

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА
СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ
(ГСССД)

УДК 539. 163

ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ

РАДИОНУКЛИДЫ ^{229}Th , ^{230}Th , ^{231}Th , ^{232}Th , ^{233}Th , ^{234}Th .
ЭНЕРГИЯ, АБСОЛЮТНАЯ ВЕРОЯТНОСТЬ ЭМИССИИ АЛЬФА-,
БЕТА-, ГАММА- И ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЙ И ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА

ГСССД 313 — 2015

(ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ, тема RU.3.038 — 2016)

РАЗРАБОТАНЫ ОАО « Радиевый институт им. В. Г. Хлопина »
докт. физ. – мат. наук Чечева В. П.

РЕКОМЕНДОВАНЫ к утверждению Межведомственной
комиссией по аттестации справочных данных в различных
тематических направлениях атомной науки, техники и
технологии

ОДОБРЕНЫ экспертной комиссией в составе:

д-ра физ.- мат. наук В. Н. Манохина,
д-ра физ. - мат. наук И. А. Митропольского,
канд. физ. - мат. наук В. О. Сергеева,
д-ра техн. наук Ю.С. Попова,
канд. техн. наук П. В. Попова

ПОДГОТОВЛЕНЫ к утверждению Российским научно-
техническим центром информации по стандартизации,
метрологии и оценке соответствия
(ФГУП “Стандартинформ”)

УТВЕРЖДЕНЫ Федеральным агентством по техническому
регулированию и метрологии **“27” октября 2015 г.**
(протокол № 7)

**ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА
СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ**

Таблицы стандартных справочных данных

Радионуклиды ^{229}Th , ^{230}Th , ^{231}Th , ^{232}Th ,
 ^{233}Th , ^{234}Th . Энергия, абсолютная
вероятность эмиссии альфа-, бета-,
гамма- и характеристического
рентгеновского излучений и период
полураспада

**ГСССД
313 — 2015**

Tables of Standard Reference Data

Radionuclides ^{229}Th , ^{230}Th , ^{231}Th , ^{232}Th ,
 ^{233}Th , ^{234}Th . Energy, absolute emission
probability of alpha-, beta-, gamma-, X-
rays and half-life.

**GSSSD
313 — 2015**

ДЕПОНИРОВАННАЯ РУКОПИСЬ

УДК 539.163

Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 313 – 2015. Радионуклиды ^{229}Th , ^{230}Th , ^{231}Th , ^{232}Th , ^{233}Th , ^{234}Th . Энергия, абсолютная вероятность эмиссии альфа-, бета-, гамма- и характеристического рентгеновского излучений и период полураспада / Чечев В. П.; Росс. научн. – исследов. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ») – М., 2015, -18 с.: Ил. 0 – Библиогр. 17 назв. – Рус. – 2 назв.

Депонированы в ФГУП “Стандартинформ” 27.10.2015 г, № 893-2015 кк.

Настоящие таблицы стандартных справочных данных (ССД) содержат оценённые значения энергии, абсолютной вероятности эмиссии альфа-, бета-, гамма- и характеристического рентгеновского излучений и периода полураспада изотопов тория ^{229}Th , ^{230}Th , ^{231}Th , ^{232}Th , ^{233}Th , ^{234}Th .

Изотопы тория входят в состав ядерного топлива на различных стадиях развития ториевого и уран-ториевого топливных циклов. В ториевой энергетике природный долгоживущий ^{232}Th играет ту же роль, что и природный долгоживущий ^{238}U в традиционной атомной энергетике, а делящийся изотоп урана ^{233}U , образующийся при поглощении нейтрона ядром ^{232}Th и последующей цепочки бета-распадов $^{233}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{Pa} \rightarrow ^{233}\text{U}$, служит аналогом широко известных делящихся изотопов ^{235}U и ^{239}Pu . Характеристики распада ^{233}Th имеют существенное значение при расчёте тепловыделения в ториевом топливном цикле. Другие изотопы тория (^{234}Th , ^{231}Th), образующиеся в этом цикле в реакциях с захватом и испусканием нейтронов, также дают вклад в энерговыделение.

Однако представленные ядерные характеристики распада изотопов тория востребованы не только для ториевой энергетики. Изотоп ^{230}Th образуется при альфа- распаде ^{234}U и тем самым он входит в естественную смесь продуктов

распада природного ^{238}U . Относительно долгоживущий изотоп тория ^{229}Th используется для получения промышленного генератора $^{229}\text{Th}/^{225}\text{Ac}$ и применяется для производства терапевтического препарата на основе радионуклида ^{213}Bi .

