

Семинар ИКИ РАН по механике, управлению и информатике

Эффективный атомный номер и массовые
коэффициенты ослабления для непрерывных
спектров в двухэнергетических рентгенографии и
рентгеноскопии (ДЭР)

В.А. Горшков

2016

Аннотация

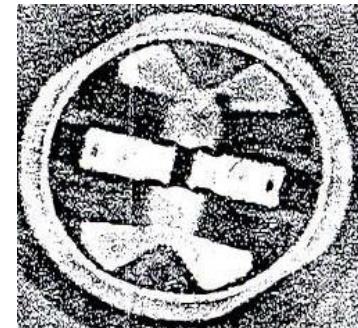
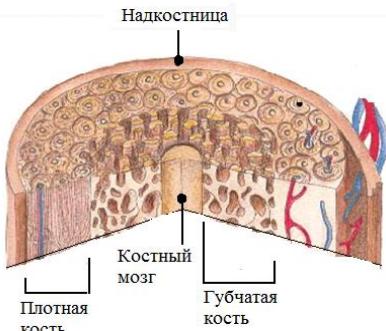
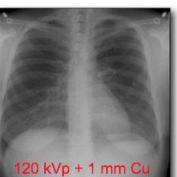
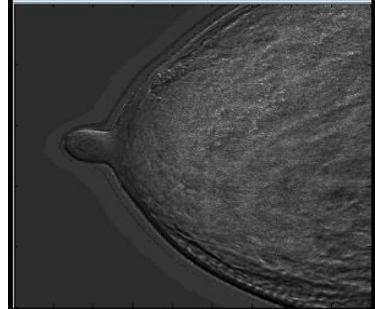
Рассматриваются области применения двухэнергетических рентгенографии и рентгеноскопии (ДЭР) в медицине (маммография, остеоденситометрия, пульманология), нефтяной и горной отраслях, в таможенном контроле и пр.

Определение эффективного атомного номера крайне важно в плотнотрии многокомпонентных объектов. В докладе показано, что для непрерывных спектров рентгеновского излучения понятия массового коэффициента поглощения сложного вещества и его эффективного атомного номера может быть введено только для бесконечно тонких объектов. Массовый коэффициент ослабления, определяемый по доли зарегистрированного излучения, неоднородного объекта конечной толщины зависит от плотности и толщины объекта. Однако это противоречит физическому смыслу самого массового коэффициента поглощения, который не может зависеть от этих характеристик объекта. То же относится и к эффективному атомному номеру, определяемому двухэнергетическим методом.

Предложено введение понятия условного массового коэффициента поглощения бесконечно тонкого объекта, в котором распределение массовой концентрации компонентов эквивалентно их распределению в объекте конечной толщины. Показано, что значение условного коэффициента поглощения равно среднему его значению для конкретного спектра излучения. Приводится способ его расчета по значению математического ожидания энергии в спектре.

Рассматривается вопрос эффективности проведения двух- и полиэнергетической энергетической рентгеноскопии, позволяющей существенно повысить чувствительность метода к изменению эффективного атомного номера, а также проводить визуализацию распределений плотности и эффективного атомного номера в подвижных объектах.

Области применения ДЭР

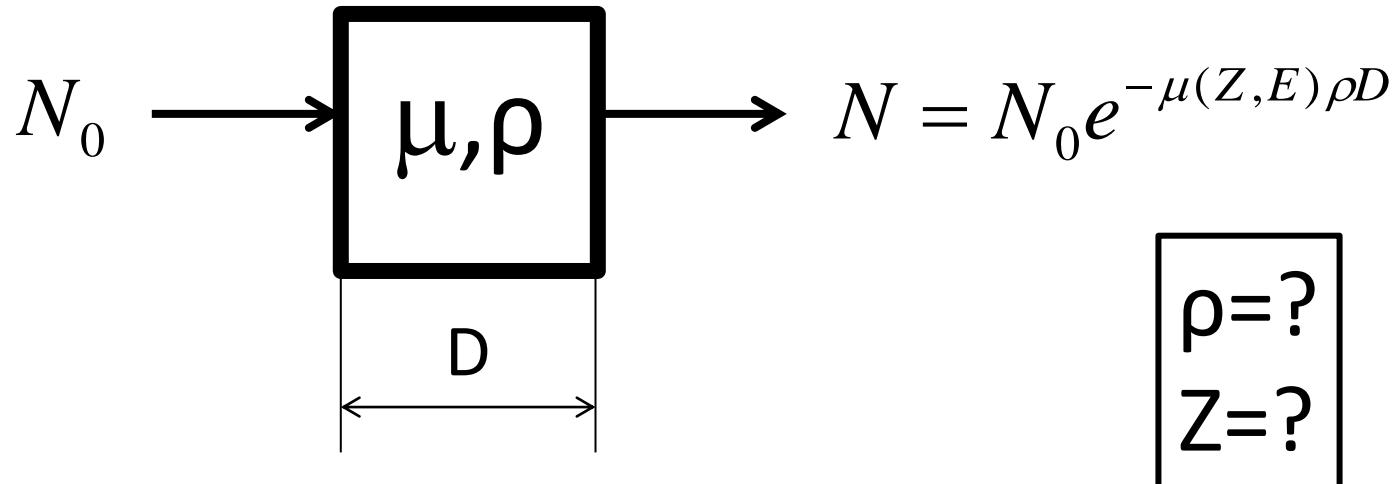


...



Задачи ДЭР

Объект



Монохроматический источник

$E = \text{const}$

Источник с непрерывным спектром

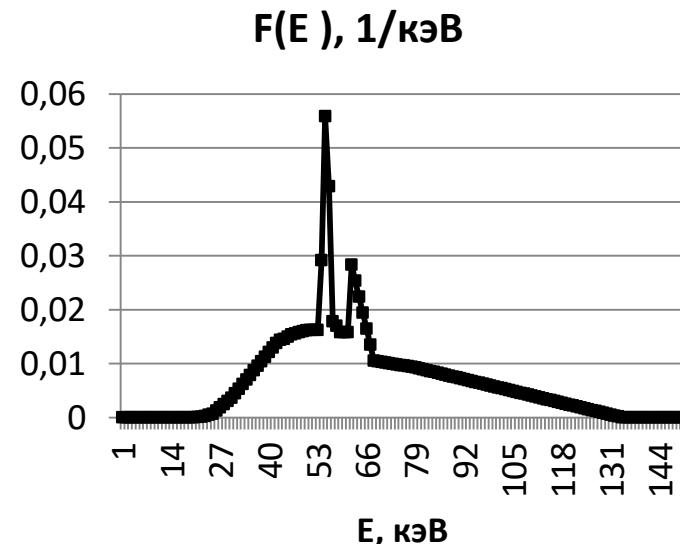


ТАБЛИЦА МЕНДЕЛЕЕВА. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА.

периоды		ряды		группы химических элементов												VIII												
I	1	H 1,00795 водород	1													2 He 4,002602 гелий												
II	2	Li 6,9412 литий	3	Be 9,01218 бериллий	4	B 10,812 бор	5	C 12,0108 углерод	6	N 14,0067 азот	7	O 15,9994 кислород	8	F 18,99840 фтор	9													
III	3	Na 22,98977 натрий	11	Mg 24,305 магний	12	Al 26,98154 алюминий	13	Si 28,086 кремний	14	P 30,97376 фосфор	15	S 32,06 серпа	16	Cl 35,453 хлор	17													
IV	4	K 39,0983 калий	19	Ca 40,08 кальций	20	Sc 44,9559 скандий	21	Ti 47,90 титан	22	V 50,9415 ванадий	23	Cr 51,996 хром	24	Mn 54,9380 марганец	25	Fe 55,847 железо	26	Co 58,9332 cobальт	27	Ni 58,70 никель								
		Cu 63,546 медь	29	Zn 65,38 цинк	30	Ga 69,72 галлий	31	Ge 72,59 германий	32	As 74,9216 мышьяк	33	Se 78,96 селен	34	Br 79,904 бром	35													
V	5	Rb 85,4678 рубидий	37	Sr 87,62 стронций	38	Y 88,9059 иттрий	39	Zr 91,22 цирконий	40	Nb 92,9064 ниобий	41	Mo 95,94 молибден	42	Tc 98,9062 технеций	43	Ru 101,07 рутений	44	Rh 102,9055 родий	45	Pd 106,4 палладий								
		Ag 107,868 серебро	47	Cd 112,41 кадмий	48	In 114,82 индий	49	Sn 118,69 олово	50	Sb 121,75 сульфур	51	Te 127,60 теллур	52	I 126,9045 иод	53													
VI	6	Cs 132,9054 цезий	55	Ba 137,33 барий	56	La 138,9 лантан	57	Hf 178,49 гафний	72	Ta 180,9479 тантал	73	W 183,85 вольфрам	74	Re 186,207 рений	75	Os 190,2 осмий	76	Ir 192,22 иридий	77	Pt 195,09 платина								
		Au 196,9665 золото	79	Hg 200,59 ртуть	80	Tl 204,37 тальций	81	Pb 207,2 свинец	82	Bi 208,9 висмут	83	Po 209 полоний	84	At 210 астат	85													
VII	7	Fr 223 франций	87	Ra 226,0 радий	88	Ac 227 актиний	89	Rf 261 резерфордий	104	Db 262 дубний	105	Sg 266 сиборгий	106	Bh 269 борий	107	Hs 269 хассий	108	Mt 268 мейтнерий	109	Ds 271 дармштадтий								
		Rg 272 рентгений	111	Cn 285 коперниций	112			113	Fl 289 флеровий	114			115	Lv ливерморий	116			117										
58		Pr 140,9 празеодим	59	Nd 144,2 неодим	60	Pm 145 прометий	61	Sm 150,4 самарий	62	Eu 151,9 европий	63	Gd 157,3 гадолиний	64	Tb 158,9 тербий	65	Dy 162,5 диспрозий	66	No 164,9 гольмий	67	Er 167,3 эрбий	68	Tm 168,9 тулий	69	Yb 173,0 иттербий	70	Lu 174,9 лютеций		
90		Th 232,0 торий	91	Pa 231,0 протактиний	92	U 238,0 уран	93	Np 237 неptуний	94	Pu 244 плутоний	95	Am 243 америй	96	Cm 247 карий	97	Bk 247 берклий	98	Cf 251 калифорний	99	Es 252 эйнштейний	100	Fm 257 ферний	101	Md 258 мэнделевий	102	No 259 нобелевий	103	Lr 262 лоренгий

Традиционная плотнometрия

Монохроматический источник

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\mu_c(Z, E) \rho_a D}$$

где N_0 - исходное число фотонов,
 N - число зарегистрированный фотонов.

Массовый коэффициент поглощения многокомпонентного объекта

$$\mu_c(Z, E) = \sum \mu_i(Z, E) c_i$$

Средняя плотность определяется на основе тарировочных кривых

$$\rho_a = \frac{1}{D} \frac{\ln \frac{N_0}{N}}{\mu_c(Z, E)}$$

Источник с непрерывным спектром

$$\frac{N}{N_0} = \sum_{i=1}^k f_i e^{-\mu_c(E_i) \rho_a D} \Delta E$$

где i – номер канала
энергетического спектра,
 f_i - дискретная функция плотности
распределения энергии источника
 ΔE – величина шага энергии спектра.

