

ность в установлении граничной энергии, требующая уточнения критериев оценки. При достаточном объеме исходных данных (при напряжениях выше 100 кВ) измеренные значения первого слоя половинного ослабления согласуются с эталонными значениями.

Результаты экспериментов подтвердили принципиальную возможность восстановления спектральных распределений по абсорбционным кривым и последующего расчета качественных параметров рентгеновских пучков. Для достижения большей достоверности измерений необходимо уменьшать ширину каналов детектирования и конструктивно исключать возможность возбуждения вторичного излучения в объеме детектора. Предложенная в работе методика измерений может стать основой для разработки новой отечественной системы контроля радиационных параметров диагностических пучков излучения.

Список литературы:

1. *Карягин М.А.* Состояние и перспективы развития методов и средств неинвазивного измерения напряжения на рентгеновских трубках // Медицинская техника. 2013. № 5. С. 54-58.
2. IEC 61267:2005 Medical Diagnostic X-Ray Equipment – Radiation Conditions for Use in the Determination of Characteristics.
3. *Муслимов Д.А., Лелюхин А.С., Гамалей К.А.* Определение практического пикового напряжения по восстановленным спектральным распределениям тормозного излучения // Медицинская техника. 2011. № 5. С. 34-39.

4. *Теребиж В.Ю.* Введение в статистическую теорию обратных задач. – М.: Физматлит, 2005. 376 с.
5. *Толбанов О.П.* Детекторы ионизирующих излучений на основе компенсированного арсенида галлия // Вестник Томского государственного университета. 2005. № 285. С. 155-163.
6. *Лелюхин А.С., Яснев А.В.* Моделирование полей вторичного рентгеновского излучения / Материалы Всерос. молодежн. конф. «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине-2015» / Под ред. проф. Д.А. Усанова. – Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2015. С. 79-82.
7. *Лелюхин А.С., Муслимов Д.А., Таисов М.В., Аджиева М.Д.* Комплекс программных модулей для восстановления спектра тормозного излучения методом минимизации направленного расхождения / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014611219 от 28.01.2014 г. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Россия.

*Александр Сергеевич Лелюхин,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра общей физики,
Оренбургский государственный университет,
г. Оренбург,
e-mail: alex-ray@inbox.ru*

В.А. Горшков, Н.И. Рожкова, С.П. Прокопенко

Аналитическая идентификация единичных микрокальцинатов на основе распределения атомного номера

Аннотация

Целью рассматриваемого исследования является улучшение раннего выявления единичных микрокальцинатов как ранних предвестников онкологического заболевания.

Исследования показали, что наличие единичного микрокальцината в молочной железе значительно повышает диапазон изменения эффективного атомного номера и существенно изменяет характер его распределения. Единичный микрокальцинат может не проявляться или быть едва различимым на традиционной, разностной, делительной маммограммах, а также на распределении их выпуклой линейной комбинации. Факт присутствия единичного микрокальцината в молочной железе может быть установлен аналитически на основе распределения крайних (максимальных) членов вариационного ряда эффективных атомных номеров в молочной железе. Координаты могут быть вычислены математически. Если в здоровой ткани распределение эффективного атомного номера симметрично и близко к нормальному распределению, то в ткани даже с одним единичным микрокальцинатом оно характеризуется значительным диапазоном изменений и существенной асимметричностью. В статье предложен алгоритм вычисления координат расположения единичных микрокальцинатов.

Введение

Образование микрокальцинатов может быть одним из признаков возникновения онкологических заболеваний. Обнаружение даже единичного микрокальцината в молочной железе может свидетельствовать о начале возрастного процесса кальцинирования или зарождении онкологического заболевания. Однако обнаружить единичный микрокальцинат с помощью традиционной скрининговой маммографии весьма сложно, особенно если его размеры составляют менее 100...150 мкм. За последние десятилетия, благодаря развитию технических средств и методов математической обработки, достигнут значительный прогресс в диагностике онкологического заболевания молочной железы [1]. Созданы методы двухэнергетической разностной [2] и делительной [3] маммографии, способы визуализации линейной комбинации эффективного атомного номера и плотности [4], [5], усиливающие чувствительность получаемых изображений к изменению эффективного атомно-

го номера. Разработаны различные фильтры для обработки традиционных маммограмм [6], повышающие контрастность и резкость изображения молочной железы. Развита методика микрофокусной маммографии, позволяющие многократно увеличить изображения отдельных участков молочной железы и визуализировать структуры существенно меньших размеров [7].

