

SPEKTRAL RENTGEN KOMPYUTER TOMOGRAFIYASIDA SPEKTRAL BUZILGAN CHIZIQLI YUTILISH KOEFFITSIYENTLARINI TO'G'IRLASH USULI

Tajiyeva Roziyajon Adilbekovna

*(Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti magistranti; E-mail:
tajiyevaroziyajon@gmail.com)*

Jumanazarov Doniyor Rustamovich

*(Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti fizika kafedrasini
dotsenti, DSc; E-mail: doniyor.jumanazarov@fysik.dtu.dk)*

Tabiiy fanlarning zamonaviy muammolari va rivojlanish istiqbollari

Annatsiya. *Ko'p energiyali rentgen kompyuter tomografiyasida (KT) qo'llaniladigan foton sanagich detektorlar (FSD) yuqori energiya ajratish qobiliyatini ta'minlaydi, ammo spektral buzilishlarga duch keladi. Bu buzilishlar zaryad almashinuvi, impuls to'planishi va to'liqsiz zaryad yig'ilishi kabi fizikaviy hodisalardan kelib chiqadi. Natijada rekonstruksiya qilingan chiziqli susaytirish koeffitsientlari (CHSK) noto'g'ri bo'lib qoladi, ayniqsa past energiyalarda. Ushbu ishda biz spektral buzilgan CHSK larni proyeksiya domenida tuzatishning hisoblash jihatdan samarali usulini taklif etamiz. Usul kiruvchi rentgen spektrining yoki oqim taqsimotining oldindan ma'lum bo'lishini talab qilmaydi. Taklif etilayotgan usul xom proyeksiya ma'lumotlariga kanal bo'yicha chiziqli va chiziqli bo'lmagan parametrlashtirishni qo'llaydi, parametrlar ma'lum referens materiallardan kalibrlanadi. Optimal parametrlar har bir energiya kanali uchun rekonstruksiya qilingan va jadval CHSK lar orasidagi farqni minimallashtirish yo'li bilan aniqlanadi. Olingan parametrlar o'rtacha qiymatga keltirilib, noma'lum materiallarning proyeksiya ma'lumotlarini tuzatish uchun qo'llaniladi. Tajribaviy tekshiruv FSD dan olingan turli sinov materiallari ustida o'tkazildi. Natijalar usul ko'p energiyali CHSK larni butun energiya diapazonida yuqori aniqlik bilan tiklashini, ayniqsa past energiyalarda mavjud eng zamonaviy usul muvaffaqiyatsiz bo'lgan joyda kuchli natija berishini ko'rsatdi. Dreier va boshqalarning proyeksiya domeni usuli bilan solishtirganda, taklif etilayotgan usul 30 keV dan past energiyalarda aniqroq CHSK bahosini beradi, ixcham ma'lumot hajmini saqlab qoladi va hisoblash yuklamasini oshirmaydi. Usul turli KT tizimlari, rentgen spektrlari va detektor konfiguratsiyalariga osongina moslashtiriladi hamda spektral KT tasvirlashda miqdoriy material xarakteristikasini yaxshilash uchun foydalidir.*

Kalit so'zlar: *Ko'p energiyali rentgen KT, Foton hisoblagich detektorlar, Miqdoriy rentgen xarakteristikasi, Ma'lumotlarni qayta ishlash usullari.*

**МЕТОД КОРРЕКЦИИ СПЕКТРАЛЬНО ИСКАЖЁННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ
ЛИНЕЙНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ В МНОГОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ
КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ**