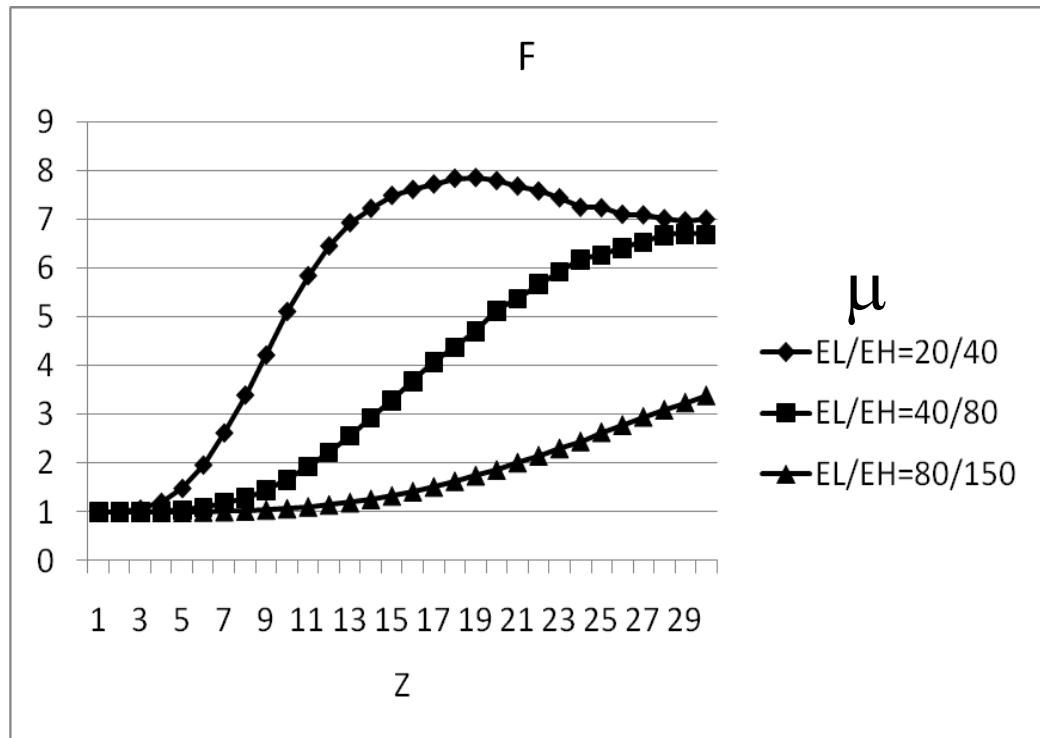
При вариации химического состава
(при вариации массового коэффициента
поглощения) имеем **ОДНО** уравнение и
ДВЕ неизвестных характеристики

$$\rho_a, \mu_c(Z, E)$$

Двухэнергетическая плотнometрия

В основе метода лежит зависимость отношения массовых коэффициентов поглощения на низкой и высокой энергиях от атомного номера элемента

$$F(Z) = \frac{\mu^L(Z)}{\mu^H(Z)}$$



Зависимость $F(Z)$ распространяют и на дробные значения (эффективным атомный номер)

$$Z_{eff} = F^{-1} \left(\frac{\mu_c(Z, E_L)}{\mu_c(Z, E_H)} \right)$$

Визуализация трехкомпонентной структуры

US 6857640 B2, 2002

$$\begin{pmatrix} \mu_{1m} & \mu_{1g} & \mu_{1os} \\ \mu_{2m} & \mu_{2g} & \mu_{2os} \\ 1/\rho_m & 1/\rho_g & 1/\rho_{os} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho_m d_m \\ \rho_g d_g \\ \rho_{os} d_{os} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ln(N_0^L/N_L) \\ \ln(N_0^H/N_H) \\ D \end{pmatrix}$$

где M_m, M_g, M_{os}

- масса материала на единицу площади, г/см²
m, g, os – индексы, соответствующие мышечной, жировой и костной тканям

Систематические смещения в численной оценке плотности делительным алгоритмом

Наличие систематической смещения в оценке плотности отмечено в работах:

[Torikoshi, M.](#) [Ohno, Y.](#) [Endo](#), [A. Pietrobelli](#), [C. Formica](#), [Z. Wang](#), [S. B. Heymsfield](#), [Z. Wang](#) и др.

US 20130028371, 2012

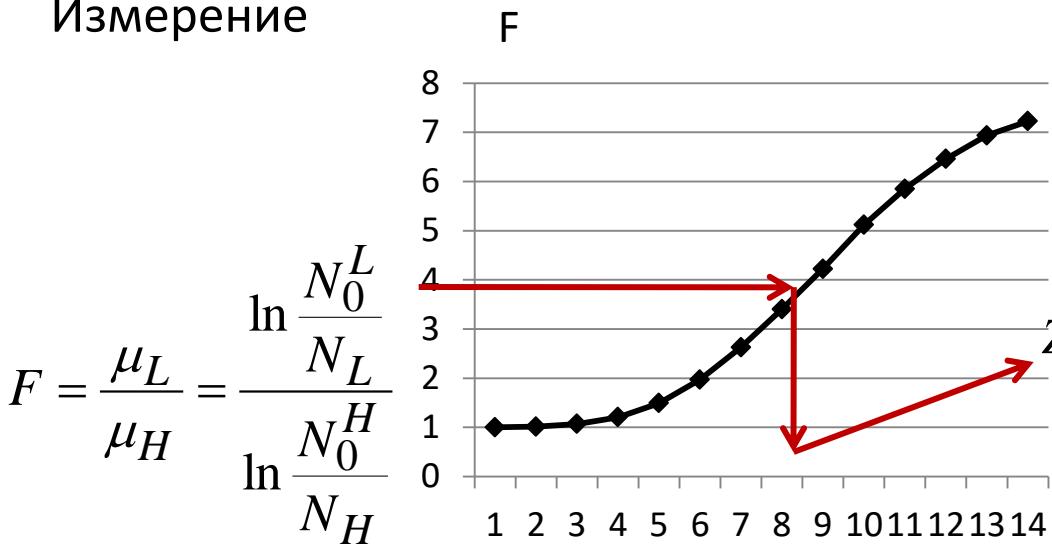
$$\epsilon = aZ + b$$

Систематическая погрешность определяется на фантоме с известными плотности и эффективного атомного номера

Двухэнергетический способ оценки плотности для монохроматических источников

$E_L = 20$ кэВ, $E_H = 40$ кэВ

Измерение



Реконструкция

$$\mu_L(Z_{eff})$$

Z_{eff}

$$\rho_L = \frac{1}{D} \frac{\ln \frac{N_0^L}{N_L}}{\mu_L(Z_{eff})}$$

$$\rho_H = \frac{1}{D} \frac{\ln \frac{N_0^H}{N_L}}{\mu_H(Z_{eff})}$$

Для многокомпонентных сред: $\rho_L \neq \rho_H$ и $Z_{L,eff} \neq Z_{H,eff}$

Для однокомпонентных сред $\rho_L = \rho_H$ и $Z_{L,eff} = Z_{H,eff}$

Особенности расчета эффективного атомного номера

Эффективный атомный номер многокомпонентного объекта, это номер, соответствующий которому массовый коэффициент ослабления равен массовому коэффициенту ослабления, вызывающему аналогичное ослабления излучения.

$$Z_{eff} = \sqrt[n]{Z_i^n q_i}$$

$$n = 2,94$$

$$n = 3 - 4$$

$$Z_{eff} = \sqrt[3]{Z_i^4 p_i}$$

Glasser, O.

F. Spiers , J. Brit . C. Murty,

Prasad S., ...

Parthasaradhi K., Bloomer W.

Hine, Nucleonics ...

$$Z_{eff, H2O} = \sqrt[2,94]{0,2 \times 1^{2,92} + 0,8 \times 8^{2,92}} = 7,42$$

Taylor, M. L., Franich, R. D.,

Nature. 2007;27:398–399.

Trapp, J. V., Johnston, P. N. (2012)

$$\mu_c = \sum \mu_i C_i = \mu(Z_{eff}) = \mu(\sqrt[n]{Z_i^n q_i}) \quad n = ?$$

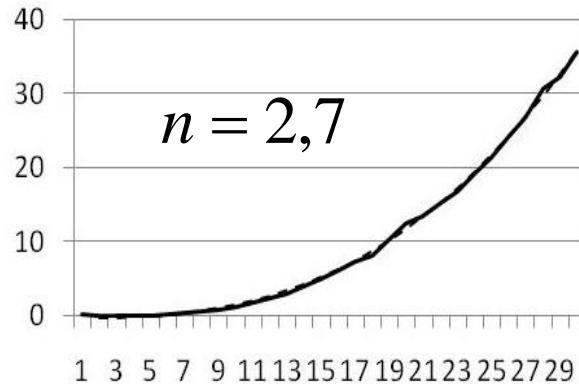
Особенности расчета эффективного атомного номера

$$\mu = bZ^n + a$$

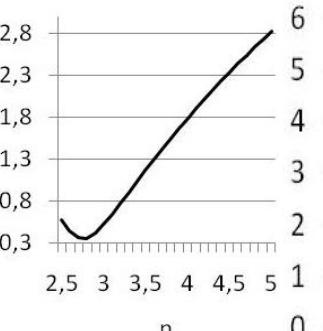
$$bZ_{eff}^n + a = \sum (bZ_i^n + a)c_i$$

$$Z_{eff} = \sqrt[n]{\sum Z_i^n c_i}$$

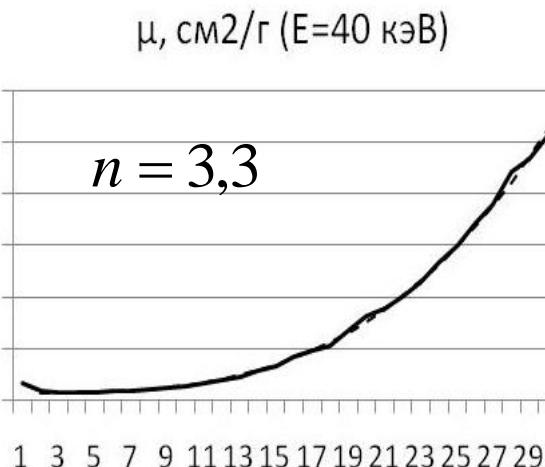
$\mu, \text{ см}^2/\text{г} (E=20 \text{ кэВ})$



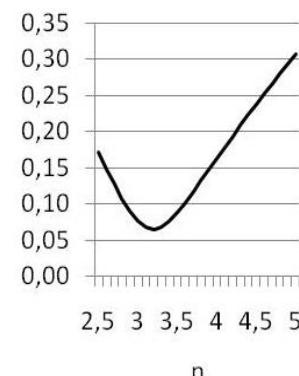
$\sigma_\mu, \text{ см}^2/\text{г} (E=20 \text{ кэВ})$



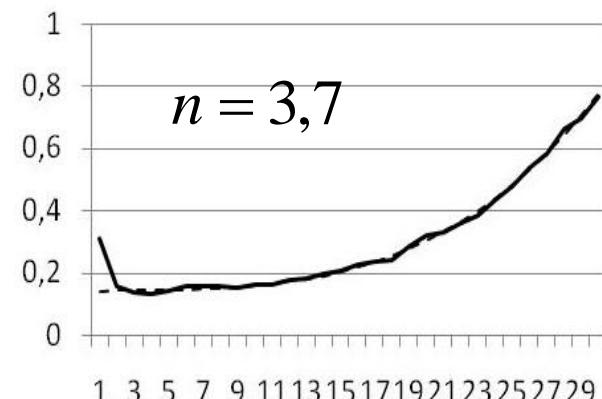
$\mu, \text{ см}^2/\text{г} (E=40 \text{ кэВ})$



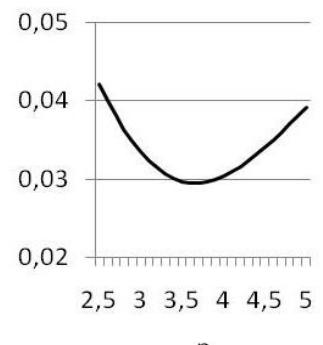
$\sigma_\mu, \text{ см}^2/\text{г} (E=40 \text{ кэВ})$



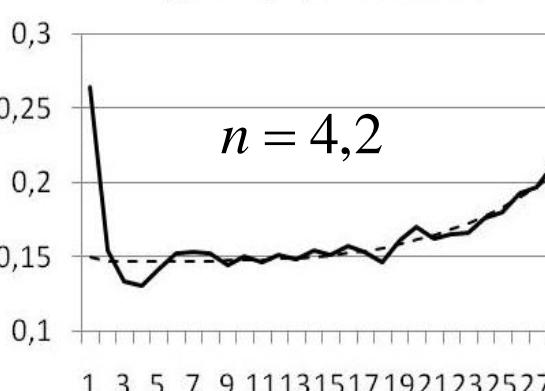
$\mu, \text{ см}^2/\text{г} (E=80 \text{ кэВ})$



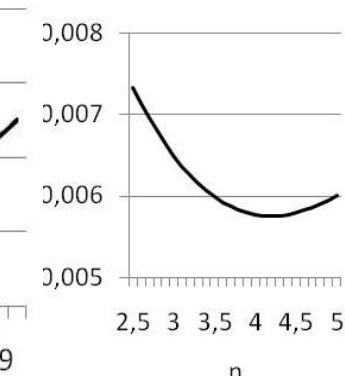
$\sigma_\mu, \text{ см}^2/\text{г} (E=80 \text{ кэВ})$



$\mu, \text{ см}^2/\text{г} (E=150 \text{ кэВ})$



$\sigma_\mu, \text{ см}^2/\text{г} (E=150 \text{ кэВ})$



$n = f(E)$

AutoZeff Taylor, M. L

Как определить массовый коэффициент ослабления многокомпонентного объекта для непрерывного спектра ?