Однако идентификация мельчайших единичных микрокальцинатов по-прежнему затруднительна. В лучшем случае они видны лишь на однородных фантомах. Сложность обнаружения на маммограммах единичных микрокальцинатов в реальной молочной железе обусловлена суперпозицией структурных элементов тканей и сосудов [8].

Существенное отличие эффективного атомного номера микрокальцината от ткани молочной железы может лежать в основе их идентификации. При этом факт их наличия может устанавливаться не на маммограмме, а путем анализа распределения эффективного атомного номера.

Материал и методы

Традиционная цифровая маммограмма представляет собой визуализацию распределения доли фотонов, прошедших через молочную железу без взаимодействия, которая определяется для источника с непрерывным спектром как

$$\frac{N}{N_0} = \sum_{E=E_{\min}}^{E=E_{\max}} f(E) e^{-\mu_t(Z_t, E) \rho_t d_t - \mu_{mc}(Z_{mc}, E) \rho_{mc} d_{mc}} \Delta E, \quad (1)$$

где N_0 – исходное число фотонов; N – число регистрируемых фотонов, прошедших молочную железу без взаимодействия; μ_t, ρ_t, d_t – массовые коэффициенты ослабления, плотности, толщины ткани молочной железы (t) и микрокальцината (mc) со-

ответственно; $f(E)$ – функция плотности распределения энергии источника излучения, определяемая его спектром; Z_t, Z_{mc} – эффективные атомные номера ткани и микрокальцината для энергии E соответственно; ΔE – величина шага в дискретном представлении энергетического спектра.

Наличие микрокальцинатов приводит к повышению эффективного атомного номера участка молочной железы, так как Z микрокальцинатов составляет 12...14, а тканей молочной железы – 6,3...7.

Несмотря на то что размер гранулы микрокальцината существенно меньше толщины компримированной молочной железы (менее 0,2 мм) на маммографе (20...50 мм), их скопления на маммограммах проявляются весьма отчетливо. Это свя-

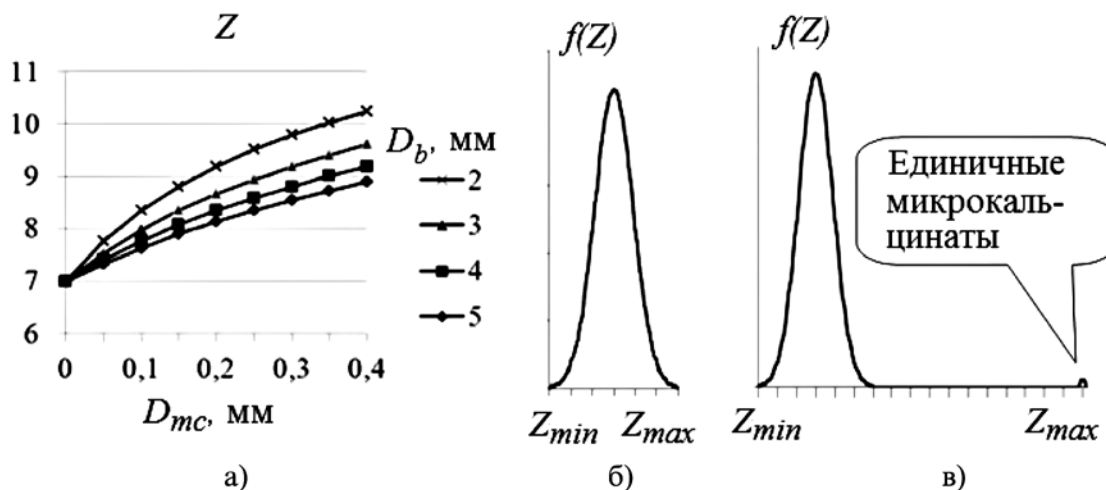


Рис. 1. Влияние наличия микрокальцинатов на распределение эффективного атомного номера Z в молочной железе: а) зависимость эффективного атомного номера ткани молочной железы с микрокальцинатом от его размера (D_{mc}) для различной ее толщины (D_b); б) распределение Z в молочной железе без микрокальцинатов; в) то же в ткани с единичными микрокальцинатами

