

Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов

УДК 621.386.12

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-2-6-17>

## Передача информации в рентгеновском диапазоне частот электромагнитного излучения

Г. А. Тимофеев<sup>✉</sup>, Н. Н. Потрахов, А. Ю. Грязнов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"  
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ [gennady92@gmail.com](mailto:gennady92@gmail.com)

### Аннотация

**Введение.** Системы передачи информации в рентгеновском диапазоне частот электромагнитного излучения – рентгеновские системы связи (РСС) – обладают рядом преимуществ по сравнению с радио- и оптическими системами связи. Наиболее существенными из них с точки зрения практического использования являются: более высокая скрытность и устойчивость к внешним помехам, а также к перехвату и дешифровке. Актуальна разработка методики расчета основных параметров системы рентгеновской связи – дальности и скорости передачи информации, а также описание конструкции и результатов экспериментальных исследований действующего макета системы рентгеновской связи.

**Цель работы.** Разработка физико-технических основ систем передачи информации в рентгеновском диапазоне частот электромагнитного излучения.

**Материалы и методы.** Использована оригинальная методика расчета спектров рентгеновского излучения с учетом коэффициента ослабления в среде распространения.

**Результаты.** Предложена технология передачи информации в рентгеновском диапазоне частот электромагнитного излучения, включая методику расчета основных параметров: дальности и скорости передачи, а также – конструкцию действующего макета системы рентгеновской связи. Показана зависимость между этими параметрами и режимами работы рентгеновской трубки. Расчетные и экспериментальные данные совпадают с удовлетворительной для практического использования точностью. На их основании можно ожидать, что при напряжении на рентгеновской трубке 200 кВ и токе трубки 1 А в импульсе длительностью 1 мкс дальность передачи информации на воздухе составит около 250 м. Максимально возможная скорость передачи информации при использовании разработанной рентгеновской трубки составит 5 Мбит/с.

**Заключение.** Результаты аналитической оценки и экспериментальных исследований показали, что дальность и скорость передачи информации РСС определяются исключительно энергетическими возможностями передатчика: напряжением и средним током рентгеновской трубки во время генерирования пакета (серии) импульсов рентгеновского излучения, а также длительностью отдельного импульса рентгеновского излучения. Сделан вывод о том, что дальнейшее развитие РСС обусловлено, в первую очередь, разработкой специализированных источников рентгеновского излучения, генерирующих серии импульсов с минимально возможной длительностью каждого импульса в серии. С учетом специфических особенностей РСС могут составить реальную конкуренцию традиционным радио- и оптическим системам связи для связи и навигации.

**Ключевые слова:** рентгеновское излучение, передача информации, системы связи, дальность передачи, скорость передачи

**Для цитирования:** Тимофеев Г. А., Потрахов Н. Н., Грязнов А. Ю. Передача информации в рентгеновском диапазоне частот электромагнитного излучения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 2. С. 6–17. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-2-6-17

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 15.02.2021; принята к публикации после рецензирования 16.03.2021; опубликована онлайн 29.04.2021

---

© Тимофеев Г. А., Потрахов Н. Н., Грязнов А. Ю., 2021



## Data Transmission in the X-Ray Emission Frequency Range of Electromagnetic Radiation

Gennadiy A. Timofeev<sup>✉</sup>, Nikolay N. Potrakhov, Artem Yu. Gryaznov

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ gennady92@gmail.com

### Abstract

**Introduction.** Data transmission systems using the X-ray frequency range of electromagnetic radiation – X-ray communication system (XCS) have a number of advantages in comparison with radio or optical communication systems. The most significant advantages for practical use are their higher stealth and external interferences resistance, as well as stability against interception and decryption. It is of importance to develop a method for calculating the main parameters of an X-ray communication system: the range and speed of data transmission. In addition, the construction design and results of experimental research of the current X-ray communication system should be provided.

**Aim.** To develop physical and technical foundations of data transmission systems using the X-ray frequency range of electromagnetic radiation.

**Materials and methods.** We used an original method of calculating the X-ray emission spectrum, taking into account the attenuation coefficient in the propagation medium.

**Results.** A technique for data transmission using the X-ray frequency range of electromagnetic radiation was suggested, including a method for calculating basic parameters e.g. the transmission range and speed, as well as the construction design of the current X-ray communication system model. Relations between these parameters and the operating modes of the X-ray tube were shown. The calculated and experimental data were in good agreement, sufficient for practical use. On their basis, it can be expected that at a voltage across the X-ray tube of 200 kV and the tube current of 1A in a 1- $\mu$ s pulse, data transmission range in free air will be about 250 m. The maximum possible data transmission rate when using the developed X-ray tube will be 5 Mbit/s.

**Conclusions.** The results of analytical and experimental investigations showed that the range and rate of data transmission of the XCS are exclusively determined by the transmitter energetic capabilities: by voltage and average the X-ray tube current during the generation of packages (series) of the X-ray pulses, as well as by the duration of a single X-ray pulse. It is concluded that the prospects of XCS depend on the development of specialized X-ray sources generating a series of pulses with the minimum possible duration of every single pulse in a series. Taking into account the specific features, XCS can become an alternative to conventional radio and optical systems for communication and navigation.

**Keywords:** X-ray emission, data transmission, communication systems, transmission range, transmission rate

**For citation:** Timofeev G. A., Potrakhov N. N., Gryaznov A. Yu. Data Transmission in the X-Ray Emission Frequency Range of Electromagnetic Radiation. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 2, pp. 6–17. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-2-6-17

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

Submitted 15.02.2021; accepted 16.03.2021; published online 29.04.2021

**Введение.** В настоящее время рентгеновские системы передачи информации практически не используются для осуществления беспроводной связи между различными объектами. В основном это можно объяснить радиационной опасностью от рентгеновского излучения и успешным применением радио- и оптических систем связи, удовлетворяющих практически всем современным потребностям.

Перспективы развития рентгеновских систем связи (РСС) обусловлены некоторыми специфическими свойствами электромагнитного излучения в рентгеновском (эксагерцовом – условно от 1 до  $100 \cdot 10^{18}$  Гц) диапазоне частот.