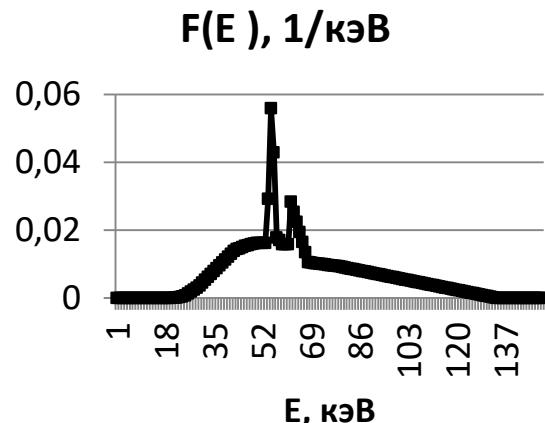
Казалось бы по формуле $\mu_c \rho_a d = \ln \frac{N}{N_0}$

Но тогда массовый коэффициент ослабления зависит от средней плотности и толщины

$$\mu_c = -\frac{1}{\rho_a D} \ln \sum_{E=E_{\min}}^{E=E_{\max}} f(E) e^{-\mu_c(E) \rho_a D} \Delta E ,$$

что противоречит физическому смыслу массового коэффициента ослабления который определяется только Z и энергией

Только для моноэнергетических источников массовый коэффициент ослабления не зависит от плотности и толщины объекта



$$\mu_c = \frac{\mu_c(E) \rho_a D}{\rho_a D}$$

Подход Б.Хайсманна для плотнотрии бесконечно тонких жидкых объектов

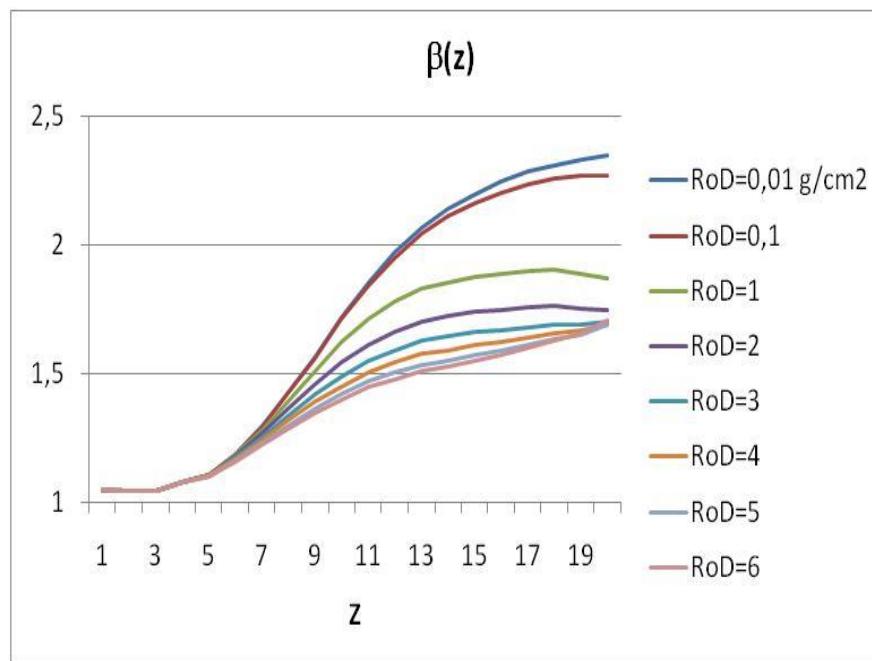
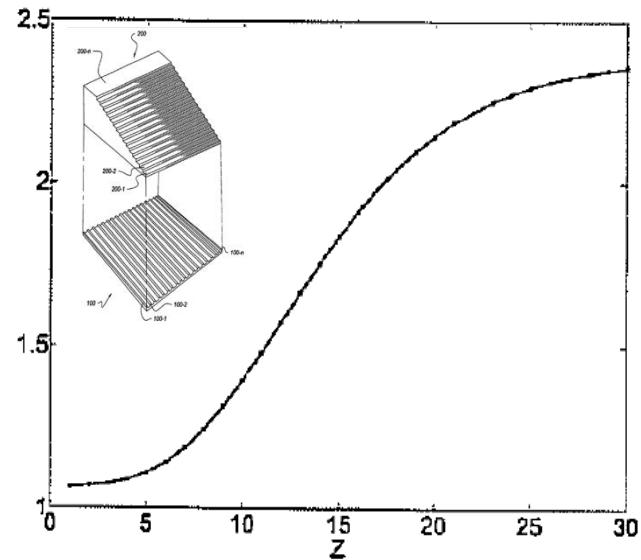
B. Heismann

$$\mu = \lim_{d \rightarrow 0} \left[-\frac{1}{d} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) \right] = \lim_{d \rightarrow 0} \left[-\frac{1}{d} \ln \left(\frac{\int S(E)D(E)e^{-\kappa(E)d}dE}{\int S(E)D(E)dE} \right) \right]$$

Где в обозначениях оригинала произведение $S(E)D(E)$ функция плотности распределения энергии источника, $\kappa(E)$ – массовый коэффициент ослабления

$$Z = F^{-1} \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \right)$$

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{\ln \frac{N_0^L}{N_L}}{\ln \frac{N_0^H}{N_H}}$$



$$N \approx N_0$$

$$N^H$$

$$\ln \frac{N_0}{N_H} \approx 0$$

Эффективный массовый коэффициент ослабления объекта с бесконечно малым $\rho_a D$

$$\rho_a D \rightarrow 0$$

$$\mu_c^{usl} = - \lim_{\rho_a D \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_{E=E_{\min}}^{E=E_{\max}} f(E) e^{-\mu_c(E) \rho_a D} \Delta E}{\rho_a D} = \sum_{E=E_{\min}}^{E=E_{\max}} (\mu_c(E)) f(E) \Delta E = \overline{\mu_c(E)}$$

Т.е. условный массовый коэффициент ослабления многокомпонентного объекта равен среднему массовому коэффициенту для заданного спектра излучения.

Эффективный условный массовый коэффициент ослабления многокомпонентного объекта для источника с непрерывным спектром

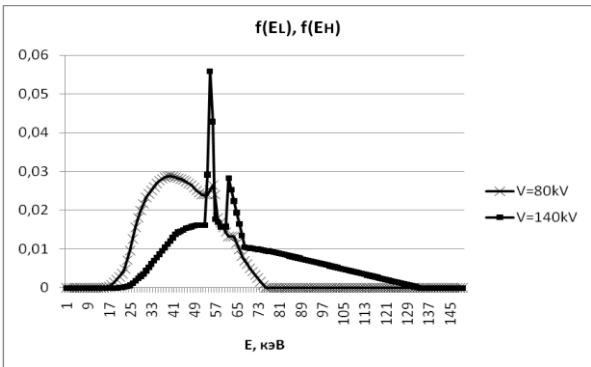
$$\overline{\mu_c^{usl}}(f(E)) = \sum \overline{\mu_i}(f(E)) c_i$$

Но средний массовый коэффициент ослабления не равен значению его функции от средней энергии

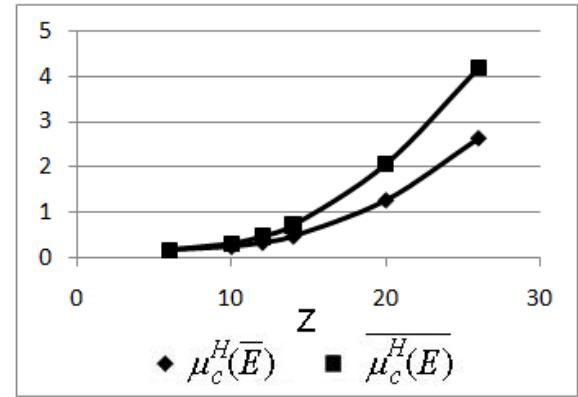
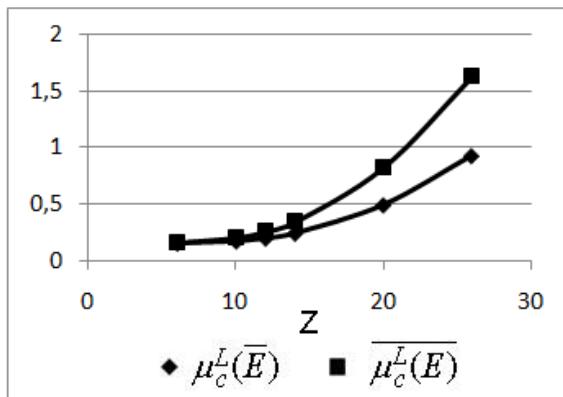
$$\overline{\mu_c(E)} \neq \mu_c(\overline{E})$$

Условный массовый коэффициент поглощения бесконечно тонкого объекта

Функции плотности распределения энергии (спектры)

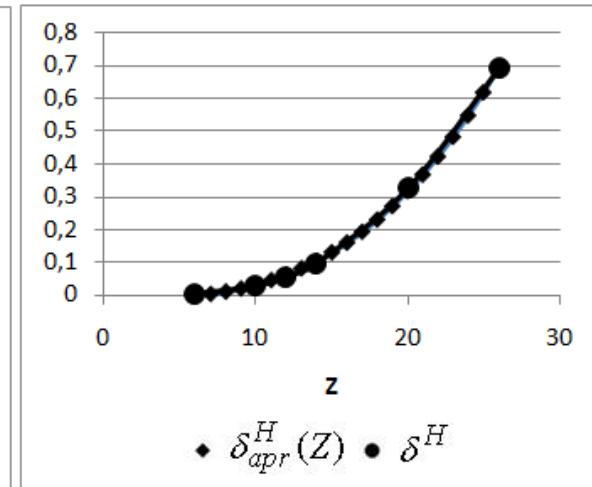
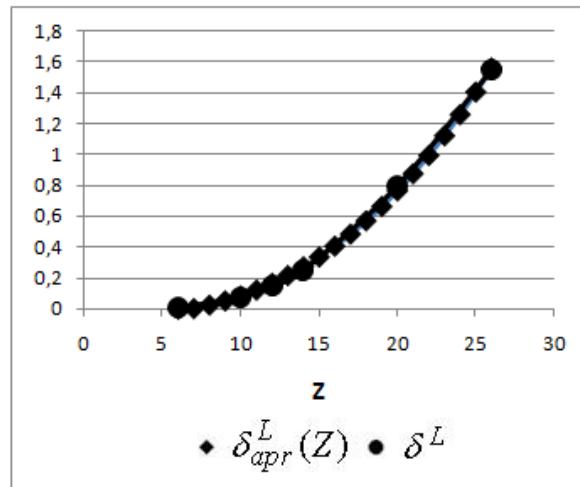


Зависимости условных массовых коэффициентов поглощения от массового поглощения для средней энергии



