адаптивного выравнивания гистограммы. Чтобы достичь оптимального повышения контраста, размеры подобластей были выбраны с учетом основания анализирующих фильтров. Изображения с повышенным контрастом обеспечили тонкие детали тканей, которые являются только видимыми с трудоемкими контраст/яркость оконными методами, которые в настоящее время используются в клиническом чтении. Представлены результаты обработки компьютерной томографии груди, которые показывают существенное улучшение по сравнению с существующими современными методами: нерезким маскированием, адаптивным выравниванием гистограммы и адаптивным выравниванием гистограммы с контрастным ограничением. Систематическое изучение 109 клинических КТ изображений груди тремя радиологами предполагает перспективность этого метода и во временных показателях, и в показателях диагностической эффективности на различных патологических случаях. Кроме того, радиологи не наблюдали никаких значимых артефактов или увеличения шума, который обычно появляется при традиционном адаптивном выравнивании гистограмм и его разновидностях.

Маммографические методы повышения контраста изображения обычно нацеливаются или на усовершенствование полной визуализации признаков или на усиление определенного признака злокачественности. В [22] представлен синтез этих двух парадигм посредством синтеза (слияния) изображения. После того, как выполнено избыточное В-сплайновое вейвлет разложение, преобразованные коэффициенты обрабатывают для повышения контраста микрокальцинатов, ограниченных (описанных) масс и звездообразных образований. Измененные коэффициенты затем соединяются для реконструкции улучшенного изображения с усиленным проявлением злокачественности. И обработка для усиления отобранных признаков, и синтез результирующих изображений совершаются в пределах единственной структуры вейвлет преобразования, которая вносит вклад в вычислительную эффективность описанного метода. Изобретенный алгоритм не только учитывает эффективную комбинацию определенных важных признаков на изображении с усиленным контрастом, но также и обеспечивает гибкую основу для объединения различных методов повышения контраста и их независимой оптимизации.

Работа [23] представляет новые методы, которые обеспечивают дифференциальное вейвлетное повышение контраста, обеспечивая дальнейшую степень контроля над процессом повышения контраста. Представлены две главных новых идеи, а именно концепция модуляции яркости вейвлет усиления, и концепция диалоговой модуляции вейвлет усиления, которая достигнута, используя в интерактивном режиме определенные карты контура усиления.

В [24] представлен метод повышения качества изображения, который уменьшает гранулированный шум и сохраняет края. Метод базируется на новой нелинейной схеме мультимасштабной реконструкции, которая получена, последовательным объединением каждого более грубого масштаба изображения с соответствующим модифицированным внутримасштабным изображением.

В [25] представлен метод анализа маммографических признаков на основе мультимасштабного представления диадического вейвлет преобразования. Подход состоит в применении нелинейных увеличивающих функций $E(z)$ в пределах уровней мультимасштабного представления. Показано, что там существует простое ограничение для $E(z)$, такое, что гарантирует повышение контраста изображения. Кроме того, простой случай, в котором оператор усиления является постоянным множителем, математически эквивалентен традиционному нерезкому маскированию. Количественно показано, что коэффициенты преобразования, измененные нелинейными операторами в пределах каждого уровня, могут сделать более очевидными невидимые или едва видимые маммографические признаки, не требуя дополнительного облучения. Результаты сравнены с традиционными методами повышения контраста изображения посредством измерения локального контраста известных маммографических признаков.

В [26] для повышения контраста предложена простая функция нелинейного усиления и проанализирована проблема появления артефактов, в результате вейвлет обработки. Подробно описана стадия обесшумливания, которая сохраняет края, используя вейвлет сжатие (масштабирование, уменьшение) и адаптивная пороговая обработка.

Статья [27] представляет подход к анализу маммографических признаков посредством избыточного мультимасштабного представления. Показано, что эффективные представления могут быть идентифицированы в пределах непрерывного пространства масштабов и использоваться для усиления важных признаков на маммограмме. Описаны методы повышения контраста, основанные на трех избыточных мультимасштабных представлениях: 1 – диадическое вейвлет преобразование (разделимое), 2 – пси-преобразование (неразделимое, не ортогональное) и 3 – гексагональное вейвлет преобразование (неразделимое).