Теоретически существует ряд факторов, которые в целом позволяют РСС конкурировать с радио- и оптическими системами связи в некоторых, весьма важных, областях. Так, использование

рентгеновского излучения потенциально позволяет:

- повысить проникающую способность сигнала при прохождении сквозь плотную среду, например пыльные или снежные вихри;
- обеспечить устойчивую связь в условиях сильных радио- и оптических помех или активного противодействия;
- передать сигнал непосредственно через металлический корпус, например, летательного аппарата или плазму, окружающую спускаемый космический аппарат (КА) при взлете и посадке.

По предварительной оценке, наиболее рациональным применением РСС может быть:

- связь группы космических кораблей, в том числе маневрирующих;
- связь со спускаемым космическим аппаратом или другими высокоскоростными объектами, окруженными облаком плазмы, "непрозрачной" для радиочастотного излучения;
- связь в дальнем космосе;
- стыковка КА или их посадка на планеты, спутники планет, астероиды и т. д.;
- навигация КА по искусственным или естественным источникам рентгеновского излучения.

Первым устройством такого рода следует считать разработанный в 1968 г. коллективом ЦНИИ РТК гамма-лучевой высотомер "Кактус", управляющий системой включения двигателей мягкой посадки космических кораблей [1]. В дальнейшем физико-технические основы РСС, предназначенные для целей дальнометрии, были рассмотрены в [2].

Последние несколько лет ведутся активные практические и теоретические исследования в области создания технологий рентгеновской связи, дальнометрии и навигации. Например, в США разработана экспериментальная установка, на которой выполнены успешные эксперименты по передаче звуковой информации в космосе. Работы ведутся специалистами центра GODDARD NASA и финансируются NASA и DARPA. С 2018 г. NASA проводит на американском сегменте МКС эксперименты по измерению дальности рентгеновской связи. По мнению специалистов NASA, в перспективе средства космической рентгеновской связи смогут работать в дальнем космосе со скоростью передачи информации десятки гигабит в секунду [3]. К настоящему времени достаточно большое число статей о системах рентгеновской связи [4, 5], навигации по рентгеновским пульсарам [6, 7], а также о возмож-

ности применения рентгеновской навигационной системы XNAV для рентгеновской связи [8] опубликовано в Китае.

Очевидно, что применение РСС в космонавтике имеет большие перспективы. Однако, как показывает практика, РСС могут найти применение и в других областях техники, например при создании систем мягкой посадки летательных аппаратов в условиях недостаточной видимости (в том числе неблагоприятные метеорологические условия) и при обледенениях [9].

В настоящее время исследования в области разработки РСС проводятся на кафедре электронных приборов и устройств СПбГЭТУ. В качестве источника рентгеновского излучения используется первая отечественная рентгеновская трубка с фотокатодом и электронным умножением тока фотокатода (ФРТ), разработанная совместно с ЦНИИ "Электрон" и ЗАО "Светлана-Рентген" [10, 11].

**Теоретическая оценка дальности передачи информации в рентгеновском диапазоне частот электромагнитного излучения.** В потоке излучения, генерируемого рентгеновской трубкой (РТ), присутствует целый набор отдельных квантов, каждый со своей энергией, составляющих так называемый спектр рентгеновского излучения (РИ) этой трубки. Энергия каждого кванта  $E_i$  (в килоэлектрон-вольтах) в спектре РИ лежит в диапазоне значений от минимальной  $E_{\min}$  до максимальной  $E_{\max}$ . Минимальная энергия  $E_{\min}$  соответствует энергии, при которой еще возможен выход квантов РИ через выходное окно рентгеновской трубки. Она зависит от материала и толщины выходного окна РТ. Обычно  $E_{\min}$  находится в диапазоне энергий от 5 до 10 кэВ. Максимальная энергия определяется напряжением на рентгеновской трубке  $U$ , кВ:

$$E_{\max} = eU,$$

где  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона.

При этом существует строгая зависимость между значением энергии кванта  $E_i$  и количеством  $n$  квантов с этой энергией в спектре излучения РТ [12]. В общем случае спектр рентгеновского излучения характеризуется спектральной плотностью и спектральной интенсивностью.

Спектральная плотность  $q$  определяется количеством квантов  $n$  с определенной энергией  $E_i$ , генерируемых в единицу времени и в единицу телесного угла,  $\frac{\text{шт.}}{\text{с} \cdot \text{ср}}$ :

$$q = n E_i. \quad (1)$$

Спектральная интенсивность  $j$  определяется произведением количества квантов с одинаковой энергией на значение этой энергии,  $\frac{\text{кэВ}}{\text{с} \cdot \text{ср}}$ :

$$j(E_i) = n(E_i) E_i.$$

Соответственно, суммарное количество квантов  $N$  (в штуках) в спектре рентгеновского излучения определяется интегрированием (1) по всему диапазону их энергий в этом спектре:

$$N = \int_0^{E_{\max}} n(E_i) dE.$$

Суммарная (интегральная) интенсивность  $I$  (в килоэлектрон-вольтах) генерируемого рентгеновского излучения определяется по выражению

$$I = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} n(E_i) E_i dE = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} j(E_i) dE.$$

В качестве примера на рис. 1 представлена зависимость спектральной интенсивности излучения от энергии квантов (1 – фильтрация излучения отсутствует; 2 – фильтрация Al толщиной 3 мм). Данные получены с помощью программы для моделирования спектров излучения "Спектрон". Расчеты выполнены при напряжении на рентгеновской трубке  $U = 75$  кВ, токе  $i = 1$  мА, расстоянии до точки измерения  $R = 1$  м и порядковом номере материала мишени (W) анода рентгеновской трубки –  $Z = 74$ .

Подробно практические вопросы расчета характеристик спектра рентгеновского излучения рассмотрены в [13].