Аппроксимация погрешности

$$\delta_{apr}^L(Z) = 0,00035 \cdot Z^{2,59} - 0,0494$$



$$\delta_{apr}^H(Z) = 0,000054 \cdot Z^{2,91} - 0,0131$$

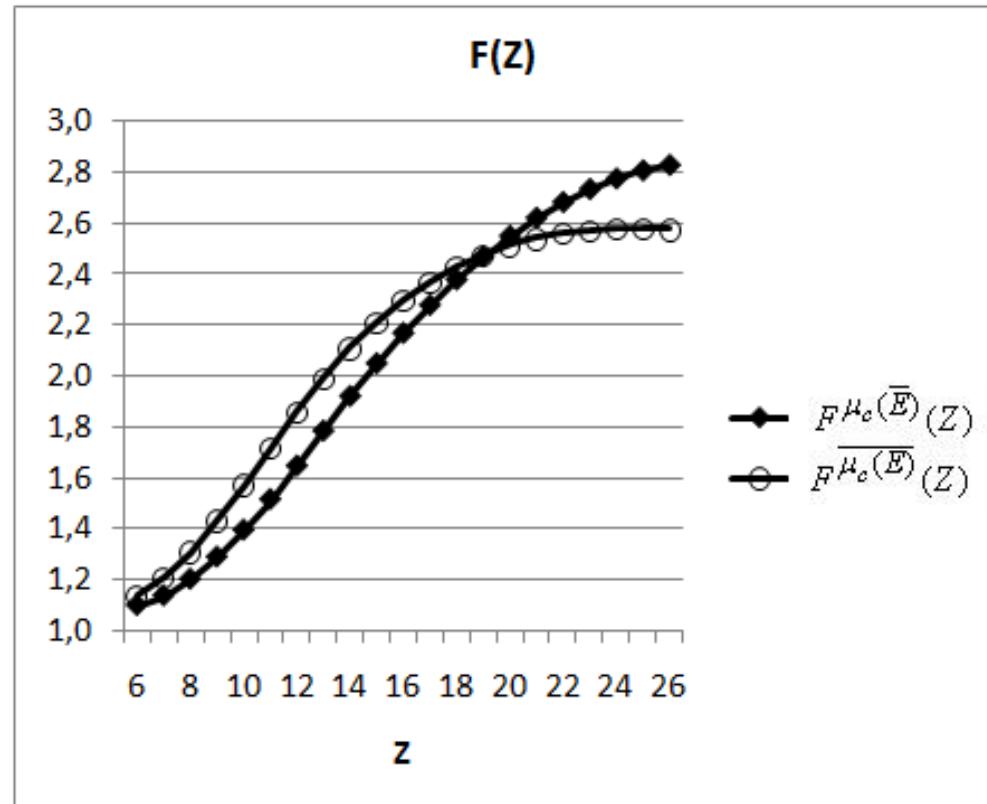
Зависимости отношения массовых коэффициентов ослабления от Z

Принципиальным отличием $\mu_c(\bar{E})$ от $\overline{\mu_c(E)}$

является различие зависимостей их отношения для низкоэнергетического и высокоэнергетического спектров

$$F^{\mu_c(\bar{E})}(Z) = \frac{\mu_c^L(\bar{E})}{\mu_c^H(\bar{E})}$$

$$F^{\overline{\mu_c(E)}}(Z) = \frac{\overline{\mu_c^L(E)}}{\overline{\mu_c^H(E)}}$$



Расчет $\overline{\mu_c(E)}$ и $Z_{\overline{\mu_c(E)}}$

На практике ни средний массовый коэффициент ослабления, ни тем более его значение как функция от средней энергии неизвестны. **Доступно лишь измерение отношения логарифмов**

$$\beta(Z) = \frac{\ln \frac{N_0^L}{N^L}}{\ln \frac{N_0^H}{N^H}} = \frac{\ln \sum_{E_{\min}^L}^{E_{\max}^L} f_i^L e^{-\mu_c^L(E_i) \rho_a D} \Delta E}{\ln \sum_{E_{\min}^H}^{E_{\max}^H} f_i^H e^{-\mu_c^H(E_i) \rho_a D} \Delta E}$$

$$Z_\beta = F^{\mu_c(\overline{E})^{-1}}(\beta)$$

Но $Z\beta$ зависит от средней плотности и толщины

Смещение

$$\Delta Z = Z_\beta - Z_{F(\overline{E})}$$

может быть оценено на эталонных образцах либо расчетным путем

По полученному $Z_{F(\overline{E})}$ вычисляются $\mu_c(\overline{E})$, $\mu_c(E)$ и $Z_{\overline{\mu_c(E)}}$

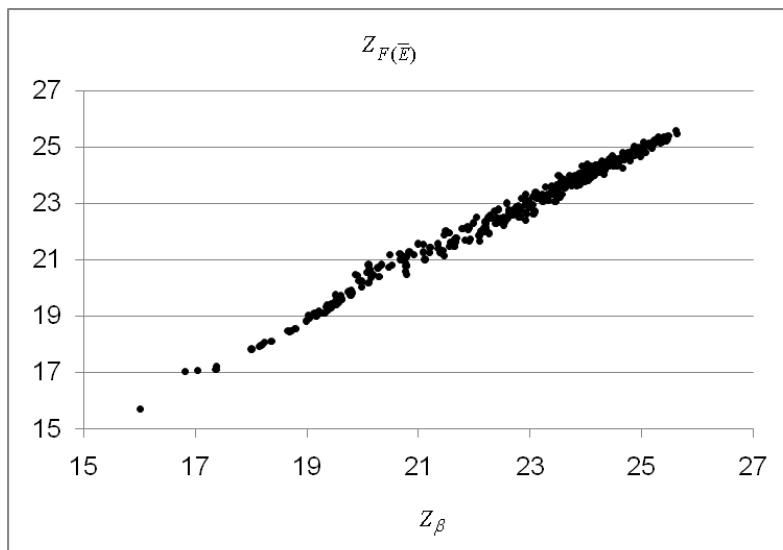
Неизвестное значение Z , не зависящее от плотности и толщины

$$Z_{F(\overline{E})} = F^{\mu_c(\overline{E})^{-1}} \left(\frac{\mu_c^L(\overline{E})}{\mu_c^H(\overline{E})} \right)$$

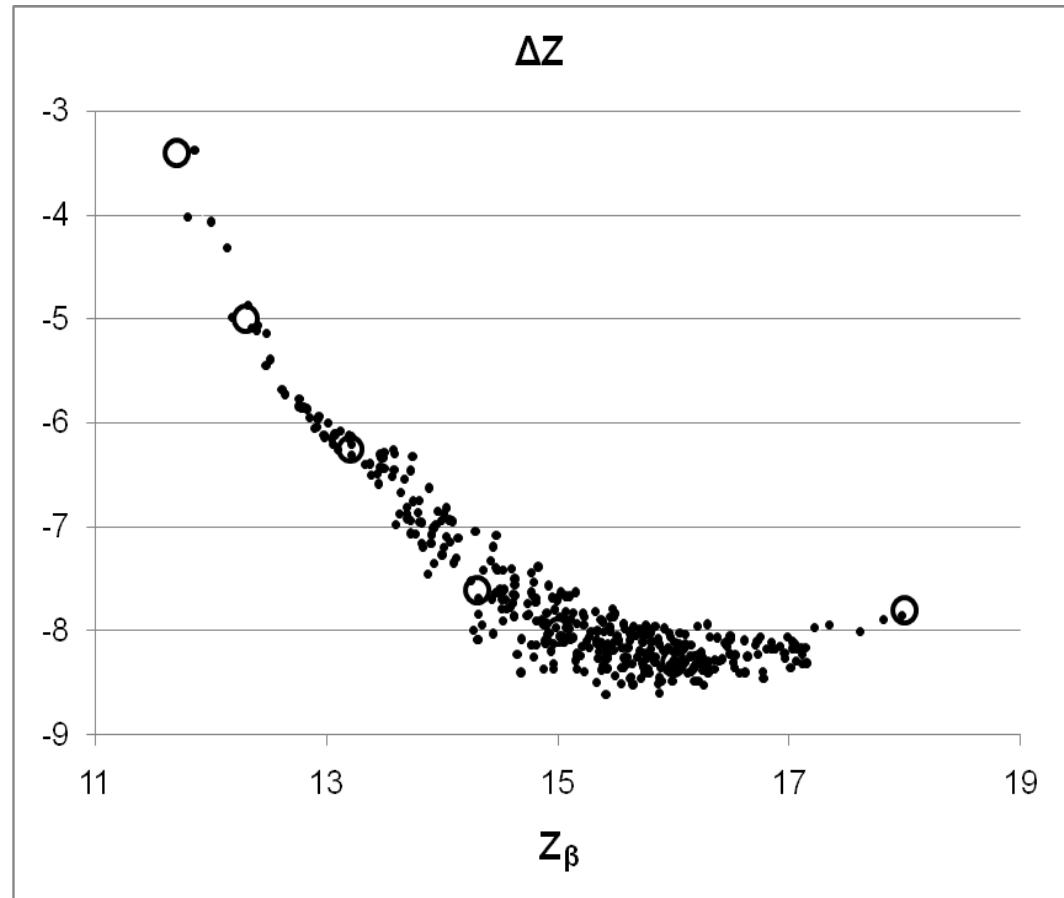
Моделируемый 4-х слойный эталонный объект

№ слоя	Z_i	$\rho_i, \text{г/см}^3$	D_i
1	6	0,5...1,5	0,1...3,9
2	10	1,0...2,0	0,1...3,9
3	20	2,0...4,0	0,1...3,9
4	26	6,0...7,8	0,1...3,9

Несмешенная оценка $Z_{F(\bar{E})}$



$$Z_{cor} = Z_{\beta} - \Delta Z(Z_{\beta})$$

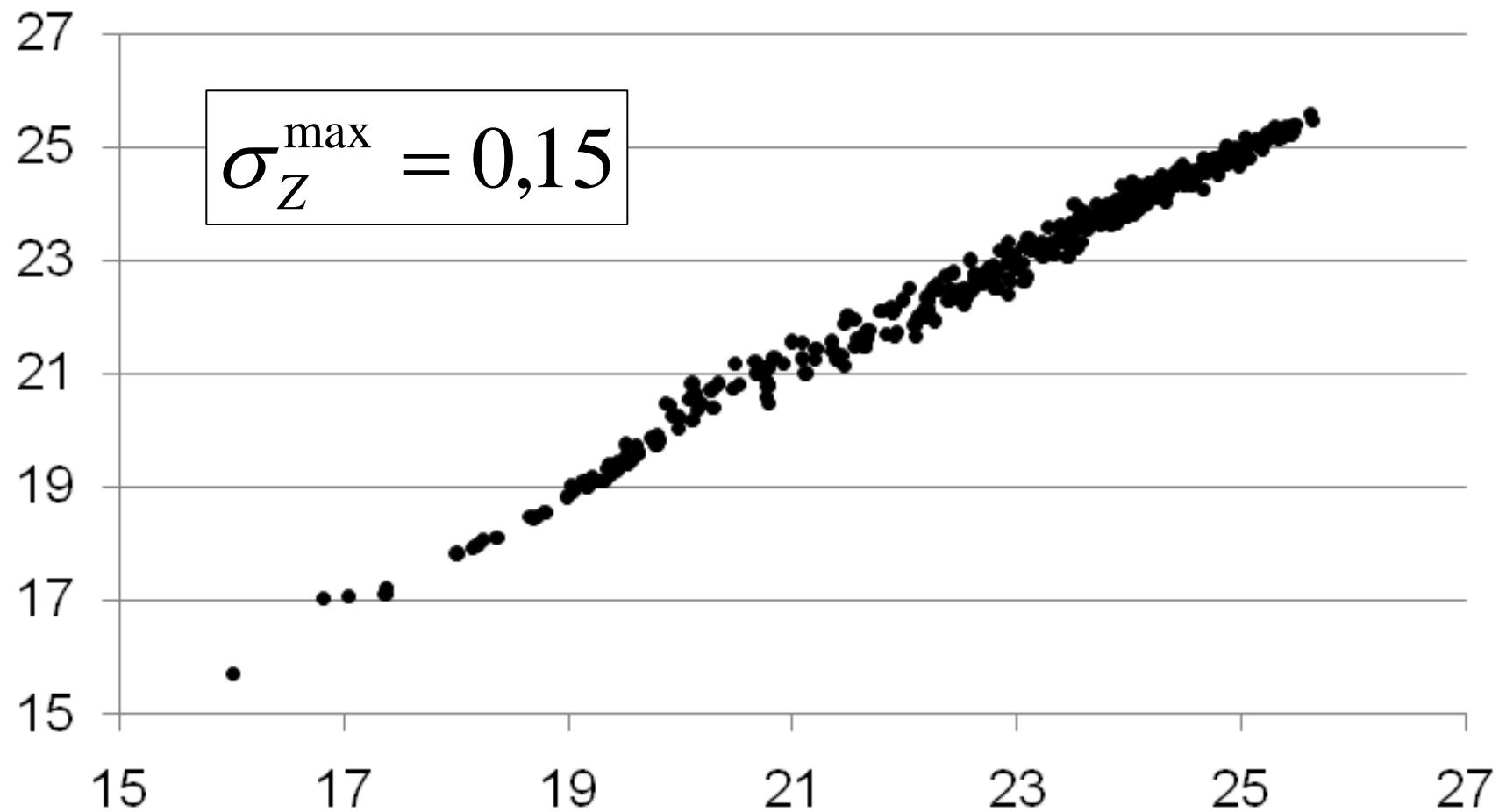


○ - реперные точки для построения тарировочной сплайн-функции

Несмешенная оценка

$$Z_{F(\bar{E})}$$

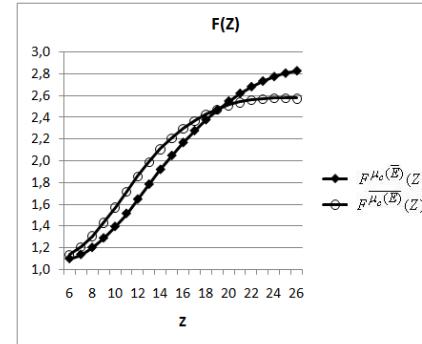
$$Z_{F(\bar{E})}$$



$$Z_\beta$$

Способ оценки массовых коэффициентов ослабления и эфф. атомного номера многокомпонентного объекта для непрерывных спектров