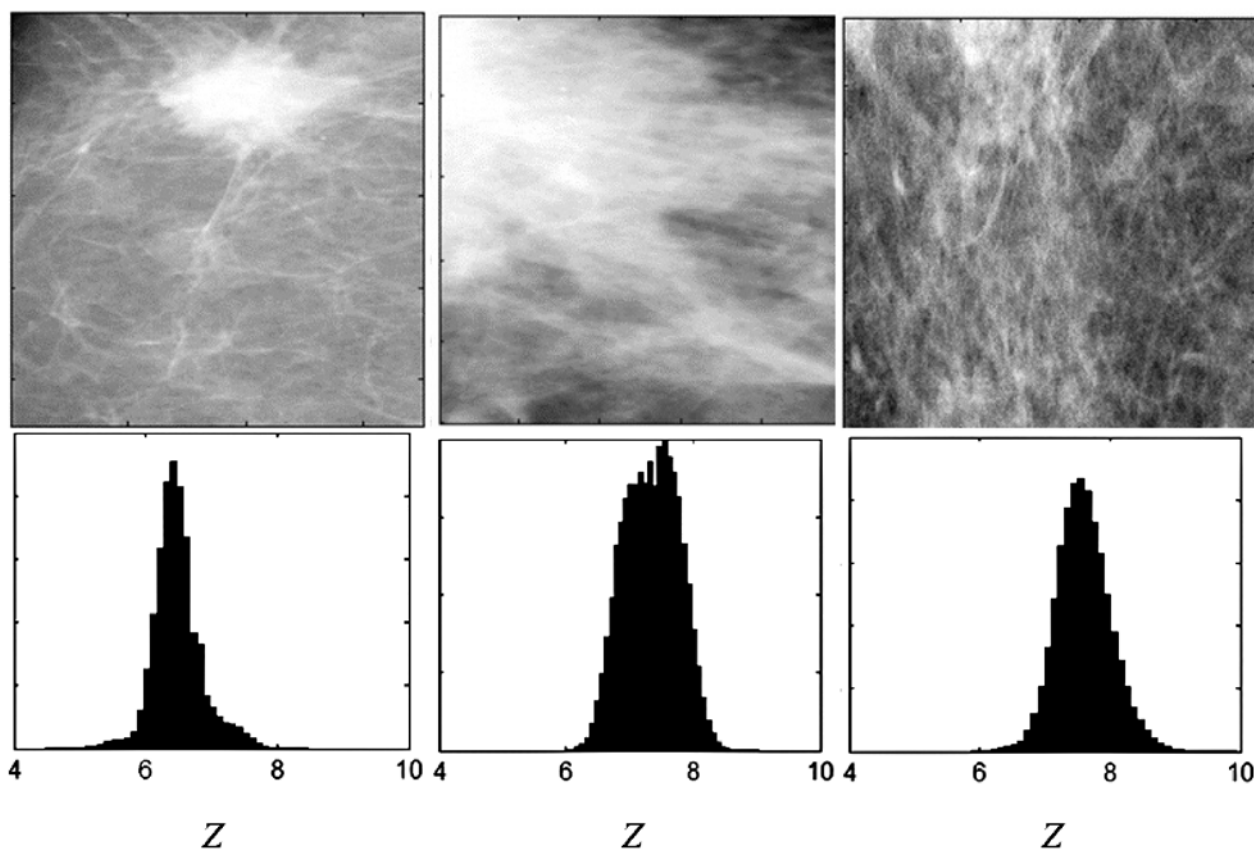


Рис. 2. Три фрагмента маммограмм молочной железы на фоне фибро-жировой инволюции (верхний ряд) и соответствующие им распределения вычисленных атомных номеров

зано с тем, что их плотность более чем в два раза выше плотности ткани, а также с тем, что массовый коэффициент ослабления пропорционален атомному номеру в 3...4-й степени.