Мультимасштабные края, идентифицированные в пределах различных уровней пространства преобразования, предоставляют локальное основание для повышения контраста изображения. Маммограммы восстанавливаются из вейвлет коэффициентов, измененных на одном или более уровнях посредством локальных и глобальных нелинейных операторов. В каждом случае, края и параметры усиления определяются адаптивно мерой энергии в пределах каждого уровня пространства масштабов. Количественно показано, что это коэффициенты преобразования, измененные адаптивными нелинейными операторами, могут делать более очевидными невидимые или едва заметные маммографические признаки, не требуя дополнительного облучения. Полученные результаты сравнены с традиционными методами повышения контраста изображения путем измерения локального контраста известных маммографических признаков.

Показано, что признаки, извлеченные из мультимасштабного представления, обеспечивают адаптивный механизм для реализации локального повышения контраста. Путем улучшения визуализации патологии груди можно увеличить шансы раннего обнаружения при требовании меньшего количества времени для оценки маммограмм для большинства пациентов.

2.3. Вейвлетные методы детектирования микрокальцинатов

Рассмотрим вейвлетные методы детектирования микрокальцинатов.

В [28] описан подход к обнаружению микрокальцинатов на цифровых маммограммах, использующий вейвлет разложение изображения на подполосы. Микрокальцинаты проявляются как маленькие скопления нескольких пикселей относительно высокой интенсивности по сравнению с соседними с ними пикселями. Эти признаки изображения сохраняются системой обнаружения, использующей подходящее преобразование изображения, локализирующее характеристики сигнала в исходном изображении и области преобразования. Учитывая, что микрокальцинаты соответствуют высокочастотным компонентам спектра изображения, обнаружение микрокальцинатов осуществляется путем разложения маммограммы на различные частотные подполосы, подавлением подполосы низкой частоты, и, наконец, для восстановления маммограммы используя подполосы, содержащие только высокие частоты.

В [29] представлен метод для обнаружения микрокальцинатов, который базируется на вейвлет преобразовании, но в отличие от других методов, предложенных в литературе, обнаружение выполняется непосредственно в вейвлет области, и не требуется обратного преобразования. После предварительного

обесшумливания, микрокальцинаты отделяются от фоновой ткани. Это выполняется, с использованием информации, полученной через оценку энтропии Ренни на различных уровнях разложения пространства вейвлет преобразования.

В [30] представлена схема CAD для обнаружения сгруппированных микрокальцинатов на цифровых маммограммах, с использованием технологии вейвлет преобразования. Чтобы получить наиболее подходящую вейвлет функцию и наилучшие уровни восстановления, были отобраны несколько профилей микрокальцинатов, которые раскладывались до седьмого уровня, используя различные базисы вейвлет функций. Анализируемые профили были восстановлены путем перестановки (изменения) процедуры разложения. Были выбраны вейвлеты Добеши Least Asymmetric с длиной основания 8 (LADS) и второй и третий уровни реконструкции. Цифровые маммограммы были разделены на вертикальные линии и каждая линия была разложена до третьего уровня, используя LADS, и восстановлена, используя уровни 2 и 3 из процесса разложения. Таким способом было создано изображение, содержащее возможные точки микрокальцинатов. Эти точки были переведены в исходное изображение и путем применения пороговой обработки и методов наращивания областей и процедуры кластеризации были обнаружены сгруппированные микрокальцинаты. Метод привел к чувствительности 81 % при степени ложно-положительного обнаружения 3,76.

В [31] представлен метод для визуализации микрокальцинатов на маммографии с использованием вейвлет фреймов, оператора улучшения и подходящей технологии реконструкции. Компьютерный алгоритм проверен на 24 цифровых маммограммах (Senographe 2000D), содержащих микрокальцинаты. Этот алгоритм высвечивает похожие на микрокальцинаты структуры посредством банка фильтров, который основан на вейвлет разложении. Что является новым в этом банке фильтров – то, что дискретизация непрерывного вейвлет преобразования специально откорректирована для проблемы анализа изображения, позволяя лучше выделить микрокальцинаты от фона изображения. Во всех случаях (24/24), микрокальцинаты были изображены с заметно более высоким контрастом.