Настоящие таблицы ССД призваны обеспечить специалистов атомной отрасли и ядерной медицины современными рекомендуемыми значениями характеристик распада и излучений ряда важных для практики изотопов тория.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	7
2. Энергия альфа-излучения.....	9
3. Абсолютная вероятность эмиссии альфа-излучения.....	9
4. Энергия бета-излучения.....	9
5. Абсолютная вероятность эмиссии бета-излучения.....	10
6. Энергия гамма-излучения.....	10
7. Абсолютная вероятность эмиссии гамма-излучения.....	10
4. Энергия характеристического рентгеновского излучения.....	10
5. Абсолютная вероятность эмиссии характеристического рентгеновского излучения.....	10
6. Период полураспада.....	11
7. Коэффициенты внутренней конверсии.....	11
8. Источники получения рекомендуемых значений.....	11
9. Стандартные справочные данные.....	12
10.Список литературы.....	17

1. Введение

Настоящие таблицы стандартных справочных данных (ССД) содержат оценённые значения энергии, абсолютной вероятности эмиссии альфа-, бета-, гамма- и характеристического рентгеновского излучений и периода полураспада ^{229}Th , ^{230}Th , ^{231}Th , ^{232}Th , ^{233}Th , ^{234}Th .

Все указанные изотопы тория входят в состав ядерного топлива на различных стадиях развития ториевого топливного цикла. В ториевой энергетике природный долгоживущий ^{232}Th играет ту же роль, что и природный долгоживущий ^{238}U в традиционной атомной энергетике, а делящийся изотоп урана ^{233}U , образующийся при поглощении нейтрона ядром ^{232}Th и последующей цепочки бета-распадов $^{233}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{Pa} \rightarrow ^{233}\text{U}$, служит аналогом широко известных делящихся изотопов ^{235}U и ^{239}Pu . Характеристики распада ^{233}Th имеют существенное значение при расчёте тепловыделения в ториевом топливном цикле. Другие изотопы тория (^{234}Th , ^{231}Th), образующиеся в этом цикле в реакциях с захватом и испусканием нейтронов, также дают вклад в энерговыделение.

Однако ядерные характеристики распада изотопов тория востребованы не только для ториевой энергетики. Изотоп ^{230}Th образуется при альфа- распаде ^{234}U и тем самым он входит в естественную смесь продуктов распада природного ^{238}U . Относительно долгоживущий изотоп тория ^{229}Th используется для получения промышленного генератора $^{229}\text{Th}/^{225}\text{Ac}$ и применяется для производства терапевтического препарата на основе радионуклида ^{213}Bi .

Список характеристик в таблицах ССД содержит период полураспада, энергии и абсолютные вероятности эмиссии альфа-, бета-, гамма- и рентгеновского характеристического излучений (в процентах от числа распадов). Перечень частиц и фотонов, рассмотренных для каждого радионуклида, ограничен наиболее интенсивным излучением.

Для альфа- излучающих нуклидов ^{230}Th и ^{232}Th в таблицы включены характеристики наиболее интенсивного альфа-излучения с абсолютной вероятностью эмиссии (P_α) больше 0,05% от числа распадов (три альфа- линии) и

характеристики наиболее интенсивного гамма-излучения (две гамма- линии). Для ^{229}Th даны характеристики наиболее интенсивного альфа- и гамма- излучения с $P_\alpha, P_\gamma \geq 1\%$ (9 альфа- линий и 7 гамма- линий). Для всех альфа- излучающих нуклидов приведены также энергии и интенсивности компонентов КХ- излучения радия. Для низкоэнергетического LX- излучения радия дана только суммарная интенсивность.

Для бета-излучающих нуклидов ^{231}Th , ^{233}Th , ^{234}Th в таблицы ССД включены характеристики наиболее интенсивного бета- и гамма- излучений с абсолютной вероятностью эмиссии $P_\beta \geq 1\%$ от числа распадов, $P_\gamma \geq 0,4\%$ от числа распадов. Приведены также характеристики компонентов КХ- излучения протактиния и суммарная интенсивность низкоэнергетического LX- излучения.