Для монохроматического излучения отношение массовых коэффициентов ослабления для низкой и высокой энергий определяется отношением логарифмов долей зарегистрированного излучения, зависит только от эффективного атомного номера и не зависит от плотности:

$$\beta(Z) = \frac{\mu_L}{\mu_H} = \frac{\ln \frac{N_0^L}{N^L}}{\ln \frac{N_0^H}{N^H}} \neq f(\rho). \quad (2)$$

Массовые коэффициенты ослабления определяются энергией излучения и атомным номером. Во всех маммографах

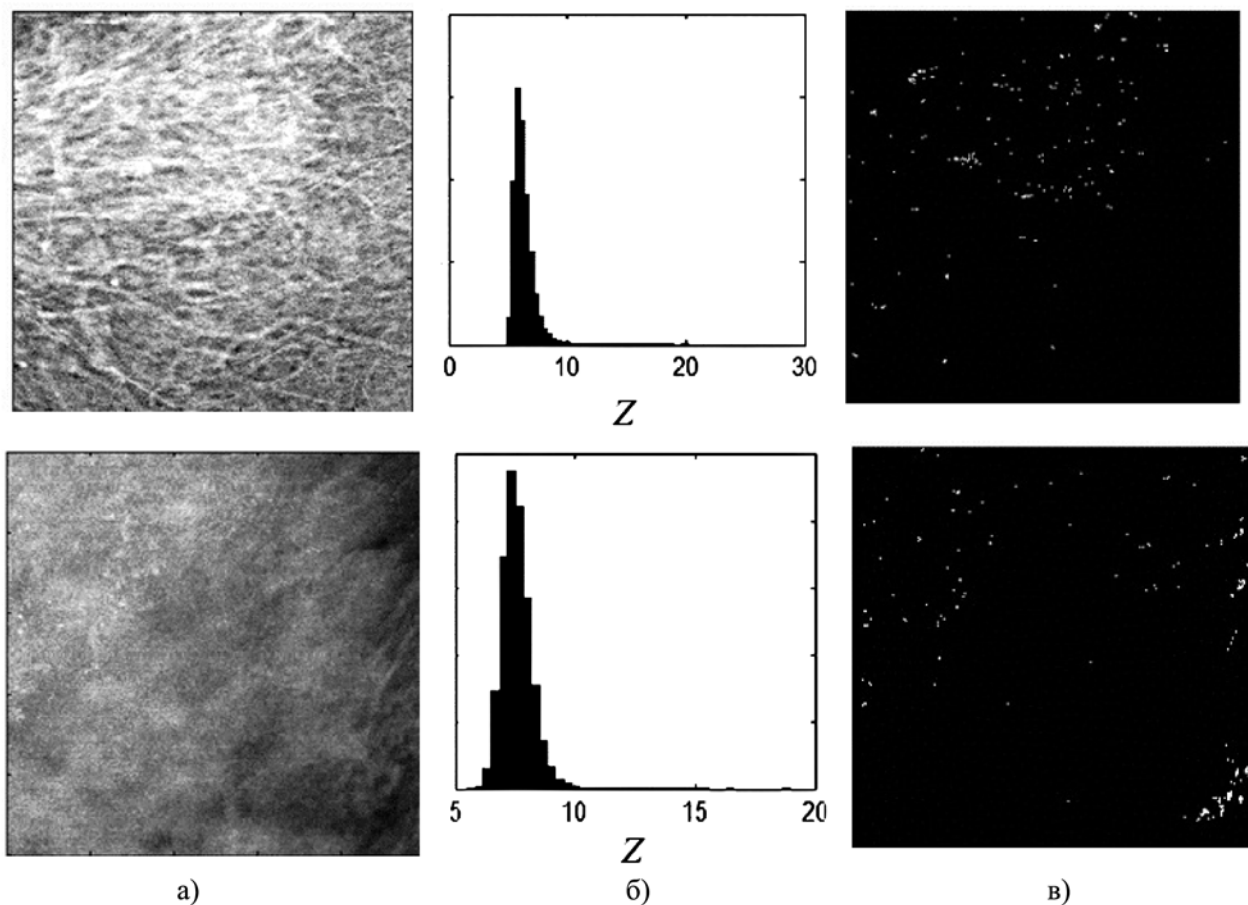


Рис. 3. Два примера молочной железы с отложением микрокальцинов в млечных протоках (верхний ряд) и молочной железы с диффузно выраженной фиброзной мастопатией (нижний ряд): а) фрагменты маммограмм; б) распределение вычисленного атомного номера; в) координаты пикселей фрагмента маммограммы, которые соответствуют расположению микрокальцинов



Рис. 4. Гистограммы максимальных рассчитанных атомных номеров: а) для 102-х фрагментов молочных желез без микрокальцинов; б) для 49-и фрагментов молочных желез с микрокальцинатами

применяются источники с непрерывным спектром. В этом случае отношения логарифмов будут зависеть не только от эффективного атомного номера, но и от плотности и толщины молочной железы [9]:

$$\beta(Z) = \frac{\ln \frac{N_0^L}{N^L}}{\ln \frac{N_0^H}{N^H}} = f(Z, \rho, d). \quad (3)$$

Для рентгеновского излучения, применяемого в маммографах, в качестве массовых коэффициентов ослабления в выражении (2) необходимо использовать их математические ожидания для используемых спектров [9], [10].

Именно их отношение определяет инвариантный к плотности и толщине молочной железы эффективный атомный номер.

На *рис. 1а* представлена зависимость эффективного атомного номера ткани молочной железы с микрокальцинатом от его размера для различной ее толщины. Чем меньше толщина молочной железы, тем существенно повышается эффективный атомный номер при наличии микрокальцината.