В [32] представлен новый подход к улучшению цифровых маммографических изображений для более точного обнаружения кластеров микрокальцинатов. Метод основан на избыточном дискретном вейвлет преобразовании из-за его хороших свойств: постоянство сдвига (shift invariance) и численной устойчивости. Процедура состоит из трех шагов: удаление низкочастотной компоненты плотной ткани, фильтрация шума и улучшения видимости микрокальцинатов. Экспериментальные результаты показали хорошие свойства предложенного метода.

В [33] предложен метод для обнаружения сгруппированных микрокальцинатов на цифровых маммограммах. Он основан на реконструкции изображения с использованием в основном оптимально взвешенного вейвлет преобразования. Весовые коэффициенты на отдельных масштабах вейвлет преобразования оптимизированы основываясь на управляемом методе обучения. В методе обучения функция ошибки – это различие между желательным выходом и восста-

новленным изображением, полученным от взвешенных вейвлет коэффициентов вейвлет преобразования данной маммограммы. Затем функция ошибки минимизируется, изменяя весовые коэффициенты посредством алгоритма сопряженного градиента. Процедура нахождения оптимально взвешенных вейвлетов была оценена посредством анализа приемно-операционной характеристики (ROC), который показал, что существующее изобретение выиграло и у технологии разности изображений, и частично у метода реконструкции, используемого в методах компьютерной постановки диагноза.

В [34] исследована автоматическая схема обнаружения, использующая классификатор нейронной сети, с входными векторами признаков, содержащими пространственные и спектральные признаки изображения. Чтобы улучшить обнаружение используется техника улучшения изображения на основе вейвлет преобразования.

В [35] исследуется применение адаптивных вейвлетов для представления и классификации сигналов микрокальцинатов на цифровых маммограммах. Класс вейвлет базисных функций используется для извлечения признаков из областей интереса. Эти признаки затем используются в искусственной нейронной сети для классификации области либо на содержащую группы микрокальцинатов, либо на принадлежащую к второстепенной паренхиме. Параметры смещения и растяжения вейвлет функции не установлены (не фиксированы). Эти параметры включены в схему обучения. Таким способом, вейвлеты адаптированы к ожидаемой форме и размеру микрокальцинатов. Результаты показывают, что адаптивные вейвлет функции могут превзойти классический фиксированный вейвлет анализ при обнаружении тонких групп микрокальцинатов.

Исследование в [36] было сосредоточено на развитии программного обеспечения системы автоматической постановки диагноза для обнаружения микрокальцинатов и низкоконтрастных масс мягких тканей цифровых маммограмм. Авторы исследуют обнаружение микрокальцинатов, используя вейвлет преобразование как первую стадию фильтрации, заменяя предыдущую технику, основанную на согласованной Фурье фильтрации.

Техника оптимально взвешенных вейвлет пакетов была разработана в [37] для улучшения работы системы компьютерной постановки диагноза для обнаружения сгруппированных микрокальцинатов на цифровых маммограммах. В их подходе микрокальцины на маммограмме аппроксимированы набором вейвлетов, которые извлечены из каталога вейвлет пакетов посредством согласованного алгоритма преследования. Отобранный набор вейвлетов затем подвергается контролируемому процессу обучения для оптимизации весов, соотношенных с отдельными время-частотными «черепицами», полученными вейвлет пакетным разложением. Оптимизация достигнута путем минимизации среднеквадратической функции ошибки, которая представляет разность между изображениями, восстановленными от взвешенного вейвлет пакетного разложения, и соответствующий обучающий изображений указывает местоположение микрокальцинатов. В анализе 82 областей интереса, извлеченных из маммографической базы данных, площадь под ROC кривой была 0.93, что обеспечивает чувствительность 92 % и специфичность 75 %. Показано, что новая тех-

ника дает лучший результат, чем наша предыдущая схема, основанная на ортогональном вейвлет преобразовании с фиксированным весом.

2.4. Вейвлетные методы классификации патологических образований

Рассмотрим вейвлетные методы классификации микрокальцинатов.