Как известно, для точечного источника рентгеновского излучения (ИРИ), т. е. источника, размеры которого много меньше расстояния  $R$  между самим источником и детектором излучения, интегральная интенсивность излучения при условии отсутствия ослабления средой распространения

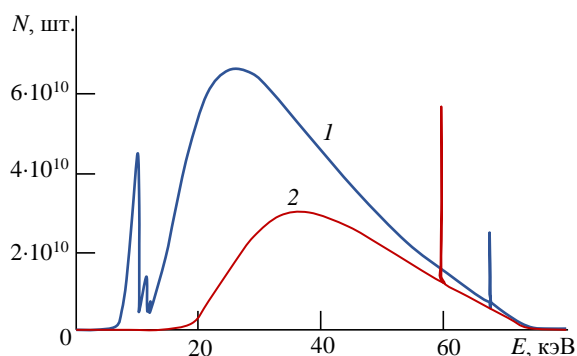


Рис. 1. Спектр рентгеновского излучения рентгеновской трубки с массивной мишенью

Fig. 1. X-ray spectrum of an X-ray tube with a massive target уменьшается пропорционально квадрату этого расстояния [14]:

$$I(R) = \frac{I_0}{4\pi R^2}, \quad (2)$$

где  $I_0$  – интегральная интенсивность рентгеновского излучения в точке расположения ИРИ.

При прохождении рентгеновского излучения через среду распространения количество квантов и их энергия уменьшаются вследствие взаимодействия с молекулами, атомами и электронами вещества этой среды.

Закон уменьшения интенсивности излучения описывается в виде

$$I(\mu, R) = I_0 e^{-\mu(E)R}, \quad (3)$$

где  $\mu(E)$  – коэффициент ослабления рентгеновского излучения веществом среды на единицу расстояния, проходимого излучением в среде.

Коэффициент ослабления излучения  $\mu$  имеет сложную зависимость от энергии кванта первичного потока рентгеновского излучения. В качестве примера в табл. 1 приведены значения этого коэффициента для воздуха в диапазоне энергий квантов от 10 до 300 кэВ [15].

На практике интегральная интенсивность рентгеновского излучения на расстоянии  $R$  от ИРИ оперативно может быть рассчитана по формуле

$$I_0 = \frac{k i Z}{4\pi R^2} U_{\max}^2,$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $i$  – ток рентгеновской трубки;  $Z$  – порядковый номер материала мишени анода рентгеновской трубки;

Табл. 1. Зависимость значений коэффициента ослабления  $\mu$  от энергии  $E$  для воздуха

Table 1. Dependence of the attenuation coefficient  $\mu$  on the energy value  $E$  for free air

$E$ , кэВ	10	30	40	50	75	100	150	200	300
$\mu \cdot 10^2, \text{м}^{-1}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$3.4 \cdot 10^{-4}$	$2.8 \cdot 10^{-4}$	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1.7 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$

$U$  – напряжение на рентгеновской трубке;  $R$  – расстояние до точки измерения.

С учетом (2) и (3) общее выражение для закона уменьшения интенсивности рентгеновского излучения при оценке дальности его распространения от ИРИ будет иметь вид

$$I = \frac{I_0}{4\pi R^2} e^{-\mu(E_{\text{эф}})R} = \frac{k i Z U^2}{4\pi R^2} e^{-\mu(eU_{\text{эф}})R} S_d,$$

где  $E_{\text{эф}} = eU_{\text{эф}}$  – эффективная энергия квантов, соответствующая эффективному значению напряжения на рентгеновской трубке ( $U_{\text{эф}} = 2/3U_{\text{max}}$ );  $S_d = \pi r^2$  – площадь входного окна детектора РИ с радиусом  $r$  (в метрах).

В табл. 2 представлены результаты расчетов количества квантов рентгеновского излучения  $N$  в зависимости от расстояния  $R$  до точки измерения, а также от напряжения  $U$  на рентгеновской трубке ИРИ. Расчеты выполнены при токе трубки 1 мА и площади входного окна детектора  $10^{-4} \text{ м}^2$  для двух сред распространения РИ: вакуум и воздух.

Результаты расчетов в графическом виде представлены на рис. 2. Они показывают, что влияние ослабления воздухом на количество квантов значительно сказывается лишь, начиная с расстояний свыше 100 м. Кроме того, поскольку количество

квантов, генерируемых рентгеновской трубкой ИРИ, прямо пропорционально ее току, данные позволяют оценить дальность распространения РИ при значениях тока, существенно превышающих 1 мА. Так, наиболее мощные отечественные рентгеновские трубки серии ИМА имеют ток в импульсе до нескольких килоампер.

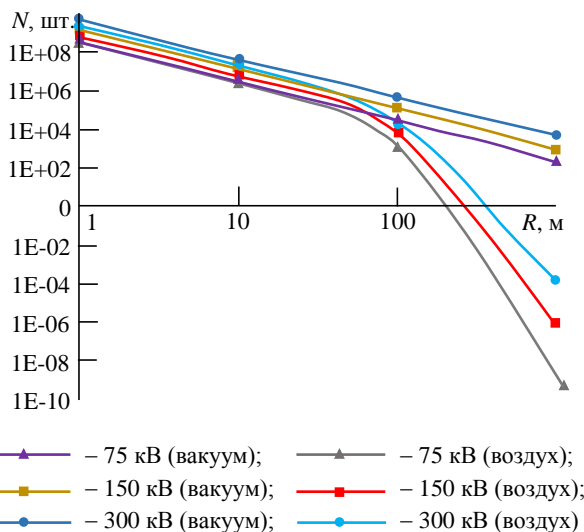


Рис. 2. Зависимость количества квантов  $N$  от расстояния  $R$  и напряжения на рентгеновской трубке  $U$

Fig. 2. Dependence of quanta number  $N$  on the range  $R$  and the voltage  $U$  on the X-ray tube

Табл. 2. Зависимость количества квантов  $N$  от расстояния  $R$  и напряжения  $U$  на рентгеновской трубке

Table 2. Dependence of quanta number  $N$  on the range  $R$  and the voltage  $U$  on the X-ray tube