Аннотация: В многоэнергетической рентгеновской компьютерной томографии (КТ) применяемые фотон-счётные детекторы (ФСД) обеспечивают высокое энергетическое разрешение, однако подвержены спектральным искажениям. Эти искажения возникают вследствие таких физических эффектов, как перераспределение заряда, наложение импульсов и неполный сбор заряда. В результате реконструированные коэффициенты линейного ослабления (КЛО) оказываются неточными, особенно в области низких энергий. В данной работе предлагается вычислительно эффективный метод коррекции спектрально искажённых КЛО непосредственно в проекционной области. Метод не требует предварительных сведений о спектре падающего рентгеновского излучения или распределении потока. Предлагаемый подход применяет поканальную линейную и нелинейную параметризацию к сырым проекционным данным, при этом параметры калибруются по известным эталонным материалам. Оптимальные параметры для каждого энергетического канала определяются путём минимизации отклонения между реконструированными и табличными значениями КЛО. Полученные параметры усредняются и используются для коррекции проекционных данных неизвестных материалов. Экспериментальная проверка проведена на различных тестовых материалах с использованием данных ФСД. Результаты показывают, что метод восстанавливает многоэнергетические КЛО с высокой точностью во всём диапазоне энергий, особенно в низкоэнергетической области, где существующие современные методы оказываются неэффективными. По сравнению с проекционным методом Драйера и соавторов, предлагаемый метод обеспечивает более точную оценку КЛО при энергиях ниже 30 кэВ, сохраняет компактный объём данных и не увеличивает вычислительную нагрузку. Метод легко адаптируется к различным КТ-системам, рентгеновским спектрам и конфигурациям детекторов и является полезным для повышения точности количественной характеристики материалов в спектральной КТ-визуализации.

Ключевые слова: Многоэнергетическая рентгеновская КТ, фотон-счётные детекторы, количественная рентгеновская характеристика, методы обработки данных.

CORRECTION OF SPECTRALLY DISTORTED LINEAR ATTENUATION COEFFICIENTS IN MULTI-ENERGY X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY

Abstract: Photon-counting detectors (PCDs) used in multi-energy X-ray computed tomography (CT) provide high energy resolution but are subject to spectral distortions. These distortions arise from physical effects such as charge sharing, pulse pile-up, and incomplete charge collection. As a result, the reconstructed linear attenuation coefficients (LACs) become inaccurate, especially at low energies. In this work, we propose a computationally efficient method for correcting spectrally distorted LACs directly in the

projection domain. The method does not require prior knowledge of the incident X-ray spectrum or flux distribution. The proposed approach applies channel-wise linear and nonlinear parameterization to the raw projection data, with parameters calibrated using known reference materials. Optimal parameters for each energy channel are determined by minimizing the deviation between the reconstructed and tabulated LAC values. The obtained parameters are averaged and then applied to correct the projection data of unknown materials. Experimental validation was performed on various test materials using data acquired from a PCD. The results show that the method restores multi-energy LACs with high accuracy across the entire energy range, particularly in the low-energy region where existing state-of-the-art methods fail. Compared to the projection-domain method of Dreier et al., the proposed method provides more accurate LAC estimates at energies below 30 keV, maintains a compact data size, and does not increase the computational load. The method is easily adaptable to different CT systems, X-ray spectra, and detector configurations and is useful for improving the accuracy of quantitative material characterization in spectral CT imaging.

Keywords: *Multi-energy X-ray CT, Photon-counting detectors, Quantitative X-ray characterization, Data processing methods.*

KIRISH (INTRODUCTION)

Spektral rentgen kompyuter tomografiyasi (KT) tizimlari yarimo'tkazgichli sensorlardan iborat foton hisoblagich detektorlar (PCD) yordamida bir nechta energiyalarda belgilangan chiziqli susaytirish koeffitsientlarini (CHSK) ajratib olish imkonini beradi [1]. PCD lar rentgen radiografiyasi [2, 3] va rentgen KT texnikalarida [4] materiallarni tasniflash samaradorligini sezilarli darajada oshirishda katta va'da beradi.