В [38] представлен мультимасштабный статистический подход к анализу текстуры. Эти методы используются для классификации микрокальцинатов на злокачественные и доброкачественные на цифровых маммограммах. В этом исследовании извлекаются предложенные мультимасштабные статистические признаки текстуры, основанные на матрице совместного появления, а так же вейвлетные признаки текстуры в областях интереса, содержащих микрокальцинаты. Особое свойство этих текстурных признаков демонстрируется их способностью к успешному распознаванию между злокачественными и доброкачественными случаями. Классификация выполнена посредством классификатора K-ближайшего соседа. Правильная стопроцентная классификация достигнута при использовании комбинации мультимасштабных статистических признаков текстуры и вейвлетных признаков текстуры. Использовалась база данных с небольшим количеством образцов, при этом дальнейший анализ с большей базой данных даст этим результатам большее статистическое значение.

В [39] показано изучение маммографических микрокальцинатов с использованием вейвлетов для обеспечения полезной информацией для диагноза рака груди. В большинстве исследований изображений с использованием вейвлетов, отсчеты изображений принимаются как коэффициенты разложения скейлинг функции на некотором масштабе. При больших значениях масштаба аппроксимация работает, так как скейлинг функция аппроксимирует дельта функцию. В этом исследовании авторы подбирали скейлинг функцию из класса существующих скейлинг функций. Ошибка аппроксимации на некотором масштабе минимизирована с использованием генетического алгоритма. Результаты указывают многообещающую процедуру для выбора оптимальных вейвлетов для последующей классификации маммографических микрокальцинатов.

Заключение

Анализируя рассмотренные работы, можно прийти к заключению: применение вейвлет-технологии для обработки изображений в большинстве случаев дают лучшие по сравнению с классическими одномасштабными методами результаты. В ряде случаев, когда методы на основе вейвлетов не приводят к требуемой цели, отличные результаты получаются путем комбинирования достоинств классических методов с преимуществами вейвлетных.

Литература

1. Рожкова Н.И. Рентгенодиагностика заболеваний молочной железы. - М.: Медицина, 1993, 224 с.
2. Линденбратен Л.Д., Бурдина Л.М. Маммография (учебный атлас).- М.: Видар, 1997, 128 с.
3. D.C. Wang, Digital image enhancement : a survey. Comput. Vision, Graphics, Image Process., 24:363-381, 1983.
4. R. Hummel. Histogram modification techniques. Comput. Graphics Image Process., 4:209-224, 1975.
5. W. Frei. Image enhancement by histogram hyperbolization. Comput. Graphics Image Process., 6:286-294, 1977.
6. S.M. Pizer, Adaptive histogram equalization and its variation. Comput. Graphics Image Process., 39:355-368, 1987.
7. J.W. Oestmann, High frequency edge enhancement in the detection of fine pulmonary lines. Invest. Radiol., 24: 643-646, 1989.
8. M. Procop, Storage of phosphor versus screen-film radiography. Radiology, 177: 109-113, 1994.
9. A. Rosenfeld, Digital Picture processing, 2nd ed., Academic Press, New York, 1982.
10. L.D. Loo, Investigation of basic imaging properties in digital radiography. Med. Phys., 12(2): 209-214, 1985.
11. F. Neyenssac. Contrast enhancement using the Laplacian-of-Gaussian filter. GVGIP: Graphical models and image processing, 55(6):447-463, 1993.
12. R. Gordon. Feature enhancement of film mammograms using fixed and adaptive neighborhood. Appl. Opt., 23: 560-564, 1984.
13. A. Behdadi. Contrast enhancement technique based on local detection of edges. Comput. Graphics Image Process., 46: 162-174, 1989.
14. A. Laine. Multiscale wavelet representation for mammographic feature analysis. In Image enhancement techniques: computer science, national cancer institute Breast imaging Workshop: state-of-the-art and new technologies, Bethesda, MD, 1992.
15. A. Laine, Multiscale wavelet representation for mammographic feature analysis, In Proc. SPIE: Conference on Mathematical Methods in medical imaging, San diego, CA, 1992.
16. A. Laine, Wavelet processing techniques for digital mammography. In Pros. SPIE: Conference on biomedical computing, Chapel Hill, NC, 1992.
17. A. Laine, Adaptive multiscale processing for contrast enhancement. In Proc. SPIE: Conference on biomedical imaging and biomedical visualization, San Jose, CA, 1993.
18. B.D. Jawerth, Local enhancement of compressed images. J. Math. Imaging Vision, 3:39-49, 1993.
19. A. Laine. Mammographic feature enhancement by multiscale analysis. IEEE Trans. Med. Imaging, 13(4):725-740, 1994.