1. Измерение β $\beta(Z) = \ln \frac{N_0^L}{N^L} \Big/ \ln \frac{N_0^H}{N^H}$
2. Оценка $Z\beta$ $Z_\beta = F^{\mu_c(\bar{E})^{-1}}(\beta)$



3. Оценка $Z_{cor} = Z_\beta - \Delta Z(Z_\beta)$

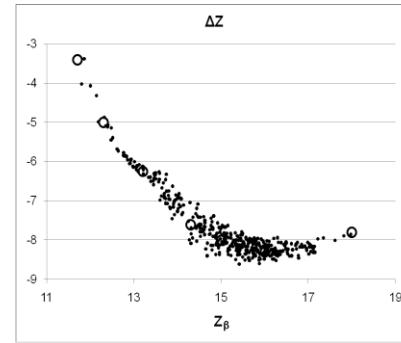
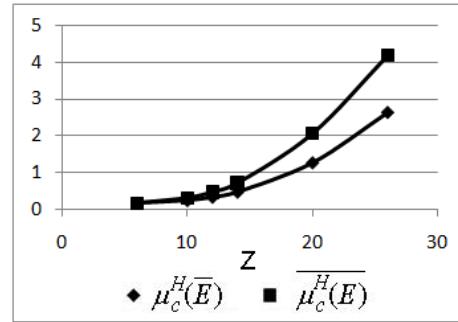
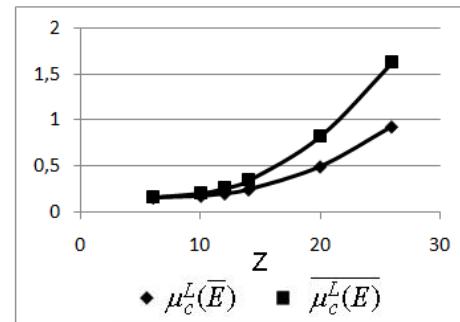
4. По полученному Z_{cor} и таблицам определение

$$\mu_c^L(\bar{E}) \text{ и } \mu_c^H(\bar{E})$$

5. Вычисление инвариантных к ρD

$$\mu_c^L(E) \text{ и } \mu_c^H(E)$$

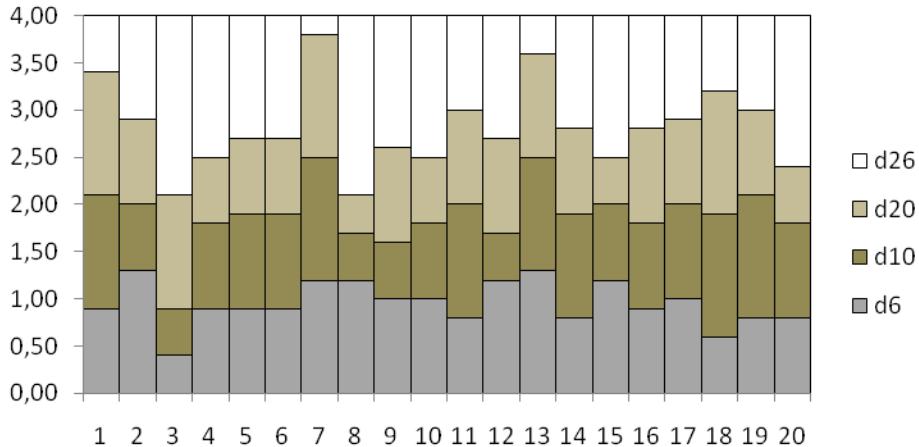
6. Вычисление по $\frac{\mu_c^L(E)}{\mu_c^H(E)}$ Z , инвариантного к ρD



Результаты оценки $\overline{\mu_c(E)}$

$Z_{\overline{\mu_c(E)}}$

Распределение толщин слоев, см



Объект

№ слоя	Z_i	$\rho_i, \text{ г/см}^3$
1 (d6)	6	1
2 (d10)	10	1,25
3 (d20)	20	1,5
4 (d26)	26	2

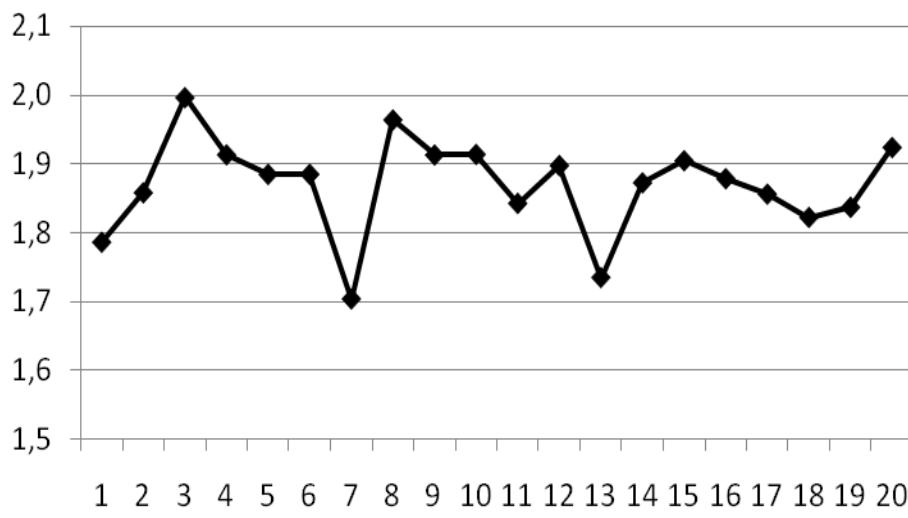
Измерение

$$\beta(Z) = \frac{\ln \frac{N_0^L}{N^L}}{\ln \frac{N_0^H}{N^H}}$$

$$\ln \sum_{E_{\min}^L}^{E_{\max}^L} f_i^L e^{-\mu_c^L(E_i) \rho_a D} \Delta E$$

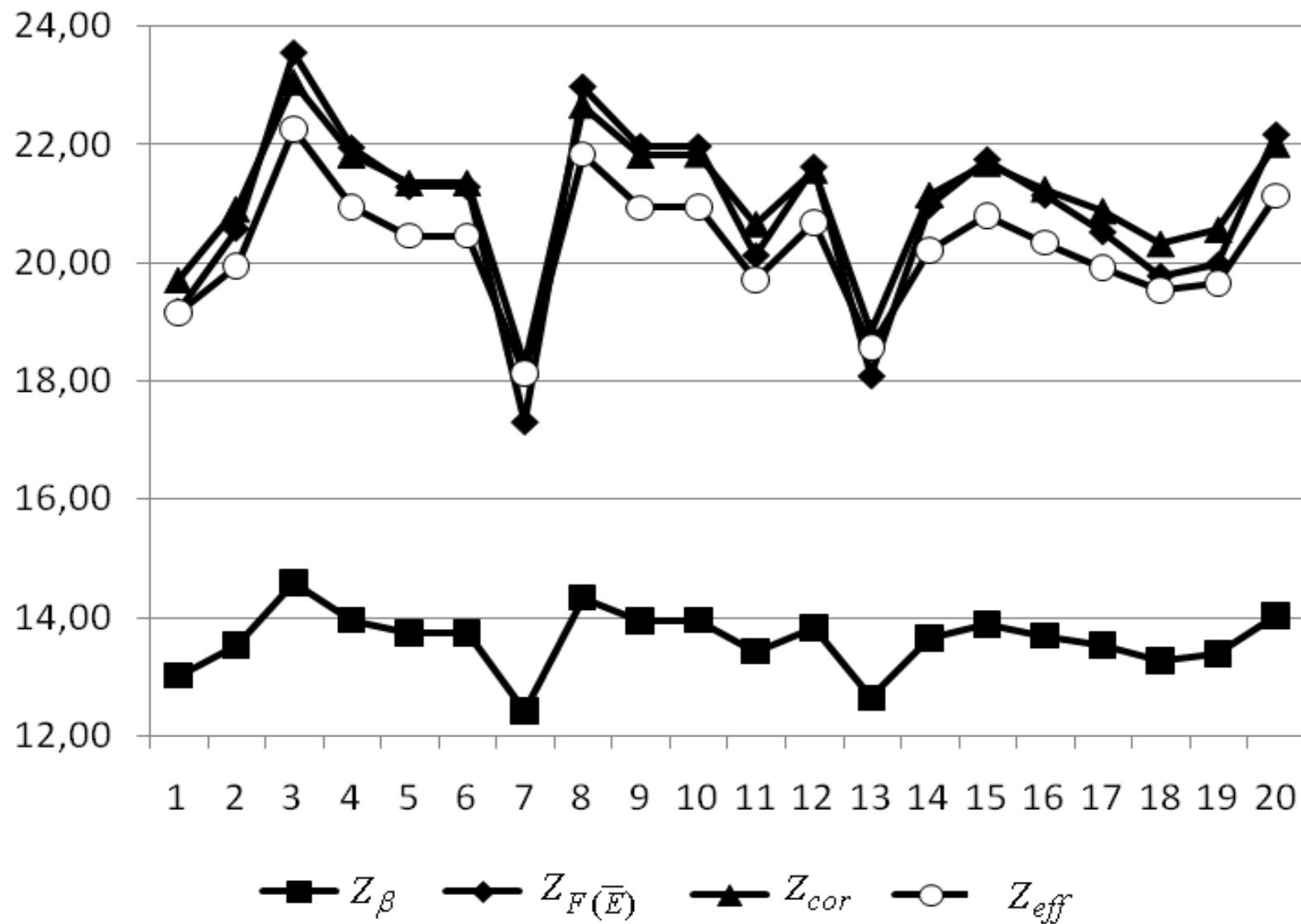
$$\beta(Z) = \frac{\ln \sum_{E_{\min}^H}^{E_{\max}^H} f_i^H e^{-\mu_c^H(E_i) \rho_a D} \Delta E}{\ln \sum_{E_{\min}^H}^{E_{\max}^H} f_i^H e^{-\mu_c^H(E_i) \rho_a D} \Delta E}$$