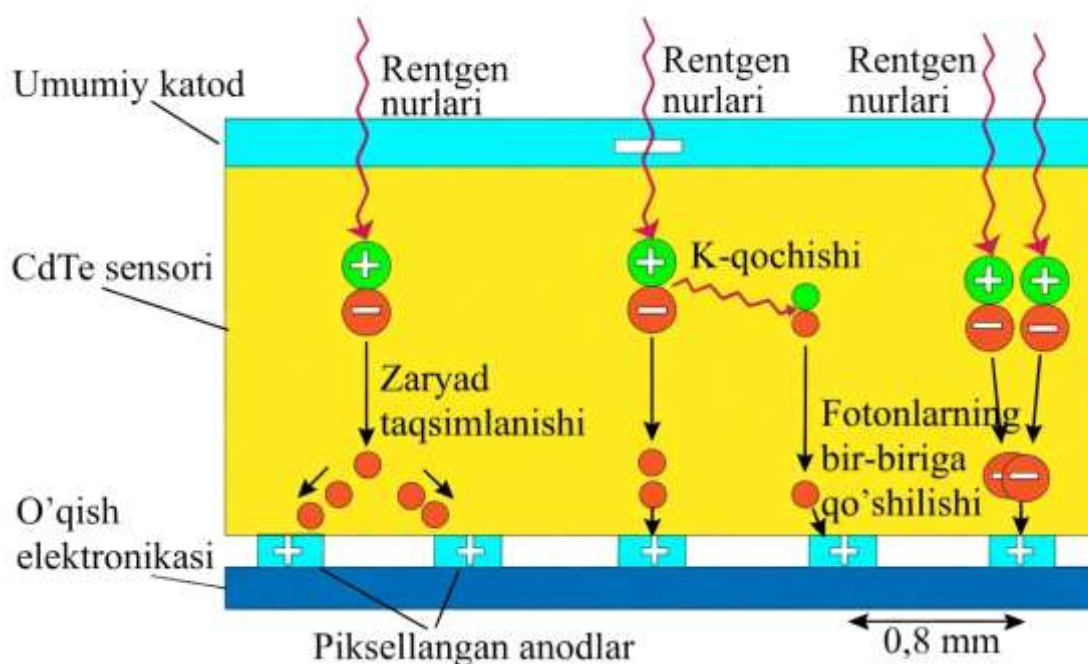
Bu detektorlar yaxshiroq ko'p energiyali ma'lumot berish qobiliyatiga ega bo'lib, hali ham faol tadqiq etilmoqda [5, 6]. Natijada tibbiy [7–10] va xavfsizlik ilovalari [11] uchun ko'p energiyali PCD larga katta qiziqish paydo bo'ldi. Materiallarni tasniflash spektral rentgen KT ning asosiy ilovalaridan biri bo'lib, energiya bo'yicha ajratilgan ma'lumotlardan foydalanish uchun bir qancha usullar taklif etilgan [12–15].

Shuningdek, energiya kanallari bo'yicha struktural izchillikni ta'minlash orqali materiallarni tasniflash aniqligini oshirish maqsadida birgalikda rekonstruksiya algoritmlari ham o'rganilmoqda [16]. Biroq, ko'p energiyali detektorlar tomonidan qayd etiladigan spektrlar detektorga xos hodisalar ta'sirida kuchli buziladi. Bu hodisalarni chiziqli (oqimdan mustaqil) va chiziqli bo'lmagan (oqimga bog'liq) modellariga bo'lish mumkin [7].

Chiziqli effektlarga zaryad almashinuvi, rentgen fluoresentsiyasi (qochish cho'qqilari), vazn potentsiali (WP) o'zaro ta'siri, Kompton tarqalishi va elektron shovqin kiradi. Chiziqli bo'lmagan effektlar esa foton to'planishi (pile-up) va to'liqsiz zaryad yig'ilishidan (ICC) kelib chiqadi. Savdo detektorlardan foydalanishga qaramay, qayd etilgan spektrlar sezilarli buzilishni saqlab qoladi.

Buzilishlarni tuzatish uchun analitik va empirik modellar keng qo'llaniladi [17–20]. Dreier va boshqalar [23] ishlab chiqqan proyeksiya domenidagi tuzatish algoritmi xom ma'lumotlardagi xatolarni matematik modellar yordamida bartaraf etadi va o'lchangan ko'p energiyali CHSK lar aniqligini oshiradi.

Ushbu usul Plagnardning iterativ modelini [21] qo'llab, impuls to'planishini tuzatadi. Biroq, mavjud analitik va empirik usullar bir qator cheklovlarga ega: ular ko'pincha og'ir simulyatsiyalarni talab qiladi, past energiyada spektrlarni buzadi va muhim past energiyali fotonlarni yo'qotishiga olib keladi. Bu esa materiallarni identifikatsiya qilishda jiddiy muammo tug'diradi. Bundan tashqari, qayd etilgan spektrlarni tuzatishning boshqa usullari turli qalinlikdagi materiallardan tayyorlangan pog'onali klin-fantomdan foydalanadi [24–27].