20. J.Lu, Contrast enhancement of medical images using multiscale edge representation. In Proc. SPIE: Wavelet applications, FL, 1994.
21. Y. Jin. Contrast enhancement by multi-scale adaptive histogram equalization. European Congress of Radiology, Vienna, Austria, 2001.
22. I. Koren. Enhancement via fusion of mammographic features. In Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing, Washington, D.C., Oct., 1999, vol.8, pp, 234-240.
23. T. Brown. Differential image enhancement via wavelet foveation. In Proc. Of IMVIP 2000 – Irish Machine Vision and image processing Conference, 67-81, 2000.
24. F. Sattar, Image enhancement based on a nonlinear multiscale method, IEEE Trans. On Image processing, vol. 6, No. 6, June, 1997.
25. A. Laine, A framework for contrast enhancement by dyadic wavelet analysis. In Digital Mammography, A. G. Gale, Eds. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1994, pp. 91-100.
26. J. Fan. Contrast enhancement by multiscale and nonlinear operators. In Time Frequency and wavelets in biomedical signal processing, M. Akay, Ed. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1998, pp. 230-258.
27. A. Laine. Mammographic feature enhancement by multiscale analysis. IEEE Trans. Med. Imaging, vol. 13, No. 4, December 1994.
28. T. Wang, Detection of Microcalcifications in digital mammograms using wavelets.
29. G. Boccingtone, Entropy-based detection of microcalcifications in wavelet space. IEEE Trans. Med. Imaging, vol.10, No. 4, August 1992.
30. M. Lado, Computer-assisted diagnosis: application of wavelet transform techniques to the detection of clustered microcalcifications in digital mammograms, IEEE Trans. Med. Imaging, vol.15, No. 1, January 1997.
31. F. Diekmann, Visualization of microcalcifications by full-field digital mammography using a wavelet algorithm. International Congress Series 1230 (2001), pp. 526-530.
32. D. Sersic, Enhancement of mammographic images for detection of microcalcifications, IEEE Trans. Med. Imaging, vol.15, No. 2, March 1997.
33. H. Yoshida, Method for determining an optimally weighted wavelet transform based on supervised training for detection of microcalcifications in digital mammograms, Patent of USA, No. 6075878, Jun, 13, 2000.
34. Y. Wang, An artificial neural network for detecting microcalcifications in wavelet-enhanced digitized mammograms, IEEE Trans. Med. Imaging, vol.18, No. 2, March 1999.
35. F. Aghdasi, Application of Neural network adaptive wavelets for signal representation and classification in digital mammography. In Digital mammography'96, Proceedings of the 3rd International Workshop, on Digital Mammography, Chicago, U.S.A., 9-12 June 1996.
36. G. McLeod, Automatic detection of clustered microcalcifications using wavelets. In Digital mammography'96, Proceedings of the 3rd Interna-

- tional Workshop, on Digital Mammography, Chicago, U.S.A., 9-12 June 1996.
37. H. Yoshida, Optimally weighted wavelet packets for detection of clustered microcalcifications in digital mammograms. In Digital mammography'96, Proceedings of the 3rd International Workshop, on Digital Mammography, Chicago, U.S.A., 9-12 June 1996.
 38. J. Kim, Classification of microcalcifications in digitized mammograms using multiscale statistical texture analysis. IEEE Trans. Med. Imaging, vol.15, No. 5, November, 1998.
 39. Y. Chitre. Adaptive wavelet analysis and classifications of mammographic microcalcifications, In Digital mammography'96, Proceedings of the 3rd International Workshop, on Digital Mammography, Chicago, U.S.A., 9-12 June 1996.

Содержание

Введение	3
1. Анализ рентгенологической картины патологических образований в молочной железе	4
2. Методы цифровой обработки изображений, применяемые в маммографии	12
2.1. Классические методы повышения контраста	12
2.2. Вейвлетные методы повышения контраста	13
2.3 Вейвлетные методы детектирования микрокальцинатов	15
2.4. Вейвлетные методы классификации патологических образований	18
Заключение	19
Литература	20