β



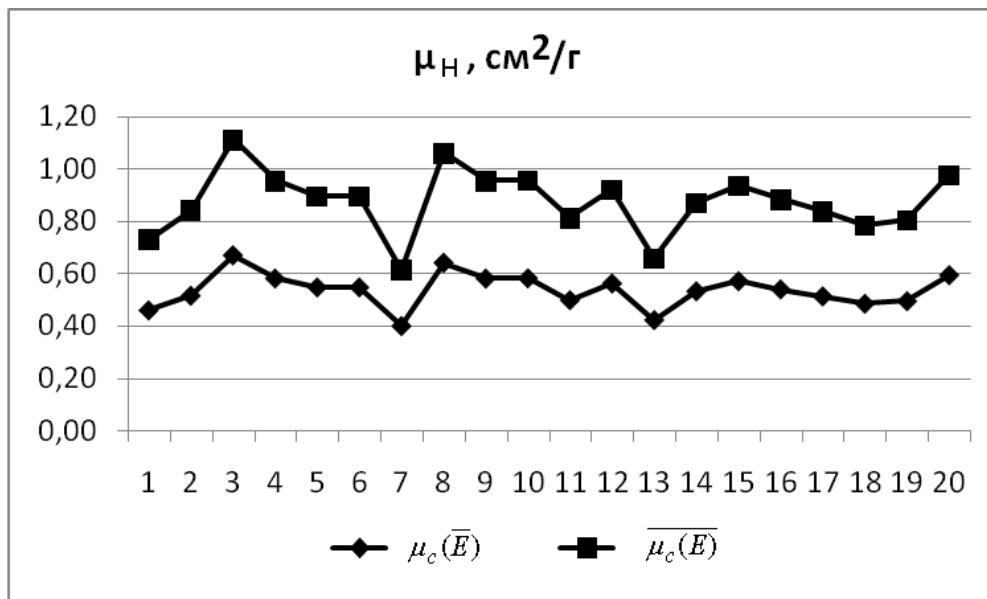
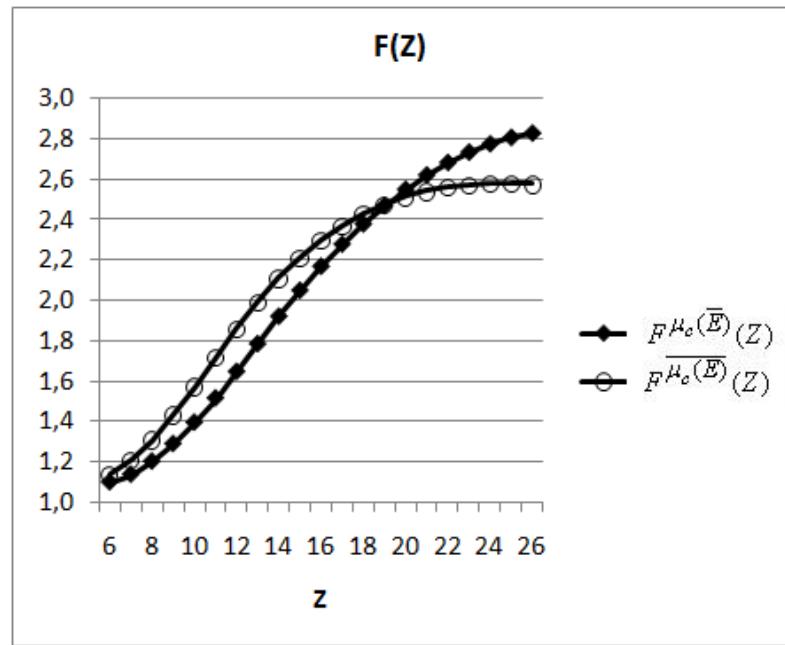
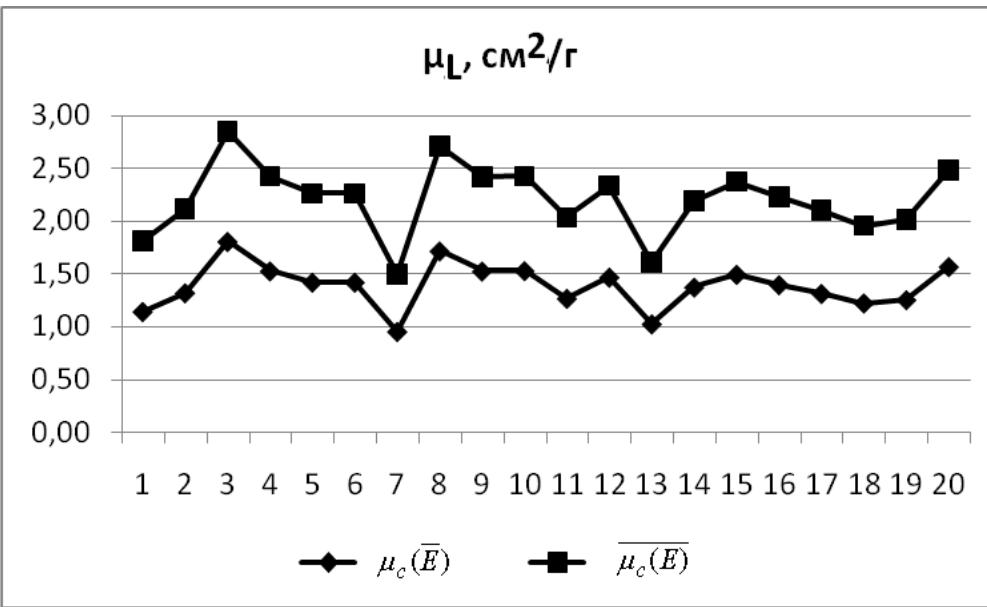
Результаты оценки $Z_{\overline{\mu_c(E)}}$

Z



Результаты оценки

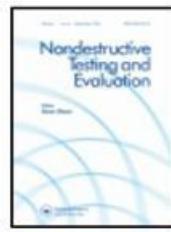
$$\overline{\mu_c(E)}$$



$$Z \overline{\mu_c(E)} \neq f(\rho, D)$$

Заключение

1. Традиционный подход к оценке **массовых коэффициентов ослабления и эффективных атомных номеров** не бесконечно тонких многокомпонентных объектов при использовании источников монохроматического излучения для источников с непрерывным спектром неприемлем.
2. **Массовые коэффициенты ослабления и эффективный атомный номер** не бесконечно тонких многокомпонентных объектов при использовании источников с непрерывным спектром определяются бесконечно тонким объектом с бесконечно малой плотностью и с тем же распределением массовой концентрации входящих в него элементов.
3. Предложен способ оценки **массовых коэффициентов ослабления и эффективных атомных номеров**, инвариантных к средней плотности и толщине многокомпонентных объектов на основе источников с непрерывным спектром.



Nondestructive Testing and Evaluation



ISSN: 1058-9759 (Print) 1477-2671 (Online) Journal homepage: <http://www.tandfonline.com/loi/gntr20>

KEYWORDS

X-ray; effective atomic number; continuous spectrum; multicomponent objects; mass *attenuation* coefficient

The effective atomic number and the mass attenuation coefficient of a multicomponent object for the continuous spectrum of the radiation

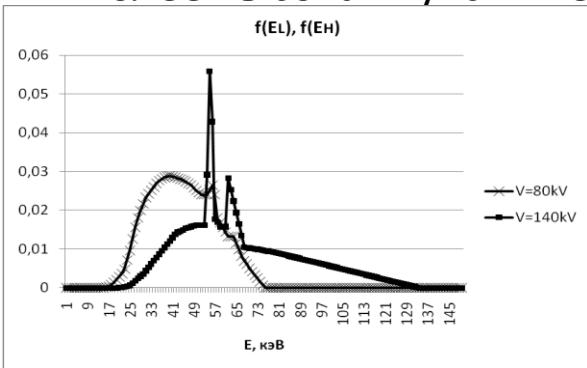
Published : 22 Feb 2016.

Vjacheslav Gorshkov

Преимущества применения спектрометрических датчиков

(предложение Вадима)

1. Более высокая чувствительность



(Можно попробовать на
Имеющихся маммограммах)

(Оптимизация)

2. Возможность идентификации более трех входящих в объект компонентов

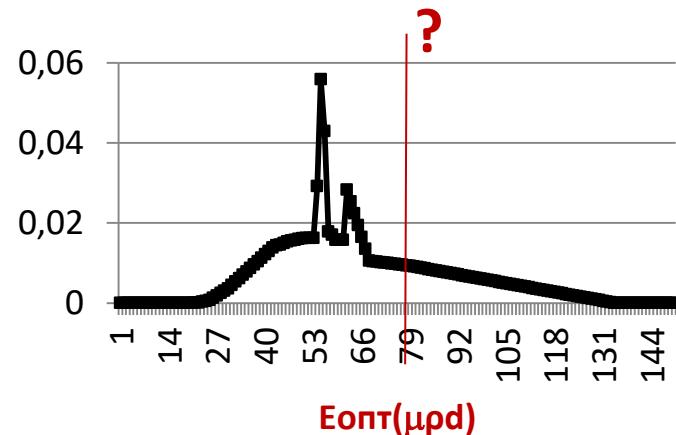
$$\begin{pmatrix} \mu_{1m} & \mu_{1g} & \mu_{1os} \\ \mu_{2m} & \mu_{2g} & \mu_{2os} \\ 1/\rho_m & 1/\rho_g & 1/\rho_{os} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho_m d_m \\ \rho_g d_g \\ \rho_{os} d_{os} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ln(N_0^L/N_L) \\ \ln(N_0^H/N_H) \\ D \end{pmatrix}$$

3. Отсутствует проблема синхронизации

4. Контроль динамических объектов и быстропротекающих процессов

4.... 3D томография Z и ρ (кружится голова)

Целесообразность создания спектрометрического монстра
Почему это не сделано раньше

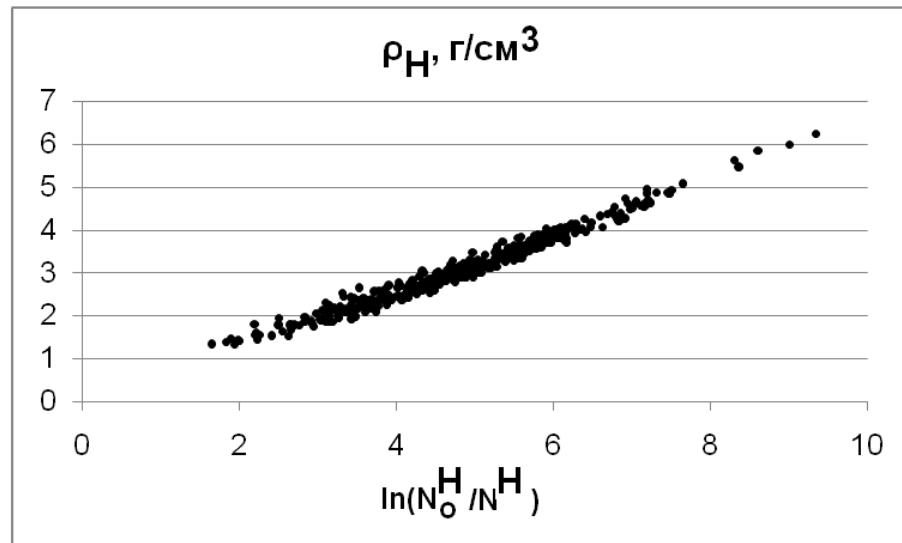
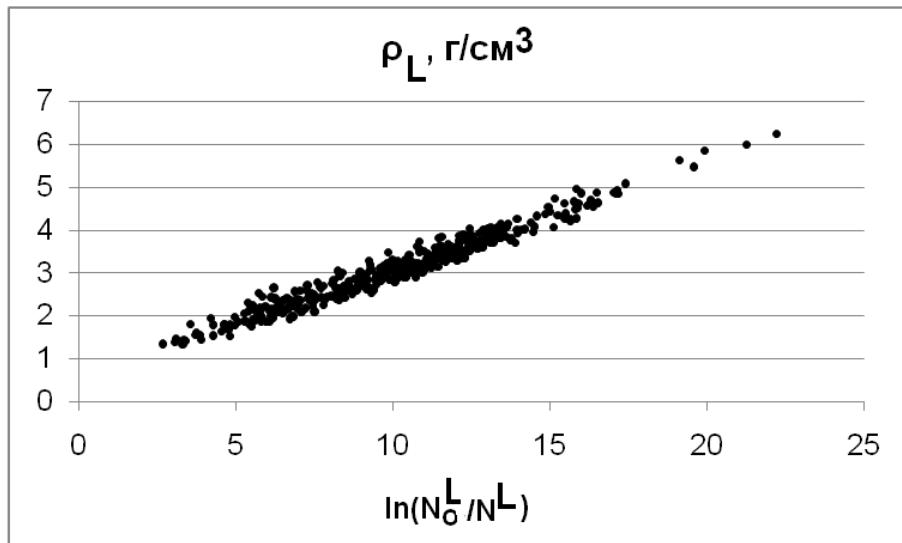


Дополнительные материалы

$$\frac{N}{N_0} = \frac{\sum_{E=E_{\min}}^{E=E_{\max}} f(E) e^{-\sum_{i=1}^m \mu_i(Z, E) \rho_i d_i}}{\Delta E}$$

Измерение средней плотности, вариация которой обусловлена вариациями степени уплотнения и химическим составом