1-rasm: Diagramma foton hisoblagich detektorida spektral ruxsatni pasaytiruvchi omillarni ko'rsatadi. Ushbu muammolarga piksel chegaralaridagi zaryad almashinuvi (charge sharing), fluoresentsiya va K-chiqishi (K-escape) tufayli energiya yo'qolishi kiradi. Bu rentgen impulslarini noto'g'ri energiya darajalarida hisoblashga olib keladi. Foton to'planishi (photon pileup) ikki fotonning bir-biriga qo'shilishiga olib kelishi mumkin, natijada ular yuqori energiyali bitta foton sifatida paydo bo'ladi.

Foton hisoblagich detektorlarining spektral javobi CdTe sensor kristallidagi bir nechta fizikaviy hodisalar tufayli energiya kanali bo'yicha sezilarli darajada o'zgaradi. 1-rasm oddiy detektor sozlamasida zaryad almashinuvi, fluoresentsiya, K-qochish va foton to'planishi effektlerini ko'rsatadi. Energiya va oqimga bog'liq o'zgaruvchilar FSD larda energiya baholash aniqligini pasaytiradi va qayd etilgan chiziqli susaytirish koeffitsientlari (CHSK) egri chiziqlarida farqlarni keltirib chiqaradi.

Asosiy detektor effektlari quyidagilar:

- Rentgen fluoresentsiyasi (K-qochish) CdTe ning K-qobig'idan yuqori energiyali fotonlar chiqarilganda yuzaga keladi. Bu fluoresentsiya fotonlarining yaqin pikselga

o'tib ketish yoki sensor kristalidan chiqib ketish ehtimolini oshiradi va detektor kiruvchi fotonni pastroq energiya darajasida ro'yxatga oladi.

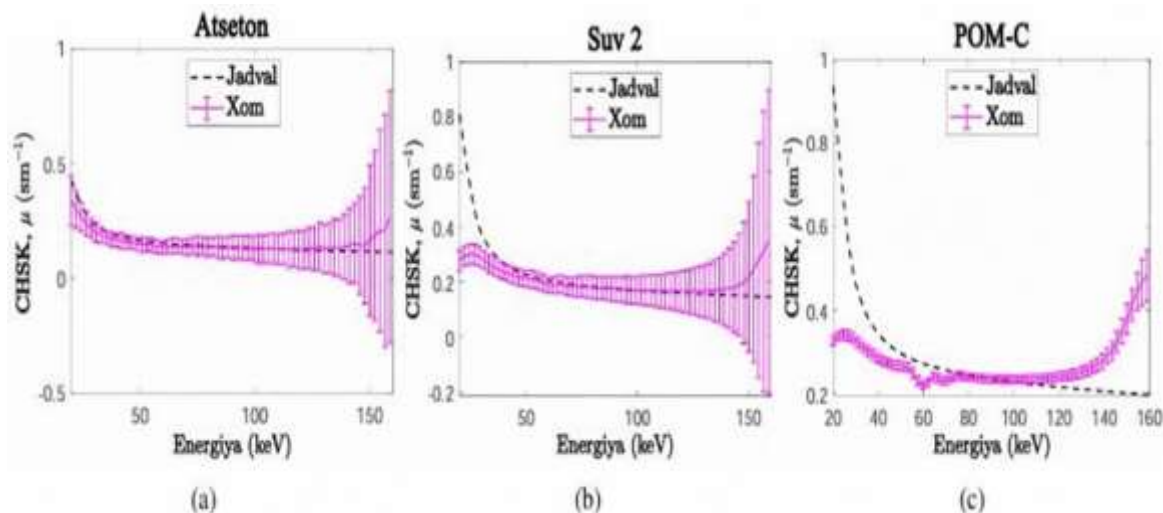
- Zaryad almashinuvi rentgen fotoni piksel chegarasiga yaqin kirganda elektron zaryad bulutini hosil qiladi, bu ikki qo'shni piksel o'rtasida taqsimlanadi. Natijada foton noto'g'ri ravishda ikkita past energiyali foton sifatida hisoblanadi.

- Vazn potentsiali (WP) o'zaro ta'siri bitta piksel-anod zaryadini keyingi anodda ham signal hosil qilishiga olib keladi va spektral javobning past energiya mintaqasida oshishini keltirib chiqaradi.