При рассмотрении представленных данных следует учитывать, что они даны для распада «чистых» изотопов тория, в то время как все эти изотопы являются родоначальниками цепочек распада. Характеристики излучения дочерних продуктов распада не представлены в настоящих таблицах.

При разработке таблиц использованы оцененные данные международной кооперации Decay Data Evaluation Project (DDEP) [1-4]. Цель этой кооперации, включающей представителей ведущих метрологических и ядерных лабораторий мира, состоит в разработке высококачественных таблиц оценённых данных для широко применяемых радионуклидов. Способы получения оценённых данных участниками кооперации DDEP соответствуют критериям и рекомендациям методики оценки [5].

В тех случаях, когда по сравнению с экспериментальной информацией, рассмотренной участниками кооперации DDEP, на начало октября 2014 года имелись новые опубликованные экспериментальные данные, автором настоящих таблиц ССД выполнена переоценка рекомендуемых значений ядерно-физических характеристик с учётом новых данных.

Погрешности всех величин в таблицах ССД даны в круглых скобках в единицах последней значащей цифры для доверительной вероятности 0,68 (1σ). Эта погрешность в настоящее время принята для оценки ядерных данных.

Для энергии компонентов характеристического рентгеновского излучения даны расчётные теоретические значения. Погрешности для них, как правило, не указываются. Тем не менее, из имеющейся экспериментальной информации можно оценить, что неопределённость значений энергии в интервалах, приведённых в настоящих таблицах, не превышает 1 эВ. Для рентгеновских линий $K\alpha_2$, $K\alpha_1$ погрешности энергии известны из непосредственных измерений. В таких случаях они приняты из стандартных справочных данных [6].

Ниже для характеристик, включённых в таблицы ССД, приведены основные черты процедуры оценки их значений.

2. Энергия альфа- излучения

Значения *энергии* (E_α) *альфа-частиц* получены либо путем усреднения имеющихся экспериментальных данных (^{229}Th , ^{230}Th), либо вычислены (^{232}Th) на основе схемы распада из полной энергии альфа-распада (Q_α), взятой из новых таблиц атомных масс [7], и энергий уровней дочернего ядра, принятых согласно оценкам, представленным в международном файле ENSDF [8].

3. Абсолютная вероятность эмиссии альфа- излучения

Абсолютная вероятность эмиссии наиболее интенсивного *альфа - излучения* (P_α , в % от числа распадов радионуклида) оценена путем усреднения имеющихся экспериментальных данных. Значения P_α менее интенсивного альфа - излучения в большинстве случаев вычислены на основе схемы распада из баланса интенсивностей переходов.

4. Энергия бета- излучения

Значения *граничной энергии β -спектра* (E_β) для всех рассмотренных нуклидов получены из значений полной энергии распада Q_β [7] и энергий уровней дочерних ядер, принятых согласно оценкам, представленным в международном файле ENSDF [8]. Значения *средней энергии β -излучения* ($\langle E_\beta \rangle$) вычислены по компьютерной программе LOGFT [9].

5. Абсолютная вероятность эмиссии бета-излучения

Значения *абсолютной вероятности эмиссии бета-излучения* (P_β) вычислены на основе схемы распада из баланса интенсивностей переходов.

6. Энергия гамма-излучения

При оценке значений *энергии гамма-излучения* (E_γ) в качестве исходной энергетической нормали принята гамма-линия с энергией $411,80205 \pm 0,00017$ кэВ (^{198}Au) [10]. Значения E_γ в большинстве случаев оценены путем усреднения имеющихся экспериментальных данных. Для некоторых слабых гамма-лучей малой энергии они выведены непосредственно из энергии уровней дочерних ядер.

7. Абсолютная вероятность эмиссии гамма-излучения

Абсолютная вероятность эмиссии гамма-излучения (P_γ) дана в процентах от числа распадов радионуклида, т.е. представляет собой число γ -квантов данной энергии на 100 распадов. Большинство значений P_γ рассчитано на основе данных об относительной интенсивности гамма-излучения с использованием либо баланса интенсивностей гамма- переходов, либо непосредственно измеренной на опыте абсолютной интенсивности какой-либо одной гамма-линии.

8. Энергия характеристического рентгеновского излучения

Значения *энергии характеристического рентгеновского излучения* ($E_{\text{ХК}}$, $E_{\text{ХЛ}}$) основаны на измерениях длин волн, приведенных в компиляции [11]. Оценённые значения энергии компонентов КХ-излучения в килоэлектронвольтах (кэВ) приняты из данных [6,12].