Распределение эффективного атомного номера в здоровой молочной железе подчиняется нормальному закону, имеющему симметричный характер в диапазоне $Z_{\min} \dots Z_{\max}$ (*рис. 1б*). Однако наличие хотя бы единичного микрокальцината приводит к его асимметричности, поскольку Z в этой области существенно выше, чем в здоровой ткани (*рис. 1в*).

Характер распределения эффективного атомного номера определяет факт наличия единичных микрокальцинатов в молочной железе.

Результаты

Исследования показали, что распределение рассчитанного значения эффективного атомного номера в молочных железах без микрокальцинатов относительно постоянно и варьируется в весьма широком диапазоне 6...10. Такой разброс определяется не распределением фактического значения эффективного атомного номера в молочной железе, а статистической погрешностью счета зарегистрированных фотонов. Число зарегистрированных фотонов элементом детектора размером $0,1 \times 0,1$ мм составляет несколько десятков, что приводит к вариации рассчитанного значения эффективного атомного номера в молочной железе 12...15 %.

На *рис. 2* представлены три примера распределений рассчитанного эффективного атомного номера в молочной железе без микрокальцинатов. Как видно, максимальное его значение составляет 9...10.

На *рис. 3* представлены два примера молочной железы с микрокальцинатами. Распределение рассчитанного атомного номера в подавляющем числе пикселей практически аналогично его распределению в молочной железе без микрокальцинатов. Однако наличие единичных микрокальцинатов существенно смещает данное распределение влево. При этом рассчитанные значения атомных номеров достигают значительных неадекватных значений – 18...20 и более, что, конечно, существенно превышает возможные величины эффективных атомных номеров (*рис. 1*).