- Bundan tashqari, Kompton tarqalishi va elektron shovqin kabi oqimdan mustaqil jarayonlar ham fonni kuchaytiradi.

- Foton to'planishi ikki foton bir xil pikselga vaqt jihatdan yaqin tushganda yuzaga keladi va impulslarning bir-biriga qo'shilishiga sabab bo'ladi.

Bu hodisalar foton hisoblagich detektorlarining energiya ajratish qobiliyatini pasaytiradi. Piksel o'lchami oshgani sari chegara effektlari (zaryad almashinuvi va K-qochish) kamaysa-da, foton to'planishi kuchayishi mumkin.



2-rasm spektral rentgen KT yordamida xom proyeksiya ma'lumotlaridan rekonstruksiya qilingan ko'p energiyali CHSK larni turli materiallar (atseton, suv 2 va POM-C) uchun ko'rsatadi. Xom CHSK lar jadval qiymatlaridan (NIST [29]) sezilarli farq qiladi, ayniqsa energiya spektrining past va yuqori uchlarida. Past energiyalarda CHSK lar juda past baholanadi, yuqori energiyalarda esa standart og'ishlar kuchayadi. Bu buzilishlar detektordagi zaryad almashinuvi, foton to'planishi va K-qochish kabi fizikaviy effektlar natijasidir.

Shuning uchun ushbu maqolaning asosiy maqsadi bir nechta energiya kanallaridagi buzilgan xom CHSK larni proyeksiya domenida tuzatish usulini taklif etishdan iborat. Taklif etilayotgan usul detektorning spektral javobini kalibrlash uchun ma'lumotlarni parametrlashtirishga asoslanadi va har bir energiya kanali uchun ikkita tuzatish parametri qo'llaydi. Usul turli pikseli, ko'p energiyali CdTe detektorlari ishlatiladigan har qanday ko'p energiyali rentgen KT tizimi bilan mos keladi, hisoblash jihatdan samarali va past energiya diapazonida yaxshi ishlaydi. Oldingi ishlarimizda FSD javobidagi spektral buzilishlarni tuzatish materiallarni tasniflash aniqligini sezilarli

darajada oshirishini ko'rsatgan [30]. Rekonstruksiyadan keyingi domenida tuzatish usuli [31] esa tasvirni aniq segmentlashni talab qiladi, bu murakkab materiallar uchun qiyin. Aksincha, hozirgi usul to'g'ridan-to'g'ri proyeksiya domenida ishlaydi va geterojen materiallar uchun ham umumiy qo'llanilishi mumkin.

Materiallar va usullar. Tajribalar Daniyadagi DTU 3D tasvirlash markazida o'tkazildi. Mikro-fokusli Hamamatsu rentgen manbai (model L12161-07) ishlatildi. Kuchlanish 150 kV, oqim 0,5 mA, fokus o'lchami 75 μm edi. Detektor diapazonidan past energiyali fotonlarni to'sish uchun manba oldiga 2 mm qalinlikdagi alyuminiy filtr o'rnatildi. Nurlanish fan shakliga keltirildi. Detektorda 5 mm qalinlikdagi volfram karbid pichoqlar foton tarqalishini va fluoresentsiyani sezilarli darajada kamaytirdi. Namunalar aylantiruvchi platformada 360° to'liq aylanishda skan qilindi. Manbadan detektorgacha masofa 1150 mm, namunagacha 575 mm edi. Ushbu tadqiqotda Detection Technology MultiX ME-100 v21 bir o'lchovli foton hisoblagich detektor (CdTe sensori, 3 mm qalinlik) qo'llanildi. Detektor 640 pikseldan ($0,8 \times 0,8 \text{ mm}^2$) iborat bo'lib, umumiy uzunligi 512 mm ni tashkil etdi. Magnifikatsiya koeffitsienti 2 ga teng bo'lganligi uchun ko'rish maydoni (FOV) 256 mm edi. Fotonlar 20–160 keV oralig'ida 128 ta energiya kanali (har biri 1,1 keV kenglikda) ga taqsimlandi. Detektor energiya ajratish qobiliyati 6,5 % (122 keV da 8 keV) ni tashkil etdi. Tajribada tekis maydon oqimi 1,23 Mcps/s/mm² bo'ldi. Har bir proyeksiya uchun 100 ms integratsiya vaqti bilan 8 soniya umumiy ekspozitsiya qo'llanildi.