$N$ , шт.		$U$ , кВ				
		75	100	150	200	300
		Вакуум				
$R$ , м	1	2.65E+08	5.37E+08	1.23E+09	2.04E+09	4.54E+09
	10	2.65E+06	5.37E+06	1.23E+07	2.04E+07	4.54E+07
	100	2.65E+04	5.37E+04	1.23E+05	2.04E+05	4.54E+05
	1000	2.65E+02	5.37E+02	1.23E+03	2.04E+03	4.54E+03
	10 000	2.65E+00	5.37E+00	1.23E+01	2.04E+01	4.54E+01
		Воздух				
$R$ , м	1	2.30E+08	4.50E+08	5.50E+08	1.76E+09	2.20E+09
	10	1.30E+06	2.70E+06	4.20E+06	1.11E+07	1.70E+07
	100	5.44E+02	1.56E+03	4.04E+03	1.06E+04	2.32E+04
	1000	6.00E-10	1.44E-08	4.50E-07	4.95E-06	1.10E-04

Экспериментальная оценка дальности передачи информации в рентгеновском диапазоне частот электромагнитного излучения проводилась с помощью специального стенда, структурная схема которого приведена на рис. 3.

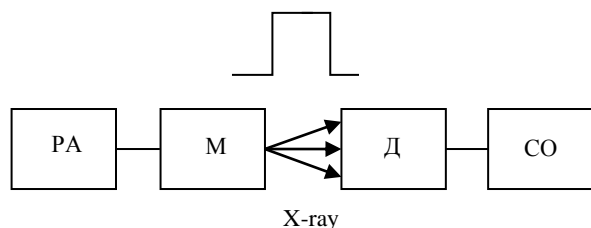


Рис. 3. Структурная схема стенда для экспериментальной оценки дальности передачи информации в рентгеновском диапазоне

Fig. 3. A block scheme of a stand for experimental evaluation of the range of data transmission in the X-ray emission range

В качестве ИРИ использовался промышленный рентгеновский аппарат РА на максимальное напряжение 200 кВ, предназначенный для работы в непрерывном режиме с током рентгеновской трубки до 10 мА. Для модуляции потока рентгеновского излучения РА использовалось механическое устройство М, которое открывало свинцовую заглушку выходного окна рентгеновского аппарата на время  $\tau = 300$  мкс с частотой 50 Гц. В качестве детектора рентгеновского излучения Д использовался кремниевый фотодиод площадью около  $3000 \text{ мм}^2$ . На выходном окне фотодиода располагался сцинтиллятор в форме диска диаметром 60 мм, толщиной 2 мм из CsI(Tl), преобразующий рентгеновское излучение в оптическое [16].

Схема обработки СО интегрировала выходной ток фотодиода в течение импульса рентгеновского излучения и преобразовывала суммарный электрический заряд  $Q$  в 20-разрядный цифровой код. Соответственно, суммарная энергия всех квантов, зарегистрированных детектором за время импульса в условиях эксперимента, оценивалась по формуле

$$I = \frac{Q}{k_{\text{сц}} k_{\text{т}} \Phi_{\text{д}}},$$

где  $k_{\text{сц}} = 0.11$  – коэффициент конверсионной эффективности сцинтиллятора (отношение энергии сгенерированного оптического излучения к поглощенной в сцинтилляторе энергии рентгеновского излучения);  $k_{\text{т}} = 0.4$  – коэффициент световыхода сцинтиллятора (количество квантов оптического излучения, испускаемых сцинтиллятором при попадании в него одного кванта рентгеновского излучения);  $\Phi_{\text{д}} = 0.38 \text{ А/Вт}$  – фоточувствительность фотодиода (отношение выходного тока фотодиода к входной энергии оптического излучения).

С целью оценки количества квантов  $N$ , генерируемых за время импульса  $\tau$ , для каждого значения напряжения трубки ИРИ выбиралось некоторое условное значение энергии одного кванта –  $E_{\text{эф}}$ , составляющее 0.75 от максимального значения энергии квантов в спектре ИИ.

Результаты экспериментальной оценки дальности распространения пакета квантов, содержащихся в импульсе рентгеновского излучения длительностью 300 мкс, в зависимости от напряжения и тока рентгеновской трубки ИРИ на воздухе представлены в табл. 3 [17, 18].

Табл. 3. Зависимость количества квантов рентгеновского излучения от расстояния между источником рентгеновского излучения и точкой измерения (эксперимент)

Table 3. Dependence of the quanta number of X-ray on the range between source-ray transmitter and target measurement point (experiment)

U, кВ	$E_{\text{эф}}$ , кэВ	i, мА	R, м			
			6.5		9	
			$I \cdot 10^3$ , кэВ	N, шт.	$I \cdot 10^3$ , кэВ	N, шт.
75	56	5	45	803	26	577
100	75	1	46,2	616	27	360
150	112	1	210	1875	116	1035
200	150	1	498	3320	275	1833

Экстраполируя полученные экспериментальные результаты, можно оценить расстояние, на котором будет зарегистрировано условно минимальное количество квантов рентгеновского излучения, необходимое для передачи единицы информации, например в двоичном коде.

С этой целью можно принять, что, во-первых, для передачи в двоичном коде одного бита информации – логической "1" достаточно зарегистрировать детектором приемника рентгеновского излучения (ПРИ) за время входного импульса рентгеновского излучения не менее трех квантов. Соответственно для логического "0" – отсутствие зарегистрированных квантов. Во-вторых, для повышения помехозащищенности, например от фонового космического излучения, в составе ПРИ будут использованы не менее трех независимых детекторов, параллельно регистрирующих кванты (данные вопросы планируется подробно изучить в рамках отдельного исследования).

В этом случае предельной дальностью передачи рентгеновского сигнала станет расстояние, на котором через площадь входного окна ПРИ за время импульса рентгеновского излучения пролетает не менее 9 квантов. Экстраполяция зависимостей, представленных в табл. 2 и 3, позволяет оценить предельную дальность для конкретного режима работы ПРИ по напряжению, току и длительности импульса рентгеновского излучения.