9. Абсолютная вероятность эмиссии характеристического рентгеновского излучения

Оценённые значения *абсолютной вероятности эмиссии* компонентов КХ- и LX- излучений ($P_{\text{ХК}}$, $P_{\text{ХЛ}}$) получены расчётным путём с использованием компьютерной программы EMISSION [13] и атомных данных из [12] (подробнее см. [5]).

9. Период полураспада

Периоды полураспада ($T_{1/2}$) рассмотренных радионуклидов оценены посредством статистической обработки конкретных экспериментальных данных. Технология оценки представлена в [5].

11. Коэффициенты внутренней конверсии

Коэффициенты внутренней конверсии (KBK) используются в расчётах абсолютной вероятности эмиссии гамма- и характеристического рентгеновского излучений. Интерполяция KBK выполняется с использованием программы BrIcc v.2.3S, помещённой на сайте NNDC BNL [14], для набора данных BrIccFO (расчёт по модели с т.н. «замороженной орбиталью» [15]).

12. Источники получения рекомендуемых значений

Рекомендуемые в качестве ССД значения указанных выше характеристик получены на основе оценённой информации из [2, 4, 8] с учётом (в необходимых случаях) новых опубликованных результатов измерений. В частности, для периода полураспада ^{229}Th автором таблиц было получено новое (по сравнению с [8]) оценённое значение в связи с недавней публикацией результатов измерений $T_{1/2}$ ^{229}Th [16, 17]. Также следует отметить, что значения энергии многих альфа-частиц и электронов бета-распада скорректированы по сравнению с [2, 4, 8] в связи с учётом новых таблиц оценённых атомных масс [7].

СТАНДАРТНЫЕ СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ
РАДИОНУКЛИДЫ ^{229}Th , ^{230}Th , ^{231}Th , ^{232}Th , ^{233}Th , ^{234}Th . ЭНЕРГИЯ,
АБСОЛЮТНАЯ ВЕРОЯТНОСТЬ ЭМИССИИ АЛЬФА-, БЕТА-, ГАММА- И
ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЙ И
ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА

^{229}Th $T_{1/2} = 7,922(24) \times 10^3$ лет		
Вид излучения	Энергия $E(\Delta E)$, кэВ	Вероятность эмиссии $P(\Delta P)$, % от числа распадов
α	4761(2)	1,0(4)
α	4797,8(12)	1,5(2)
α	4814,6(12)	9,30(8)
α	4838(2)	5,0(2)
α	4845,3(12)	56,2(2)
α	4901,0(12)	10,20(8)
α	4967,5(12)	5,97(6)
α	4978,5(12)	3,17(4)
α	5053(2)	6,6(1)
γ	31,50(5)	1,19(4)
γ	86,25(4)	1,3(1)
γ	86,40(5)	26,0(1)
γ	136,990(4)	1,18(3)
γ	156,409(9)	1,19(3)
γ	193,52(5)	4,4(10)
γ	210,853(3)	2,8(3)
$K\alpha_2$ (Ra)	85,44(2)	14,3(6)
$K\alpha_1$ (Ra)	88,48(2)	23,4(9)
$K\beta'_1$ (Ra)	99,432-100,738	8,2(4)
$K\beta'_2$ (Ra)	102,890-103,740	2,69(12)
XL (Ra)	10,622 – 18,354	106(7)

^{230}Th $T_{1/2} = 7,54(3) \times 10^4$ лет		
Вид излучения	Энергия $E(\Delta E)$, кэВ	Вероятность эмиссии $P(\Delta P)$, % от числа распадов
α	4479,6(16)	0,12(3)
α	4620,3(15)	23,40(10)
α	4686,8(15)	76,3(3)
γ	67,672(2)	0,38(3)
γ	143,872(4)	0,049(4)
$K\alpha_2$ (Ra)	85,44(2)	0,0042(3)
$K\alpha_1$ (Ra)	88,48(2)	0,0068(5)
$K\beta'_1$ (Ra)	99,432-100,738	0,00242(13)
$K\beta'_2$ (Ra)	102,890-103,740	0,00060(4)
XL (Ra)	10,622 – 18,354	7,7(7)