По тарировочной зависимости



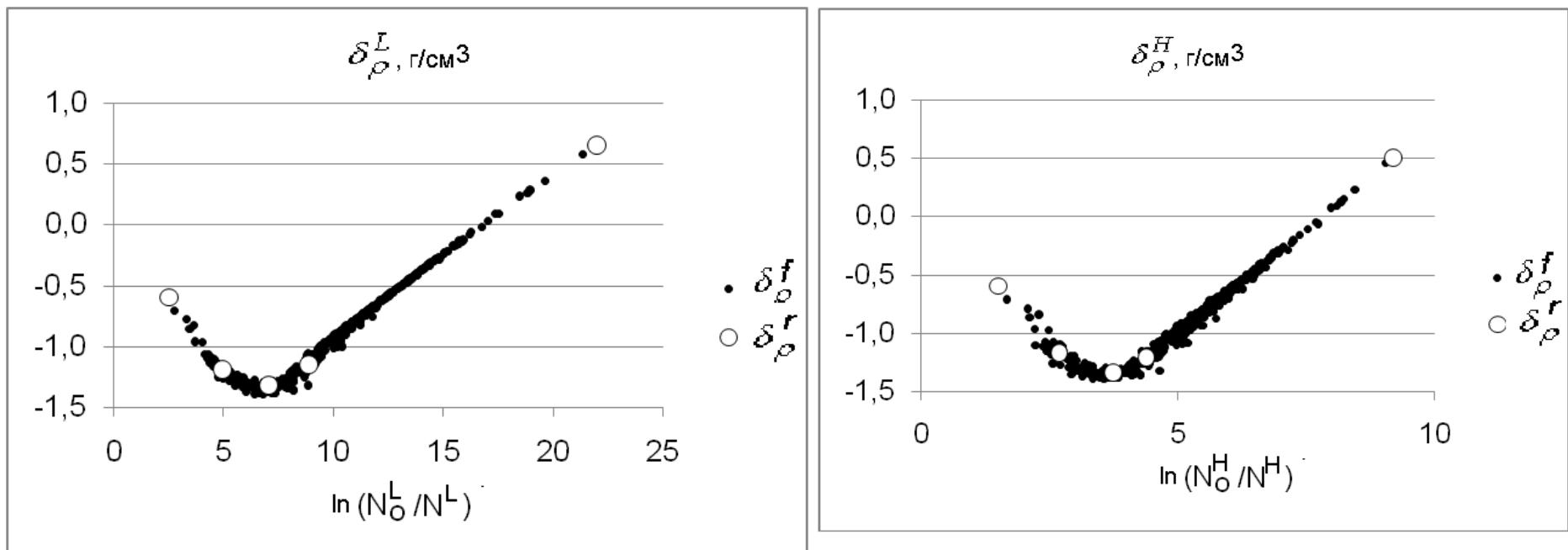
Ошибка в оценке плотности связана с μ, ρ, D
Но они не известны.

Но измеряемо их произведение $\mu\rho D = -\ln \frac{N}{N_0}$

Следовательно, аргументом тарировочной функции ошибки целесообразно выбрать именно данный логарифм

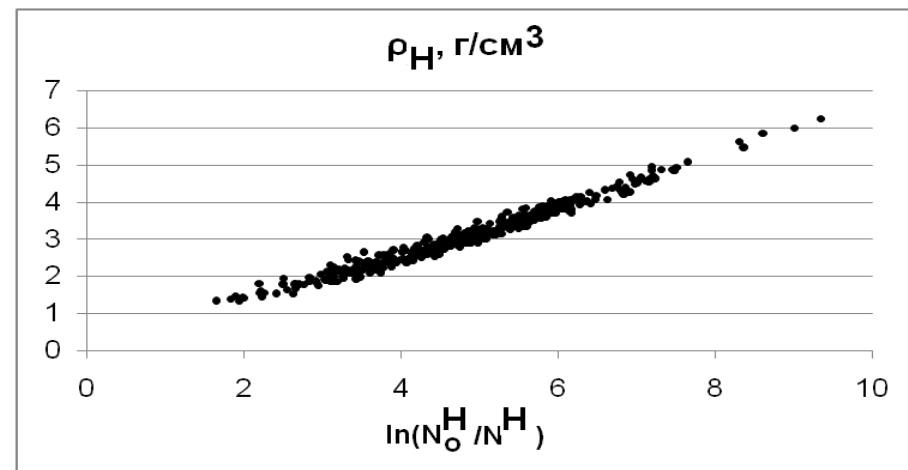
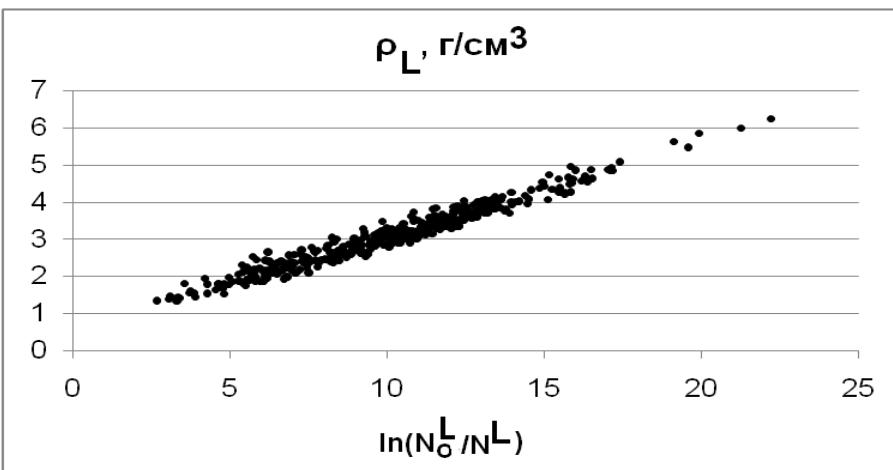
Зависимость погрешности в оценке средней плотности от доли зарегистрированных фотонов

$$\mu\rho D = -\ln \frac{N}{N_0}$$

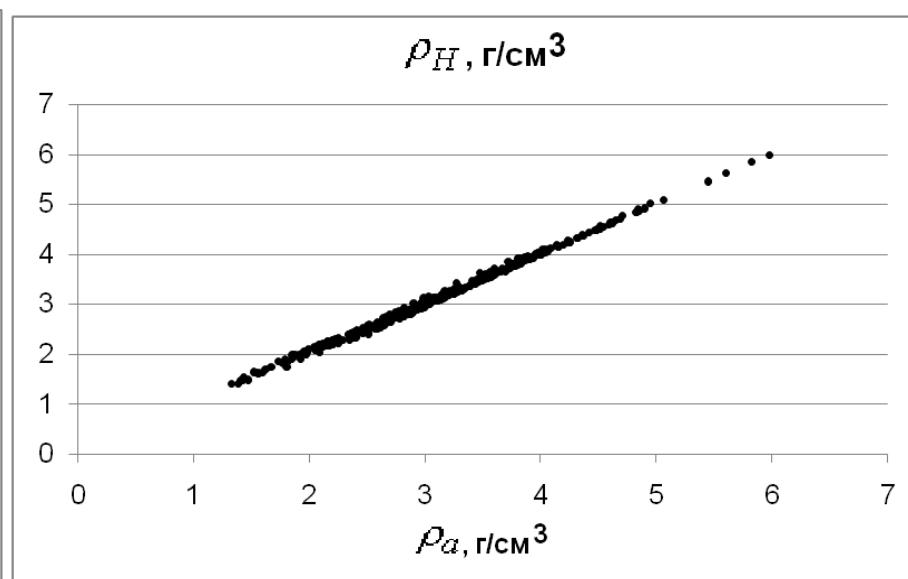
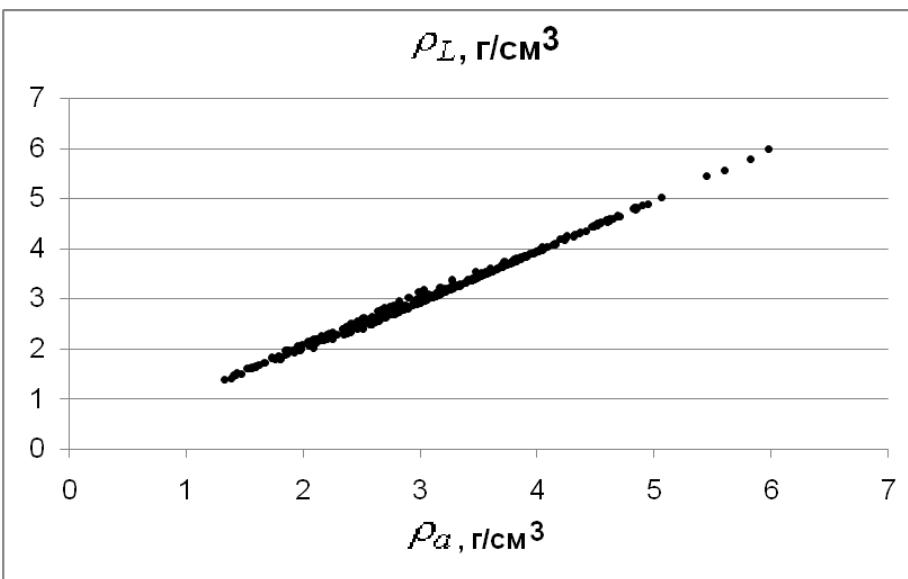


Сопоставление погрешности в оценке средней плотности

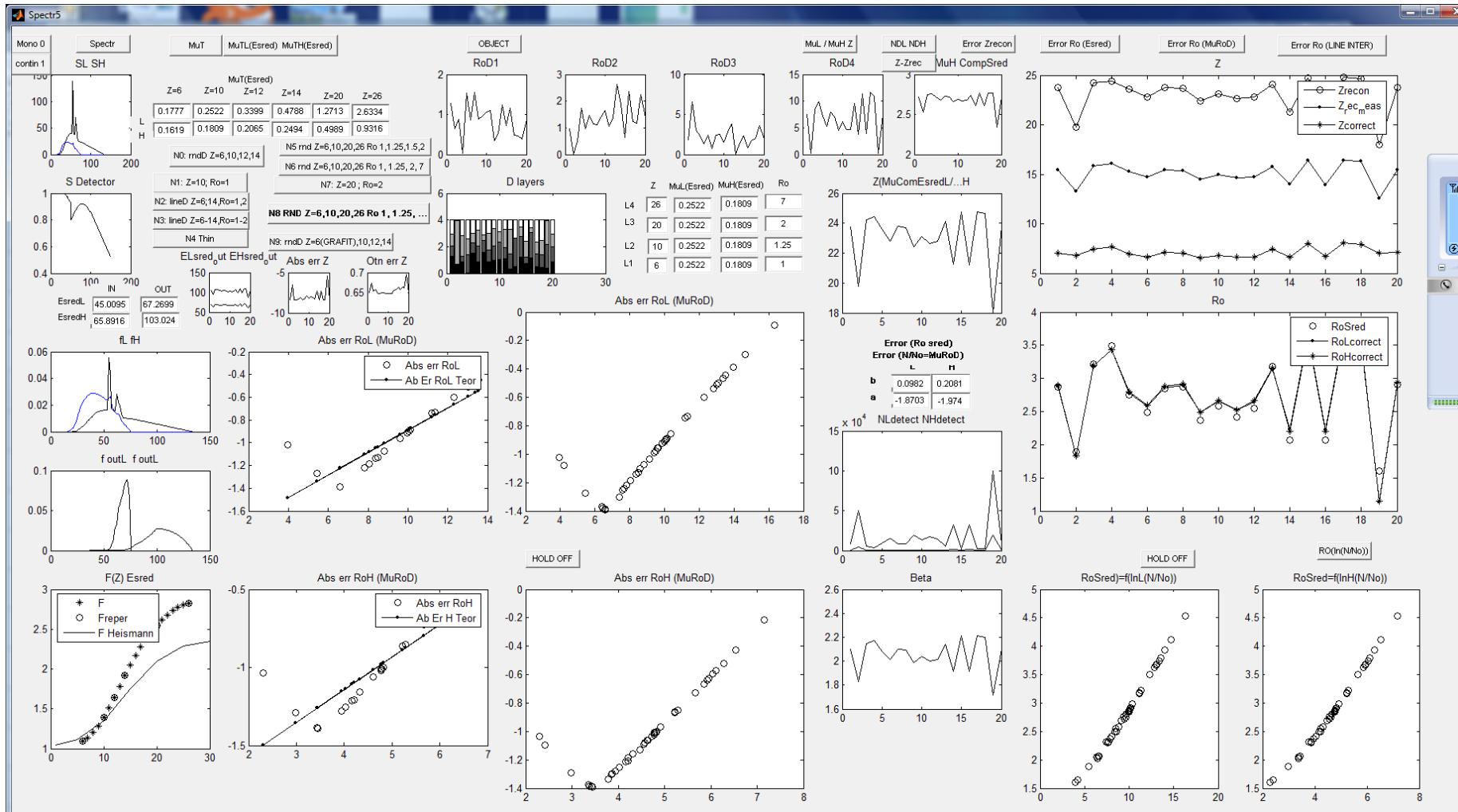
По тарировочным кривым



С учетом зависимости погрешности от $\mu\rho D$



Интерфейс рабочей модели



Спасибо за внимание !