Аппроксимация экспериментальных данных (табл. 3) с учетом прямо пропорциональной зависимости количества квантов от тока рентгеновской трубки и от длительности импульса рентгеновского излучения для напряжения 200 кВ, тока 1 А (характерное значение импульсного тока для

некоторых современных типов источников электронов), длительности импульса 1 мкс и площади детектора  $30 \text{ см}^2$  показала дальность передачи около 250 м. Аппроксимация теоретических данных (табл. 2) для этих же условий – 594 м.

Вполне допустимое для подобных оценок расхождение результатов объясняется тем, что в оценочных расчетах, основанных на экспериментальных данных, было принято допущение о монохроматичности рентгеновского излучения – одинаковой энергии  $E_{эф}$  для всех квантов в импульсе.

В теоретических расчетах программа учитывает весь спектр энергий квантов этого импульса.

Очевидно, что предельная дальность передачи информации зависит от конструктивных ограничений по массе, габаритам и энергопотреблению технических средств РСС, определяющих интенсивность рентгеновского сигнала, а также от скорости передачи информации.

Для экспериментальной оценки возможной скорости передачи информации в рентгеновском диапазоне частот электромагнитного излучения использовался стенд на основе специально разработанной первой отечественной рентгеновской трубки с фотокатодом и электронным умножением тока фотокатода. Внешний вид ФРТ и структурная схема стенда для исследования ее характеристик представлены на рис. 4, а и б соответственно. Обозначения на рис. 4: 1 – световод; 2 – фотокатод ФК; 3 – фотоэлектроны; 4 – модулятор М (фокусирующий электрод); 5 – вторичные электроны; 6 – диноды; 7 – сцинтиллятор; 8 – фотоны; 9 – рентгеновская трубка; 10 – анод; 11 – источник питания секции фотоэлектронного умножителя ФЭУ; 12 – источник

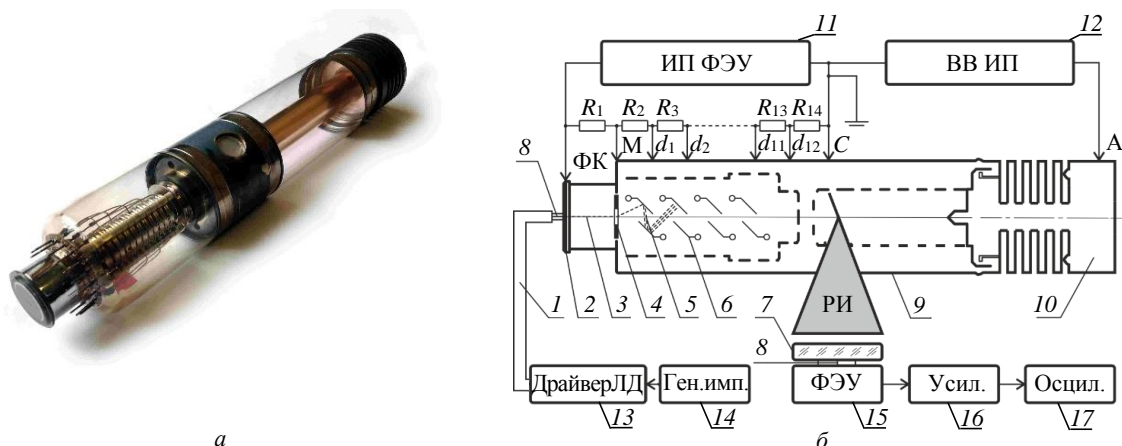


Рис. 4. Рентгеновская трубка с фотокатодом (а) и структурная схема стенда для исследования ее характеристик (б)

Fig. 4. X-ray tube with a photocathode (a) and a block scheme of a stand for studying its characteristics (b)

питания высоковольтный; 13 – лазерный диод со специализированным драйвером; 14 – генератор импульсов; 15 – фотоэлектронный умножитель ФЭУ; 16 – импульсный усилитель; 17 – осциллограф.

Как уже отмечалось, принципиальным отличием этой трубки от всех известных конструкций рентгеновских трубок является использование в качестве катодного узла ФЭУ с 12-каскадной диодной системой ( $d_1 \dots d_{12}$ ).

Стенд для экспериментального исследования характеристик ФРТ содержит источники напряжения (ИП) для ФЭУ и анода ФРТ, оптический модулятор (ОМ) для засветки фотокатода, а также детектор рентгеновского излучения.

В качестве ОМ использовался лазерный светодиод CWLD и специализированный драйвер iC-NKb. Максимум интенсивности в спектре оптического излучения светодиода располагается на длине волны 455 нм и соответствует максимуму чувствительности фотокатода ФРТ. Для регистрации рентгеновского излучения использовался детектор на основе сцинтиллятора с минимальным временем высвечивания (длительности сцинтилляционного сигнала) и ФЭУ-85 с предусилителем.

В ходе экспериментальных исследований была определена минимально возможная длительность импульса рентгеновского излучения, генерируемого ФРТ. Критерий оценки минимальной длительности – отсутствие искажений формы передаваемого импульса рентгеновского излучения, в том числе уменьшение его амплитуды.

В качестве примера на рис. 5 представлены осциллограммы электрических сигналов: *a* – "входного", подаваемого драйвером на лазерный диод; *б* – "выходного", снимаемого с ФЭУ детектора рентгеновского излучения.