Materiallar. 1-jadval taklif etilayotgan tuzatish usulining kalibrlash bosqichida ishlatilgan materiallarni, 2-jadval esa sinov materiallarini ko'rsatadi. Materiallarning zichligi (ρ) eksperimental aniqlangan yoki PubChem bazasidan olingan. Elektron zichlik (ρ_e) va samarali atom raqami (Z_{eff}) x-ray susaytirishiga ta'sir etuvchi asosiy parametrlar hisoblanadi.

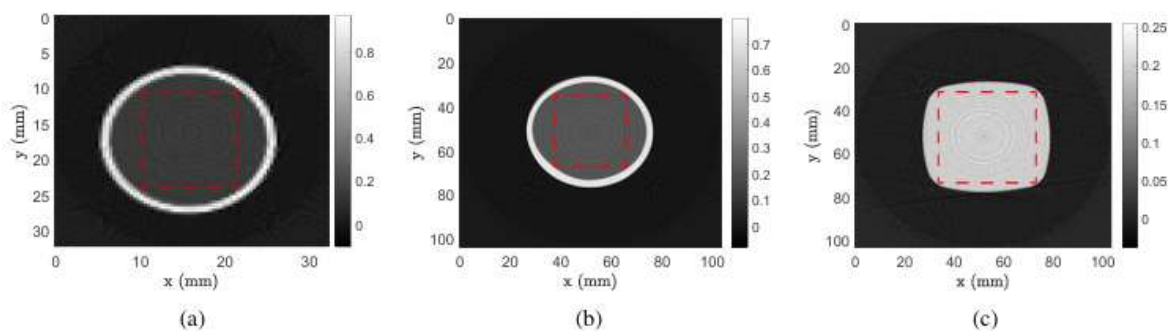
1-jadval. Kalibrlash materiallari ro'yxati

Indeks	Material	Kimyoviy formula	Kenglik×uzunlik / Diametr (mm)	ρ (g/sm ³)	ρ_e (e ⁻ mol/sm ³)	Z_{eff}
1	Grafit	C	12,7	1,8	0,899	6
2	Etilendiamin	C ₂ H ₈ N ₂	67	0,90	0,509	6,14
3	N,N-Dimetilgidrazin	C ₂ H ₈ N ₂	67	0,791	0,447	6,14
4	2-Butanon	C ₄ H ₈ O	83	0,805	0,447	6,29
5	Atseton	C ₃ H ₆ O	20	0,785	0,432	6,44
6	Atseton 2	C ₃ H ₆ O	54	0,785	0,432	6,44
7	Etanol 96%	C ₂ H ₆ O (96%)	67×67	0,798	0,450	6,58
8	PMMA	(C ₅ O ₂ H ₈) _n	40×42	1,18	0,636	6,60
9	Metanol	CH ₃ OH	20	0,792	0,446	6,86
10	POM	(CH ₂ O) _n	12,7	1,42	0,757	7,07
11	POM-H	(CH ₂ O) _n	15,5×53,3	1,43	0,763	7,07

Indeks	Material	Kimyoviy formula	Kenglik×uzunlik / Diametr (mm)	ρ (g/sm ³)	ρ_e (e ⁻ mol/sm ³)	Z_{eff}
12	Gidrazin eritmasi	H ₄ N ₂ (35%)	54	1,0	0,561	7,24
13	Nitrometan	CH ₃ NO ₂	20	1,14	0,597	7,27
14	Suv	H ₂ O	20	0,997	0,554	7,54
15	Suv 3	H ₂ O	12,7	0,997	0,554	7,54
16	Vodorod peroksidi 2	H ₂ O ₂ (50%)	73×74	1,22	0,661	7,65
17	Azot kislota	HNO ₃ (65%)	83	1,39	0,714	7,67