^{231}Th $T_{1/2} = 25,522(10)$ часов		
Вид излучения	Энергия $E(\Delta E)$, кэВ	Вероятность эмиссии $P(\Delta P)$, % от числа распадов
β	E_β 144,3(15)	2,7(4)
	$\langle E_\beta \rangle$ 38,1(5)	
β	E_β 208,1(15)	12,2(15)
	$\langle E_\beta \rangle$ 56,2(5)	
β	E_β 217,4(15)	1,36(24)
	$\langle E_\beta \rangle$ 58,9(5)	
β	E_β 289,3(15)	13(8)
	$\langle E_\beta \rangle$ 80,1(5)	
β	E_β 290,2(15)	41(16)
	$\langle E_\beta \rangle$ 80,4(5)	

^{231}Th $T_{1/2} = 25,522(10)$ часов		
β	E_{β} 307,4(15) $\langle E_{\beta} \rangle$ 85,6(5)	29(18)
γ	25,64(2)	13,9(7)
γ	58,5700(24)	0,480(16)
γ	81,2280(14)	0,905(23)
γ	82,0870(13)	0,418(13)
γ	84,2140(13)	6,70(7)
γ	89,95(2)	1,01(3)
γ	102,2700(13)	0,441(11)
$K\alpha_2$ (Pa)	92,283(2)	0,37(4)
$K\alpha_1$ (Pa)	95,866(2)	0,59(7)
$K\beta_1'$ (Pa)	107,595-109,072	0,21(2)
$K\beta_2'$ (Pa)	111,405-112,380	0,071(8)
LX (Pa)	11,3676-20,1126	65(3)

^{232}Th $T_{1/2} = 1,402(6) \times 10^{10}$ лет		
Вид излучения	Энергия $E(\Delta E)$, кэВ	Вероятность эмиссии $P(\Delta P)$, % от числа распадов
α	3810,0(14)	0,068(20)
α	3948,5(14)	21,0(13)
α	4011,2(14)	78,9(13)
γ	63,811(10)	0,259(15)
γ	140,88(1)	0,021(6)
$K\alpha_2$ (Ra)	85,44(2)	0,0017(5)
$K\alpha_1$ (Ra)	88,48(2)	0,0028(8)
$K\beta_1'$ (Ra)	99,432-100,738	0,00097(28)

^{232}Th $T_{1/2} = 1,402(6) \times 10^{10}$ лет		
K β'_2 (Ra)	102,890-103,740	0,00032(10)
XL (Ra)	10,622 – 18,354	7,2(3)

^{233}Th $T_{1/2} = 22,15(8)$ минут		
Вид излучения	Энергия E(ΔE), кэВ	Вероятность эмиссии P(ΔP), % от числа распадов
β	E_β 479,0(13)	1,19(3)
	$\langle E_\beta \rangle$ 139,7(4)	
β	E_β 689,7(13)	1,23(3)
	$\langle E_\beta \rangle$ 210,7 (4)	
β	E_β 1148,9(13)	10,4(4)
	$\langle E_\beta \rangle$ 378,0(4)	
β	E_β 1236,9(13)	50(6)
	$\langle E_\beta \rangle$ 411,4(5)	
β	E_β 1243,6(13)	34(6)
	$\langle E_\beta \rangle$ 414,0(5)	
γ	29,373(10)	2,17(7)
γ	86,477(10)	1,843(22)
γ	94,65(5)	0,775(9)
γ	170,60(6)	0,507(9)
γ	459,222(7)	0,989(12)
γ	669,901(16)	0,504(6)
K α_2 (Pa)	92,283(2)	0,39(1)
K α_1 (Pa)	95,866(2)	0,615(13)
K β_1' (Pa)	107,595-109,072	0,235(6)
K β_2' (Pa)	111,405-112,380	0,079(3)
LX (Pa)	11,3676-20,1126	8,2(9)