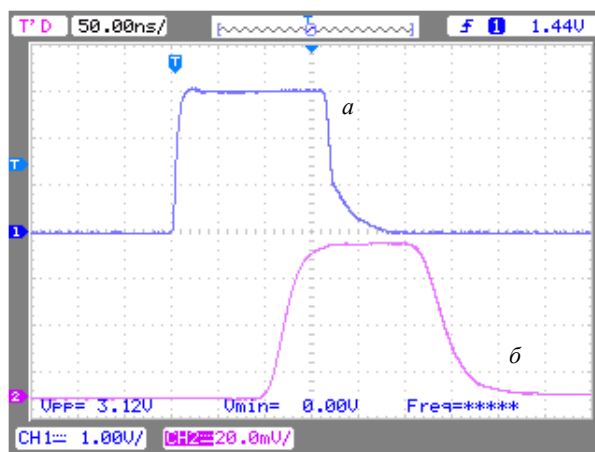


Рис. 5. Осциллограммы электрических сигналов при передаче одиночного импульса

Fig. 5. Waveforms of electrical signals when transmitting a single pulse

Длительность фронта и спада импульса рентгеновского излучения на осциллограмме составляет не более 40 нс (рис. 5, *б*), что позволяет считать минимальную длительность одного бита в рентгеновском сигнале при использовании данной ФРТ равной 100 нс.

При такой длительности бита максимальная скорость передачи информации с помощью РСС на основе разработанной ФРТ теоретически составляет 5 Мбит/с [19].

**Современные технические средства для передачи информации в рентгеновском диапазоне частот электромагнитного излучения.** В состав передатчика РСС (рис. 6) помимо ФРТ входят элементы, преобразующие аудиосигнал в цифровой оптический сигнал: микрофон, аналоговый усилитель, аналого-цифровой преобразо-

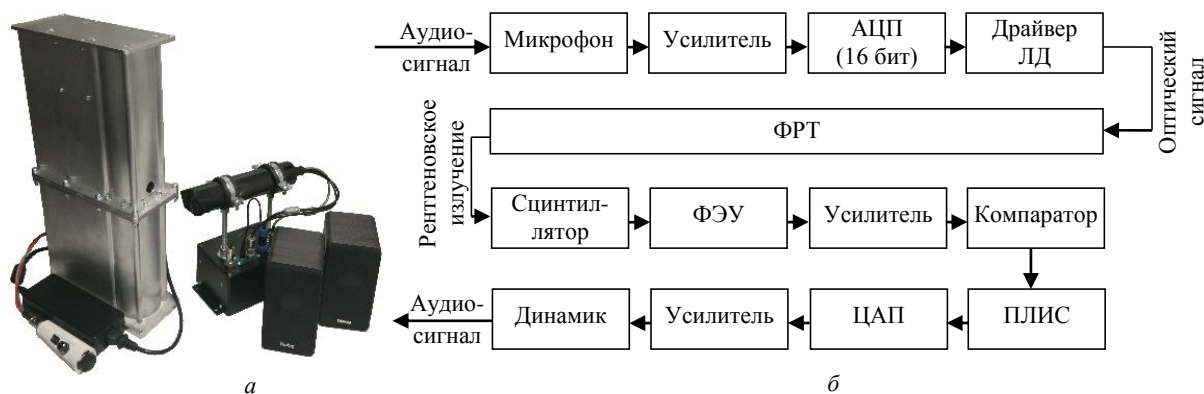


Рис. 6. Внешний вид макета (*a*) и структурная схема РСС (*б*)

Fig. 6. The appearance of the model (*a*) and block scheme of the XCS (*б*)



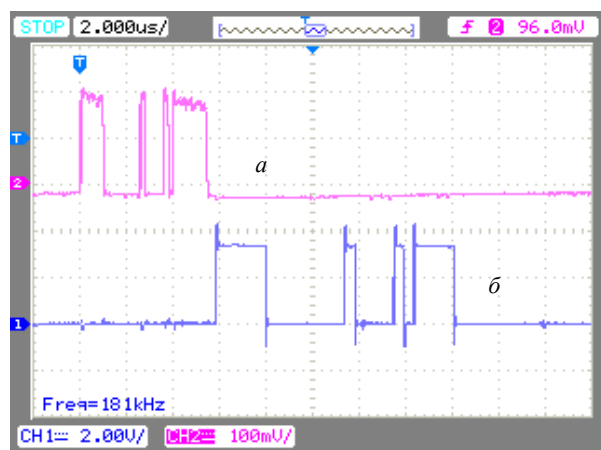


Рис. 7. Осциллограммы электрических сигналов при передаче пакета импульсов (фрагмент аудиозаписи)

Fig. 7. Waveforms of electrical signals during transmission of a pulses package (fragment of an audio recording)

ватель (АЦП) и лазерный светодиод со специализированным драйвером. В состав приемника входят детектор рентгеновского излучения на основе сцинтиллятора и ФЭУ, импульсный усилитель, а также схема обработки импульсов: формирователь импульсов (компаратор), программируемая логическая интегральная схема ПЛИС, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и аналоговый усилитель с громкоговорителем.

На рис. 7 показаны осциллограммы электрических сигналов, иллюстрирующие процесс передачи фрагмента высококачественной музыкальной записи, преобразованной в 16-разрядный цифровой код с частотой дискретизации 44 кГц: *a* – на выходе АЦП (передаваемый пакет импульсов) и *б* – на входе ЦАП (принятый пакет импульсов). Разная длительность импульсов

в пакетах на представленных осциллограммах обусловлена особенностями постобработки принятого сигнала.

Передача аудиосигнала проводилась при напряжении на ФРТ 40 кВ, среднем токе 0.5 мА, импульсном токе 15 мА в импульсе длительностью 250 нс. Соответственно, длительность одного бита информации составляла 250 нс. Подсчет квантов не производился, определение "0" или "1" проводилось с помощью компаратора на выходе детектора, работающего в интегральном режиме. Дальность передачи, ограниченная уровнем шумов приемника рентгеновского излучения, составила 0.5 м, скорость передачи – 700 кбит/с.

**Выводы.** Результаты аналитической оценки и экспериментальных исследований показали, что дальность и скорость передачи информации РСС определяется исключительно энергетическими возможностями передатчика: напряжением и средним током рентгеновской трубки во время генерирования пакета (серии) импульсов рентгеновского излучения, а также длительностью отдельного импульса рентгеновского излучения.

При этом дальнейшее развитие РСС обусловлено в первую очередь разработкой специализированных источников рентгеновского излучения, генерирующих серии импульсов с минимально возможной длительностью каждого импульса в серии.