2-jadval. Sinov materiallari ro'yxati

Indeks	Material	Kimyoviy formula	Kenglik×uzunlik / Diametr (mm)	ρ (g/sm ³)	ρ_e (e ⁻ mol/sm ³)	Z_{eff}
1	Grafit 2	C	50	1,7	0,849	6
2	Polikarbonat (PC)	(CO ₃ C ₁₃ H ₈) _n	8,2×53,5	1,18	0,610	6,48
3	Nitrobenzen	C ₆ H ₅ NO ₂	49	1,20	0,624	6,68
4	PET	(C ₁₀ H ₈ O ₄) _n	9×53,5	1,39	0,721	6,74
5	Metanol 2	CH ₃ OH	81	0,792	0,446	6,86
6	POM-C	(CH ₂ O) _n	9×53,5	1,41	0,753	7,07
7	Etanol 40%	C ₂ H ₆ O (40%)	67×67	0,947	0,532	7,19
8	Suv 2	H ₂ O	51×51	0,997	0,554	7,54
9	Vodorod peroksidi	H ₂ O ₂ (50%)	20	1,22	0,661	7,65

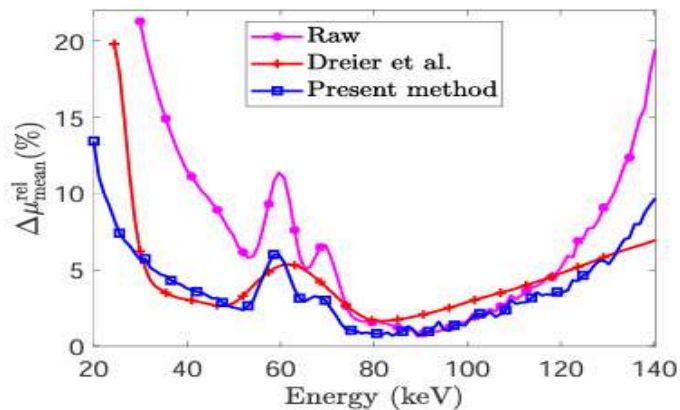


3-rasm.

Uchta tajriba namunalarining rekonstruksiya qilingan tasvirlari (alohida skan qilingan materiallar): (a) atseton, (b) nitrobenzen va (c) suv 2. Masshtab birligi — CHSK (sm⁻¹). Qizil nuqtali chiziqlar har bir material uchun belgilangan qiziqish mintaqasini (ROI) ko'rsatadi. Namunalarning haqiqiy o'lchamlari millimetrda berilgan. Rekonstruksiyalar 60,8 keV energiyasiga mos keladi. Dreierning tuzatish algoritmi. Dreier va boshqalar [23] ishlab chiqqan usul detektorning simulyatsiya qilingan javob matritsasidan foydalanadi. Avval oqimdan mustaqil effektlar (zaryad almashinuvi,

fluoresentsiya, WP o'zaro ta'siri, Kompton tarqalishi va elektron shovqin) uchun teskari detektor javob matritsasi qo'llaniladi.

Asosiy tuzatish natijalari. 140.1 keV dan yuqori energiyalarda olingan xom CHSK qiymatlarida jadval qiymatlaridan katta og'ishlar va tasvir pikselari bo'ylab sezilarli standart og'ishlar mavjudligi sababli (2-rasmda ko'rsatilganidek), biz 140.1 keV dan yuqori energiya kanallarini hisob-kitoblardan chiqarib tashladik.



Rekonstruksiya qilingan CHSK qiymatlarining mos jadval qiymatlaridan o'rtacha nisbiy og'ishini ko'rsatadi. Ushbu og'ishlar tenglamalar yordamida baholangan energiya diapazoni bo'ylab hisoblab chiqildi va barcha sinov materiallari bo'yicha o'rtachalandi. Bu materiallar uchun xom va tuzatilgan CHSK qiymatlari keltirilgan. Mazkur taqqoslash quyidagi natijalarni o'z ichiga oladi: xom ma'lumotlar, Dreier va boshqalar usuli yordamida tuzatilgan CHSK qiymatlari hamda ushbu ishda taklif etilgan usul bilan tuzatilgan CHSK qiymatlari. Natijalarga ko'ra, xom CHSK qiymatlari umumiy hisobda eng katta og'ishlarni ko'rsatadi, bunda nisbiy xatoliklar past va yuqori energiya kanallarida 20% dan oshadi.