Такая завышенная оценка объясняется невозможностью идеального совмещения всех микрокальцинатов на двух маммограммах, полученных при высокоэнергетическом и низкоэнергетическом излучении. Это приводит к тому, что на распределении отношения массовых коэффициентов поглощения в зоне расположения микрокальцината вычисляется отношение массового коэффициента поглощения ткани молочной железы с микрокальцинатом при низкоэнергетическом излучении μ_L^{t+mc} к коэффициенту поглощения ткани без микрокальцината при высокоэнергетическом излучении μ_H^t . Но это отношение значительно больше, чем отношение для ткани без микрокальцината и ткани с микрокальцинатом [4]:

$$\frac{\mu_L^t}{\mu_H^t} < \frac{\mu_L^{t+mc}}{\mu_H^t} \quad \text{и} \quad \frac{\mu_L^{t+mc}}{\mu_H^t} < \frac{\mu_L^{t+mc}}{\mu_H^{t+mc}}. \quad (4)$$

Этот эффект только усиливает чувствительность рассчитываемого атомного номера к наличию единичных микрокальцинатов в молочной железе.

На *рис. 3в* представлены вычисленные координаты пикселей маммограммы, в которых рассчитанные значения эффективных атомных номеров превышают 12.

На *рис. 4* представлены гистограммы максимальных рассчитанных атомных номеров для 102-х фрагментов молочных желез (301×301 пиксел) без микрокальцинатов (а) и 49-и фрагментов молочных желез с микрокальцинатами. Как видно, эти распределения не перекрываются, в связи с чем можно считать, что аналитическая идентификация единичных микрокальцинатов по распределению атомного номера достаточно эффективна.

Заключение

Распределение эффективного атомного номера является весьма информативной характеристикой для идентификации единичных микрокальцинатов. Предложенный в работе метод является существенным дополнением к арсеналу способов диагностики заболевания молочной железы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 16-07-00251 а.

Список литературы:

1. Bonnie N.J., Sickles E.A. The Evolution of Breast Imaging: Past to Present // Radiology. 2014. Vol. 273 (2S). PP. 23-44.
2. Lewin J.M., Isaacs P.K., Vance V., Larke F.J. Dual-Energy Contrast-enhanced Digital Subtraction Mammography: Feasibility // Radiology. 2003. Vol. 229 (1). PP. 261-268.
3. Gorshkov V.A., Rozhkova N.I., Prokopenko S.P. Dual-Energy Diving Mammography / Digital Mammography 10th Inter. Workshop. IWDM 2010. Girona, Spain. PP. 606-613.
4. Горшков В.А., Рожкова Н.И., Прокопенко С.П. Визуализация микрокальцинатов на основе двухэнергетической детально-разностной маммографии // Медицинская техника. 2014. № 5. С. 44-47.
5. Gorshkov V.A., Nazirov R.R., Rodin V.G., Rozhkova N.I., Prokopenko S.P. Verfahren zur Zwei-Energien-Divisions-Differenz-Mammographie / PCT WO/2013/136150. 2013.
6. Bria A. et al. Deep Cascade Classifiers to Detect Clusters of Microcalcifications / Digital Mammography 13th Inter. Workshop. IWDM 2016. Malmö, Sweden. PP. 415-422.
7. Жамова К.К. Метод микрофокусной цифровой маммографии с прямым многократным увеличением изображения / Дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», 2016. 149 с.
8. Kappadath S.C., Shaw C.C. Dual-energy digital mammography: Calibration and inverse-mapping techniques to estimate calcification thickness and glandular-tissue ratio // Med. Phys. 2003. Vol. 30 (6). PP. 1110-1117.
9. Gorshkov V.A. The effective atomic number and the mass attenuation coefficient of a multicomponent object for the continuous spectrum of the radiation // Nondestructive Testing and Evaluation. 2017. Vol. 32 (1). PP. 79-89.
10. Рожкова Н.И., Горшков В.А., Меских Е.В. и др. Цифровая маммологическая клиника. Современные технологии визуализации / Под ред. Н.И. Рожковой, В.А. Горшкова. – М.: Специальное издательство медицинских книг, 2013. С. 160.

Вячеслав Алексеевич Горшков, д-р техн. наук, профессор,
ФГБУН «Институт космических исследований» РАН,
Надежда Ивановна Рожкова, д-р мед. наук, профессор,
Сергей Павлович Прокопенко, канд. мед. наук,
Московский научно-исследовательский
онкологический институт им. П.А. Герцена –
филиал ФГБУ «НМИРЦ» МЗ РФ,
г. Москва,

e-mail: vagorshkov@mail.ru