С учетом специфических особенностей РСС могут составить реальную конкуренцию традиционным радио- и оптическим системам связи для связи и навигации в космосе, в том числе дальнем, а также в системах мягкой посадки.

## Список литературы

1. Железняков А. А началось все с "Кактуса" // Инновации. 2013. №1 (171). С. 13–17.
2. Герчиков Ф. Л. Управляемое импульсное рентгеновское излучение в приборостроении. М.: Энергоатомиздат, 1987. 88 с.
3. Mitchell J. W. NASA Set to Demonstrate X-ray Communications in Space // Cutting edge Goddard's Emerging Technologies. Winter. 2019. Vol. 15, iss. 2. P. 9–10.
4. X-ray communication based simultaneous communication and ranging / Song Shi-Bin, Xu Lu-Ping, Zhang Hua, Gao Na // Chin. Phys. B. 2015. Vol. 24, iss. 9 (094215). doi: 10.1088/1674-1056/24/9/094215
5. Next Generation of Space Wireless Communication Technology Based on X-ray / B. Zhao, C. Wu, L. Sheng, Y. Liu // Acta Photonica Sin. 2013. Vol. 42. P. 801–804. doi: 10.3788/gzxb20134207.0801
6. Emadzadeh A. A., Speyer J. L. Relative navigation between two spacecraft using X-ray pulsars // IEEE Trans. Control Syst. Technol. 2011. Vol. 19, iss. 5. P. 1021–1035. doi: 10.1109/TCST.2010.2068049
7. Development of XNAV algorithm and cycle ambiguity resolution / Q. Li, L. Jianye, Z. Guanglou, X. Zhi, Yuhang Xuebao // J. Astronautics. 2009. Vol. 30, iss. 4. P. 1460–1465.

8. Novel X-ray Communication Based XNAV Augmentation Method Using X-ray Detectors / Shibin Song, Luping Xu, Hua Zhang, Yuanjie Bai // *Sensors*. 2015. Vol. 15, iss. 9. P. 22325–22342. doi: 10.3390/s150922325

9. Экспериментальная оценка прохождения рентгеновского сигнала в условиях осадков и других условий распространения / В. В. Гребенщиков, М. В. Лобанов, А. Г. Егоров, В. П. Назарук, А. И. Нечаев, Н. Н. Потрахов, Г. А. Тимофеев // VI Всерос. науч.-практ. конф. производителей рентгеновской техники: материалы конф. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2019. С. 65–69.

10. Рентгеновская трубка с фотокатодом / В. Н. Лукьянов, Г. А. Мамаева, О. А. Филиппова, В. М. Фролов, Н. Н. Потрахов // III Всерос. науч.-практ. конф. производителей рентгеновской техники. Программа и материалы конф. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2016. С. 20–21.

11. Рентгеновская трубка с катодным узлом на базе фотоэлектронного умножителя и перспективы ее применения / Р. В. Кирпиченко, В. Н. Лукьянов, Д. Е. Миронов, О. А. Филиппова, Г. А. Мамаева, Н. Н. Потрахов, Г. А. Тимофеев, А. С. Баклин // IV Всерос. науч.-практ. конф. производителей рентгеновской техники. Программа и материалы конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2017. С. 31–34.

12. Артемьев Б. В. Рентгеновская толщинометрия металлов. М.: Машиностроение-1, 2002. 104 с.

13. Потрахов Н. Н., Грязнов А. Ю. Особенности

"сверхжесткой" съемки в микрофокусной рентгенодиагностике // *Мед. техника*. 2005. № 5. С. 14–19.

14. Артемьев Б. В., Буклей А. А. Радиационный контроль. М.: Изд. дом "Спектр", 2011. 192 с.

15. Лейпунский О. И. Гамма-излучение атомного взрыва. М.: Атомиздат, 1959. 154 с.

16. Калинин Б. Д. Исследование рентгеновского излучения и развитие рентгеновского приборостроения в Санкт-Петербурге // *Аналитика и контроль*. 2020. Т. 24, № 3. С. 201–229. doi: 10.15826/analitika.2020.24.3.005

17. Источник импульсного рентгеновского излучения и способ беспроводной передачи данных на его основе / В. В. Гребенщиков, А. С. Дмитриев, А. И. Нечаев, Н. Н. Потрахов, Г. А. Тимофеев // *Физические основы приборостроения*. 2020. № 8(4). С. 38–47.

18. Experimental test-bench estimation of xray attenuation of precipitation and other conditions / V. V. Grebenshchikov, M. V. Lobanov, A. G. Egorov, V. P. Nazaruk, A. I. Nechaev, N. N. Potrakhov, G. A. Timofeev // *AIP Conf. Proc.* 2020. Vol. 2250, iss. 1. doi: 10.1063/5.0020836

19. Тимофеев Г. А., Потрахов Н. Н., Нечаев А. И. Экспериментальные исследования рентгеновского канала связи // V Всерос. науч.-практ. конф. производителей рентгеновской техники. Программа и материалы конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2018. С. 99–105.

## Информация об авторах

**Тимофеев Геннадий Александрович** – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2016), аспирант кафедры электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 7 научных работ. Сфера научных интересов – технические и программные средства рентгеновской диагностики.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

E-mail: gennady92@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9852-7908>

**Потрахов Николай Николаевич** – доктор технических наук (2009), заведующий кафедрой электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 378 научных работ. Сфера научных интересов – методики применения рентгеновского излучения в различных областях и технические средства для их реализации.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

E-mail: nn@eltech-med.com

<http://orcid.org/0000-0001-8806-0603>

**Грязнов Артем Юрьевич** – доктор технических наук (2011), профессор (2018), заместитель заведующего кафедрой электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 208 научных работ. Сфера научных интересов: физика и техника рентгеновского излучения, рентгеноспектральный анализ.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

E-mail: ay.gryaznov@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0003-2062-2213>