Xulosa. Ushbu ishda biz ko'p energiyali rentgen KT dan olingan xom LAC larni aniq tiklaydigan yangi usulni taqdim etdik. Taklif etilayotgan usul proyeksiya domenida ishlaydi, oldindan spektr yoki oqim haqida ma'lumot talab qilmaydi va past energiyalarda ayniqsa samarali. Usul hisoblash jihatdan samarali, ixcham va turli tizimlarga osongina moslashtiriladi. Dreier usuli bilan solishtirganda past energiyalarda (30 keV dan past) ancha aniq natija beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

[1] K. Taguchi, R. Ballabriga, M. Campbell, D. Darambara, Photon counting detector computed tomography, IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences 6 (2022) 1–4.

[2] G. Beldjoudi, V. Rebuffel, L. Verger, V. Kaftandjian, J. Rinkel, Multidimensional data processing methods for material discrimination using an ideal X-ray spectrometric photon counting detector, IEEE Transactions on Nuclear Science 58 (2011) 3190–3203.

[3] G. Beldjoudi, V. Rebuffel, L. Verger, V. Kaftandjian, J. Rinkel, An optimised method for material identification using a photon counting detector, Nuclear

Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 663 (2012) 26–36.

[4] P. M. Shikhaliev, Energy-resolved computed tomography: First experimental results, *Physics in Medicine and Biology* 53 (2008) 5595–5613.

[5] Y. Yuan, B. Tracey, E. Miller, Robust x-ray based material identification using multi-energy sinogram decomposition, *Anomaly Detection and Imaging with X-Rays (ADIX) 9847* (2016) 207–219.

[6] N. Kimoto, H. Hayashi, T. Asahara, Y. Kanazawa, T. Yamakawa, S. Yamamoto, M. Yamasaki, M. Okada, Development of a novel method based on a photon counting technique with the aim of precise material identification in clinical x-ray diagnosis, *Medical Imaging 2017: Physics of Medical Imaging 10132* (2017) 858–868.

[7] K. Taguchi, J. S. Iwanczyk, *Vision 20/20: Single photon counting x-ray detectors in medical imaging.*, *Medical physics* 40 (2013) 100901.

[8] N. G. Anderson, A. P. Butler, Clinical applications of spectral molecular imaging: Potential and challenges, *Contrast Media and Molecular Imaging* 9 (2014) 3–12.

[9] K. Taguchi, I. Blevis, K. Iniewski, *Spectral, photon counting computed tomography: technology and applications*, CRC Press, 2020.

[10] M. Danielsson, M. Persson, M. Sjölin, Photon-counting x-ray detectors for ct, *Physics in Medicine & Biology* 66 (2021) 03TR01.

[11] V.Rebuffel, J.Rinkel, J.Tabary, L.Verger, *New perspectives of X-ray techniques for explosive detection based on CdTe/CdZnTe spectrometric detectors*, in: *Proc. of the Int. Symp. on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography*, volume 2, 2011, pp. 1–8.

[12] M. Busi, K. A. Mohan, A. A. Dooraghi, K. M. Champley, H. E. Martz, U. L. Olsen, Method for system-independent material characterization from spectral X-ray CT, *NDT & E International* 107 (2019) 102136.

[13] D. Jumanazarov, J. Koo, M. Busi, H. F. Poulsen, U. L. Olsen, M. Iovea, System-independent material classification through X-ray attenuation decomposition from spectral X-ray CT, *NDT and E International* 116 (2020) 102336.

[14] D. Jumanazarov, A. Alimova, A. Abdikarimov, J. Koo, H. F. Poulsen, U. L. Olsen, M. Iovea, Material classification using basis material decomposition from spectral x-ray ct, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1056 (2023) 168637.

[15] D. Jumanazarov, A. Alimova, S. K. Ismoilov, F. Atamurotov, A. Abdikarimov, U. L. Olsen, Method for the determination of electron density from multi-energy x-ray ct, *NDT and E International* 145 (2024).

[16] D. Jumanazarov, J. Koo, J. Kehres, H. F. Poulsen, U. L. Olsen, M. Iovea, Material classification from sparse spectral x-ray ct using vectorial total variation based on l infinity norm, *Materials Characterization* 187 (2022).