МЕТОД ДВУХЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ АБСОРБЦИОМЕТРИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПЛОТНОСТИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

Н.А. Антропов, Д.А. Карпов, Ю.Ю. Крючков, Т.Н. Стрежнева

Томский политехнический университет

E-mail: kyy@tpu.ru

Экспериментально показана возможность использования двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии для определения плотности водно-солевых и водно-спиртовых растворов при вариации массового коэффициента ослабления проб до 80 %.

Ключевые слова:

Двухэнергетическое рентгеновское излучение, плотность, массовый коэффициент ослабления.

Key words:

Dual-energy X-ray radiation, density, mass attenuation coefficient.

Введение

Поглощение излучения веществом (абсорбция) является достаточно изученным разделом физики, результаты которого широко используются, например, для определения плотности веществ, которая играет важную роль при проведении аналитических исследований. При использовании абсорбции для измерения плотности многокомпонентных проб переменного состава на углеводородной основе, таких как костный остаток животных, нефть, газ и других, возникает проблема определения массового коэффициента ослабления μ и плотности пробы ρ .

В последнее время в медицине для определения минеральной плотности кости широко использует-

ся метод двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии. Суть метода заключается в том, что исследуемый объект, например, кость человека, облучают рентгеновским излучением с энергией 35 и 68 кэВ.

Вычисление минеральной плотности кости проводится из системы уравнений [1]:

$$\begin{aligned}N_1 &= N_{01} \exp(-\mu_{b1} t_b \rho_b - \mu_{s1} t_s \rho_s - \mu_{f1} t_f \rho_f), \\N_2 &= N_{02} \exp(-\mu_{b2} t_b \rho_b - \mu_{s2} t_s \rho_s - \mu_{f2} t_f \rho_f),\end{aligned}\quad (1)$$

где N_1 , N_2 и N_{01} , N_{02} – количество импульсов, зарегистрированных детекторами после прохождения излучения через исследуемый участок и внутренний фантом (модель, воспроизводящая часть тела

DEXA & Laser компании Lund

(<http://www.lundltd.ru/index.php?razd=106&catalog=111>).

«Корректная костная плотность в каждой измеряемой точке вычисляется из следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} N_1 &= N_{01} * \exp(-\nu_{b1} * t_b * \sigma_b - \nu_{s1} * t_s * \sigma_s - \nu_{f1} * t_f * \sigma_f), \\ N_2 &= N_{02} * \exp(-\nu_{b2} * t_b * \sigma_b - \nu_{s2} * t_s * \sigma_s - \nu_{f2} * t_f * \sigma_f), \end{aligned}$$

где

N_1 , N_2 - количество гамма квантов, зарегистрированных датчиками после прохождения через исследуемый участок

N_{01} , N_{02} - количество гамма квантов, зарегистрированных датчиками при прохождении через внутренний фантом.»

МЕТОД ДВУХЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ АБСОРБЦИОМЕТРИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПЛОТНОСТИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

Вычисление минеральной плотности кости проводится из системы уравнений [1]:

$$\begin{aligned} N_1 &= N_{01} \exp(-\mu_{b1} t_b \rho_b - \mu_{s1} t_s \rho_s - \mu_{f1} t_f \rho_f), \\ N_2 &= N_{02} \exp(-\mu_{b2} t_b \rho_b - \mu_{s2} t_s \rho_s - \mu_{f2} t_f \rho_f), \end{aligned} \quad (1)$$

где N_1 , N_2 и N_{01} , N_{02} – количество импульсов, зарегистрированных детекторами после прохождения излучения через исследуемый участок и внутренний фантом (модель, воспроизводящая часть тела

Для многокомпонентных проб переменного состава – нефть, газ и других, массовый коэффициент ослабления для моноэнергетического излучения будет определяться как

$$\mu = \sum \mu_i, \quad (2)$$

Массовый коэффициент ослабления для нефти по выражению (2) определится как

$$\mu = \mu_c + \mu_h + \mu_s,$$

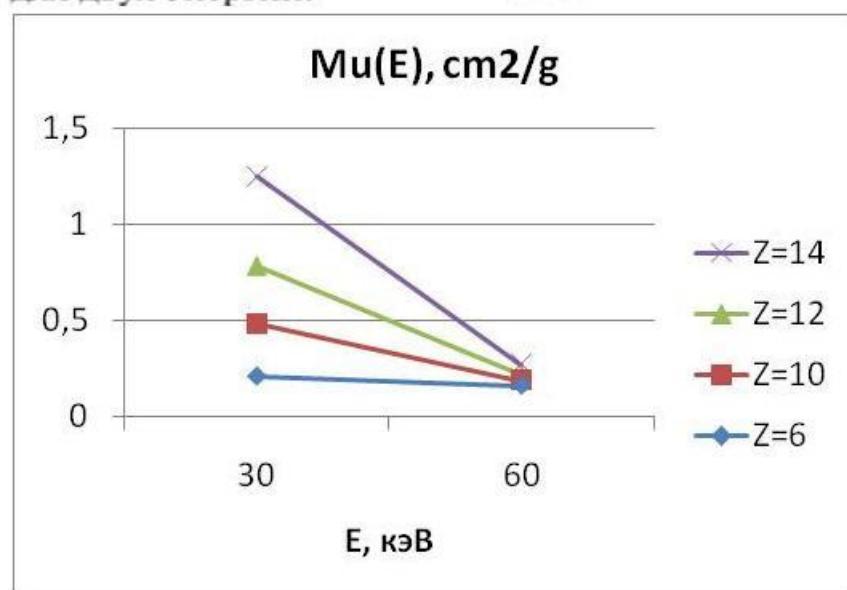
где μ_c , μ_h , μ_s – массовые коэффициенты ослабления для углерода C, водорода H и серы S, $\text{см}^2/\text{г}$. Тогда интенсивность излучения после прохождения пробы с нефтью можно рассчитать как (1):

$$J = J_0 \cdot e^{-(\mu_c + \mu_h + \mu_s) \cdot \rho \cdot x},$$

уравнений (2) три неизвестных: ρ , μ' , μ'' . Для решения системы уравнений (2) авторами работы [1, 2] предложено уравнение связи:

$$\mu' = a + b\mu'', \quad (3)$$

где μ' , μ'' – массовые коэффициенты ослабления для двух энергий.



СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ СЕРЫ В НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТАХ (патент № 2367933)

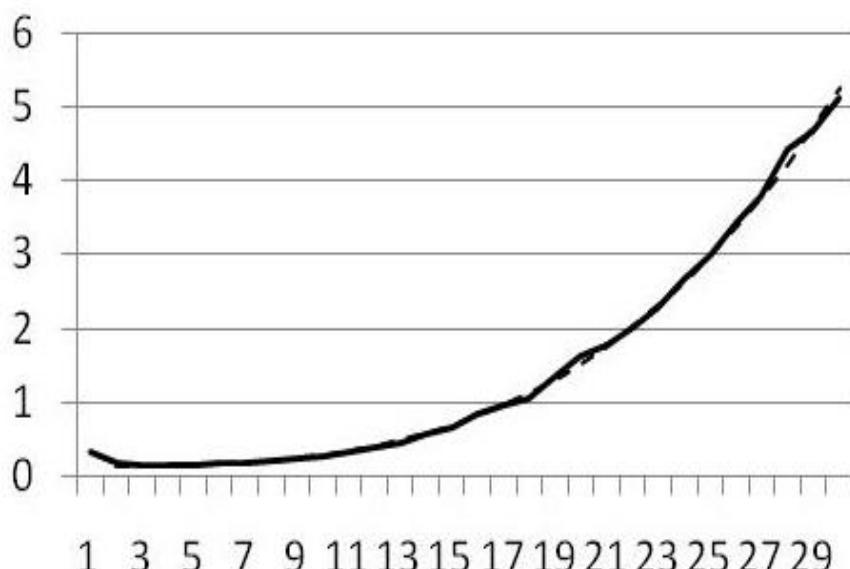
Использование двух энергий излучения позволяет существенно снизить погрешность по сравнению с методами однофотонной и моноэнергетической рентгеновской абсорбциометрии до 0,5 %.

Для решения системы уравнений (1) принимается
допущение, что коэффициенты ослабления для
энергий излучения 35 и 68 кэВ постоянны. Допу-

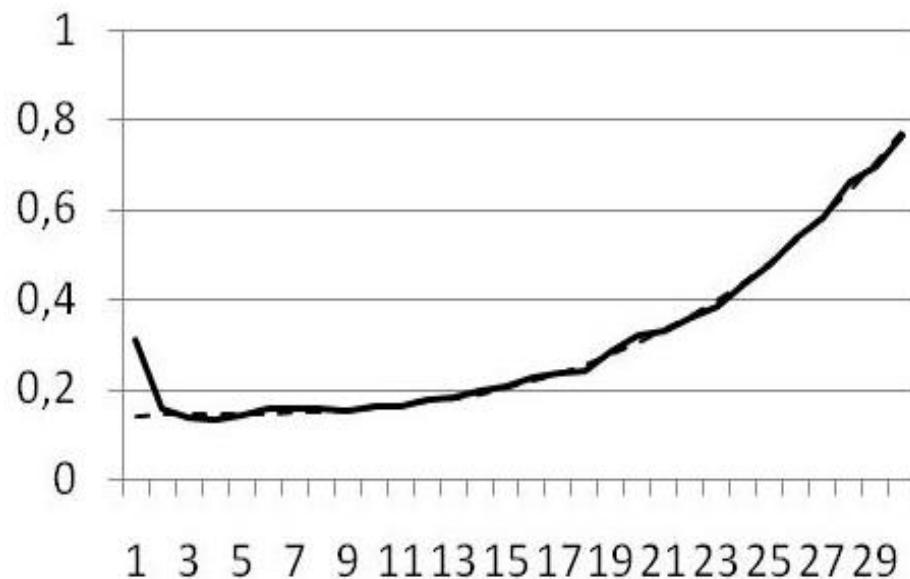
Angelo Pietrobelli, Zimian Wang, Carmelo Formica and Steven B. Heymsfield. Dual-energy X-ray absorptiometry: fat estimation errors due to variation in soft tissue hydration. *American Journal of Physiology Endocrinology and Metabolism*. «which assumes that μ values for the two soft tissue components at **the higher energy are approximately equal** (e.g., at 70 keV, μ values for protein, glycogen, water, extracellular fluid, and intracellular fluid are 0.183, 0.183, 0.194, 0.195, and 0.196, respectively)»

Водород (1,1), Углерод (6,12), Сера (16,32)

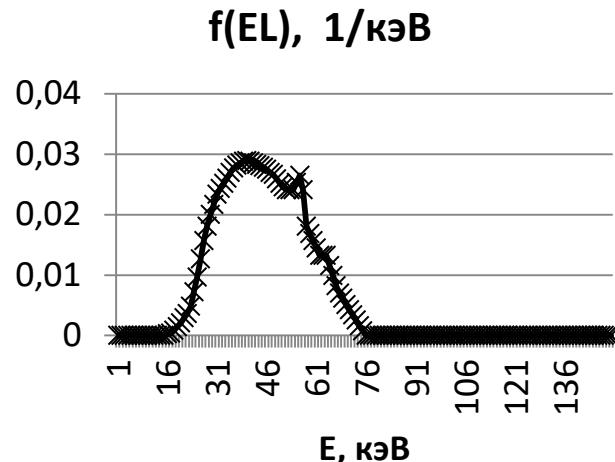
μ , см²/г (E=40 кэВ)



μ , см²/г (E=80 кэВ)



Неправомерность допущения постоянства μ_H для рентгеновских спектров
 (Патент 2367933. Оценка порога обнаружения рентгенотрансмиссионного метода определения серы в
 нефти и нефтепродуктах)



Водород (1,1), Углерод (6,12), Сера (16,32)