## References

1. Zheleznyakov A. It all started with "Cactus". *Innovatsii* [Innovation]. 2013, no. 1 (171), pp. 13–17. (In Russ.)
2. Gerchikov F. L. *Upravlyayemoye impul'snoye rentgenovskoye izlucheniye v priborostroyenii* [Controllable pulsed X-ray radiation in instrumentation]. M., *Energoatomizdat*, 1987, 88 p. (In Russ.)
3. Mitchell J. W. NASA Set to Demonstrate X-ray Communications in Space. "Cutting edge" Goddard`s Emerging Technologies. Winter. 2019, vol. 15, iss. 2, pp. 9–10.
4. Song Shi-Bin, Xu Lu-Ping, Zhang Hua, Gao Na. X-ray communication based simultaneous communication and ranging. *Chin. Phys. B*. 2015, vol. 24, iss. 9. doi: 10.1088/16741056/24/9/094215
5. Zhao B., Wu C., Sheng L., Liu Y. Next Generation of Space Wireless Communication Technology Based on X-ray. *Acta Photonica Sin.* 2013, vol. 42. pp. 801–804. doi: 10.3788/gzxb20134207.0801
6. Emadzadeh A. A., Speyer J. L. Relative navigation between two spacecraft using X-ray pulsars. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2011, vol. 19, pp. 1021–1035. doi: 10.1109/TCST.2010.2068049
7. Li Q., Jianye L., Guanglou Z., Zhi X. Development of XNAV algorithm and cycle ambiguity resolution. *Yuhang Xuebao J. Astronautics*. 2009, vol. 30, iss. 4, pp. 1460–1465.
8. Shibin Song, Luping Xu, Hua Zhang, Yuanjie Bai. Novel X-ray Communication Based XNAV Augmentation Method Using X-ray Detectors. *Sensors*. 2015, vol. 15, iss. 9, pp. 22325–22342. doi:10.3390/s150922325
9. Grebenshchikov V. V., Lobanov M. V., Egorov A. G., Nazaruk V. P., Nechaev A. I., Potrakhov N. N., Timofeev G. A. Experimental test-bench estimation of xray attenuation of precipitation and other conditions. Proc. of the VI Russian Scientific and practical conference of X-ray equipment manufacturers. SPb, *SPbGETU*, 2019, pp. 65–69. (In Russ.)
10. Lukyanov V. N., Mamaeva G. A., Filippova O. A., Frolov V. M., Potrakhov N. N. X-ray tube with photocathode. Proc. of the III Russian Scientific and practical conference of X-ray equipment manufacturers. SPb, *SPbGETU*, 2016, pp. 20–21. (In Russ.)
11. Kirpichenko R. V., Lukyanov V. N., Mironov D. E., Filippova O. A., Mamaeva G. A., Potrakhov N. N., Timofeev G. A., Baklin A. S. X-ray tube with a cathode node based on a photoelectron multiplier and prospects for its application. Proc. of the IV Russian Scientific and practical conf. of X-ray equipment manufacturers. SPb, *SPbGETU*. 2017, pp. 31–34. (In Russ.)
12. Artemiev B. V. *Rentgenovskaya tolshchinometriya metallov* [X-ray thickness measurement of metals]. M., *Mashinostroyeniye-1*, 2002, 104 p. (In Russ.)
13. Potrakhov N. N., Gryaznov A. Yu. Features of "super-rigid" shooting in microfocus X-ray diagnostics. *Meditsinskaya tekhnika* [Medical equipment]. 2005, no. 5, pp. 14–19. (In Russ.)
14. Artemiev B. V., Buklei A. A. *Radiatsionnyy control* [Radiation monitoring]. M., *Izd. Dom "Spektr"*, 2011, 192 p. (In Russ.)
15. Leipunsky O. I. *Gamma-izlucheniye atomnogo vzryva* [Gamma radiation of an atomic explosion]. M., *Atomizdat*, 1959, 154 p. (In Russ.)
16. Kalinin B.D. Investigation of X-ray radiation and development of X-ray instrumentation in St. Petersburg. *Analitika i kontrol'* [Analytics and control]. 2020, vol. 24, no. 3, pp. 201–229. doi: 10.15826/analitika.2020.24.3.005 (In Russ.)
17. Grebenshchikov V. V., Dmitriev A. S., Nechaev A. I., Potrakhov N. N., Timofeev G. A. High Frequency x-Ray Pulsed Source and the Method for Wireless Data Transmission. *Fizicheskiye osnovy priborostroyeniya* [Physical foundations of instrumentation]. 2020, no. 89 (4), pp. 38–47. (In Russ.)
18. Grebenshchikov V. V., Lobanov M. V., Egorov A. G., Nazaruk V. P., Nechaev A. I., Potrakhov N. N. and Timofeev G. A. Experimental test-bench estimation of xray attenuation of precipitation and other conditions. AIP Conf. Proc. 2020, vol. 2250, iss. 1. doi: 10.1063/5.0020836
19. Timofeev G. A., Potrakhov N. N., Nechaev A. I. Experimental studies of the X-ray communication channel. Proc. of the V Russian Scientific and practical conference of X-ray equipment manufacturers. SPb, *SPbGETU*, 2018, pp. 99–104. (In Russ.)

## Information about the authors

**Gennadiy A. Timofeev**, Master's degree in Electronics and Nanoelectronics (2016), post-graduate student of the Department of Electronic Devices and Devices of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 7 scientific publications. Area of expertise: technical and software tools for X-ray diagnostics.  
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia  
E-mail: gennady92@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0001-9852-7908>

**Nikolay N. Potrakhov**, Dr. Sci. (2009), head of the Department of electronics and devices of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 378 scientific publications. Area of expertise: methods of application of X-ray radiation in various fields and technical means for their implementation.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: nn@eltech-med.com

<https://orcid.org/0000-0001-8806-0603>

**Artem Yu. Gryaznov**, Dr. Sci. (2011), Professor (2018), deputy head of the Department of electronic devices and devices of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 208 scientific publications. Area of expertise: physics and technology of X-ray radiation, X-ray spectral analysis.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: ay.gryaznov@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0003-2062-2213>

---