^{234}Th			$T_{1/2} = 24,10(3)$ суток
Вид излучения	Энергия $E(\Delta E)$, кэВ		Вероятность эмиссии $P(\Delta P)$, % от числа распадов
β	E_β	87(3)	1,6(6)
	$\langle E_\beta \rangle$	23(1)	
β	E_β	107(3)	6,5(7)
	$\langle E_\beta \rangle$	28(1)	
β	E_β	108(3)	14,1(12)
	$\langle E_\beta \rangle$	29(1)	
β	E_β	200(3)	77,8(15)
	$\langle E_\beta \rangle$	54(1)	
γ	63,30(2)		3,75(8)
γ	92,38(1)		2,18(19)
γ	92,80(2)		2,15(19)
$K\alpha_2$ (Pa)	92,283(2)		0,013(9)
$K\alpha_1$ (Pa)	95,866(2)		0,021(13)
$K\beta_1'$ (Pa)	107,595-109,072		0,007(5)
$K\beta_2'$ (Pa)	111,405-112,380		0,0025(16)
LX (Pa)	11,3676-20,1126		7,1(3)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R.G. Helmer, E. Browne and M.-M. Be. *International Decay Data Evaluation Project*. / J. of Nucl. Sci. Techn., 2002, Suppl. 2, vol.1, p. 455-458.
2. M.-M. Be, V. Chiste, C. Dulieu, X. Mougeot, V. Chechev, N. Kuzmenko, F. Kondev, A. Luca, M. Galan, A. Arinc, and X. Huang. *Table of Radionuclides (Vol.5 – $A = 22$ to 244). ^{207}Bi* . Monographie BIPM-5, vol. 5. Sevres: Bureau International des Poids et Mesures, 2010.
3. M.-M. Be, V. Chiste, C. Dulieu, X. Mougeot, V. Chechev, F. Kondev, A.L. Nichols, X. Huang, B. Wang. *Table of Radionuclides (Vol.7 – $A = 14$ to 245)*. / Sevres: Bureau International des Poids et Mesures, 2013.
4. *Recommended Data by the Decay Data Evaluation Project working group*. / URL: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm.
5. В.П. Чечев. *Методы получения оценённых значений ядерно-физических характеристик радиоактивных нуклидов*. // ГСССД МО 130-2000. - М.: 2008.
6. ГСССД 252-2010. Таблицы стандартных справочных данных. Энергия характеристического рентгеновского излучения при переходах в электронных оболочках атомов химических элементов с атомным номером от 4 до 100 / Бормашов В.С., Коростылев Е.В., Кузин А.Ю., Батурин А.С. – М.: 2010. / Росс. научн. – техн. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия. Депонировано в ФГУП “Стандартинформ”.
7. M. Wang, G. Audi, A.H. Wapstra, F.G. Kondev, M. MacCormick, X. Xu, B. Pfeiffer. *The AME2012 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs and references*. Chin. Phys. 2012. V. C36. P. 1603.
8. ENSDF-2014, Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF), NNDC, Brookhaven National Laboratory, USA. / URL: <http://www.nndc.bnl.gov>.
9. LOGFT program by Emeric M. and Sonzogni A. *Nuclear Structure and Decay Tools*, National Nuclear Data Center (NNDC), New York: Brookhaven National Laboratory. URL: <http://www.nndc.bnl.gov/logft>.
10. R.G. Helmer and C. van der Leun. *Recommended standards for γ -ray energy calibration (1999)*. / Nucl. Instr. Methods Phys. Res. 2000. V. A450. P. 35.

11. J.A. Bearden. *X-Ray Wavelengths*. / Rev. Mod. Phys. 1967. V. 39. P. 78.
12. E. Schönfeld and H. Janßen. *Evaluation of Atomic Shell Data*. / Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 1996. V. A369. P. 527.
13. E. Schönfeld and H. Janßen. *Calculation of emission probabilities of X-rays and Auger electrons emitted in radioactive disintegration processes*. / Appl. Rad. Isot. 2000. V. 52. P. 595.
14. BrIcc Program Package v. 2.3S. *Nuclear Structure and Decay Tools*, National Nuclear Data Center (NNDC), New York: Brookhaven National Laboratory. URL: <http://www.nndc.bnl.gov>
15. T. Kibedi, T.W. Burrows, M.B. Trzhaskovskaya, P.M. Davidson, and C.W. Nestor, Jr, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A589 (2008) 202.
16. H. Kikunaga, T. Suzuki, M. Nomura, T. Mitsugashira, A. Shinohara. *Determination of the half-life of the ground state of ^{229}Th by using ^{232}U and ^{233}U decay series*. Phys. Rev. 2011. V. C 84, 014316.
17. Z. Varga, A. Nicholl, K. Mayer. *Determination of the ^{229}Th half-life*. Phys. Rev. 2014. V. C 89, 064310.