

**СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМАГНИТНЫХ ЦЕНТРОВ,  
ИНДУЦИРОВАННЫХ В ЭМАЛИ ЗУБОВ ЧЕЛОВЕКА  
РЕНТГЕНОВСКИМ И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕМ****В. А. Кириллов<sup>\*</sup>, И. И. Кучуро**

УДК 614.876;616.314.13;615.015.3

*Белорусский государственный медицинский университет,  
220116, Минск, просп. Дзержинского, 83; e-mail: kirillov@bsmu.by**(Поступила 25 мая 2009)*

На основании изучения спектральных и релаксационных характеристик установлена одинаковая природа парамагнитных центров, индуцированных в эмали зубов рентгеновским и гамма-излучением. Показано, что при одинаковой дозе облучения интенсивность сигнала электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), индуцированного рентгеновским излучением с эффективной энергией 34 кэВ примерно на порядок больше амплитуды сигнала, индуцированного гамма-излучением. Выявлено трехкратное ослабление сигнала ЭПР по пути рентгеновского излучения от щечной к язычной части зуба, что является доказательством прохождения индивидуумом диагностического рентгеновского обследования зубочелюстной системы и черепа. Показано, что реконструированные по спектрам ЭПР дозы облучения, сформированные под действием рентгеновского излучения, на порядок больше приложенных, а дозовые нагрузки, сформированные гамма-излучением, равны приложенным дозам. Полученные данные указывают на то, что для адекватной реконструкции индивидуальных поглощенных доз по спектрам ЭПР эмали зубов населения, подвергшегося сочетанному воздействию рентгеновского излучения и аварийной внешней гамма-радиации в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС, необходимо учитывать вклад в дозовую нагрузку диагностического рентгеновского облучения при обследовании зубов, челюсти и черепа.

**Ключевые слова:** ЭПР-дозиметрия, зубная эмаль, рентгеновское излучение, гамма-излучение.

Based on the study of spectral and relaxation characteristics, paramagnetic centers induced in tooth enamel by X-rays and gamma radiation have been determined to be of similar nature. It has been shown that at equal exposure dose, the intensity of the EPR signal induced by X-rays with the effective energy of 34 keV exceeded approximately by an order of magnitude that of a signal induced by gamma radiation. A three-fold weakening of the EPR signal was revealed on the path of X-rays from the buccal to lingual side of a tooth, which proves that a person was subjected to a diagnostic X-ray examination of the dentition and the skull. The results of the EPR dose reconstruction show that exposure doses formed due to X-rays exceed the applied doses by an order of magnitude, while dose loads produced by gamma radiation were equal to the applied doses. The obtained data indicate that in order to adequately reconstruct individual absorbed doses by the tooth enamel EPR spectroscopy in the population exposed to a combined effect of X-rays and the external gamma radiation following the Chernobyl accident, it is necessary to take into account the diagnostic X-ray radiation while examining the teeth, the jaw, and the skull as a contribution to the dose load.

**Keywords:** EPR dosimetry, tooth enamel, X-rays, gamma radiation.

**SPECTRAL ANALYSIS OF PARAMAGNETIC CENTERS INDUCED IN HUMAN TOOTH ENAMEL  
BY X-RAYS AND GAMMA RADIATION**

V. A. Kirillov<sup>\*</sup> and J. I. Kuchuro (Belarusian State Medical University, 83 Dzerzhinsky Ave., Minsk, 220116, Belarus; e-mail: kirillov@bsmu.by)

**Введение.** Спустя более 20 лет после аварии на Чернобыльской АЭС ЭПР-дозиметрия эмали зубов остается единственным инструментальным методом ретроспективной реконструкции индивидуальных поглощенных доз. Этот метод, известный уже более 40 лет [1], получил широкое распространение [2] после аварии на Чернобыльской АЭС. Он весьма перспективен для использования в аварийных и неконтролируемых ситуациях, когда, как правило [3], отсутствуют средства прямого индивидуального дозиметрического контроля. Метод основывается на выявлении стабильных биологических маркеров, которыми являются свободные радикалы, формирующиеся в эмали зубов под действием ионизирующей радиации. Реконструкция индивидуальных поглощенных доз в таком природном дозиметре осуществляется по спектрам ЭПР зубной эмали. Определяемая при этом индивидуальная поглощенная доза эквивалентна дозе, рассчитанной на все тело.

Кроме аварийных ситуаций, радиационные дефекты в эмали зубов могут формироваться за счет диагностического рентгеновского облучения, широко используемого при стоматологическом лечении. Рентгенологическое исследование — ведущий метод диагностики, который постоянно применяется при распознавании большинства заболеваний зубочелюстной системы у лиц разных возрастных групп [4]. Это закономерно вызвало повышение уровня использования и расширение спектра рентгенологических методик исследования зубочелюстной системы, появление новых видов рентгенологического исследования. В промышленно развитых странах частота диагностических рентгеновских обследований составляет от 300 до 900 на 1000 человек в год [5]. За счет лучевой диагностики в эмали зубов формируется дополнительная поглощенная доза.

Можно выделить два существенных отличия действия на эмаль зубов диагностического рентгеновского излучения по сравнению с внешней гамма-радиацией. Во-первых, локальный характер воздействия рентгеновского излучения при стоматологических процедурах в отличие от интегрального характера аварийного облучения. Во-вторых, превышение выхода парамагнитных центров (ПЦ) в эмали зубов под действием рентгеновского излучения по сравнению с гамма-излучением [6].

Цель настоящего исследования — выяснить неравнозначное завышение дозы облучения, реконструированной по спектрам ЭПР эмали зубов, по сравнению с приложенной дозой, сформированной диагностическим рентгеновским излучением.

**Материалы и методы.** Использованы зубы людей в возрасте до 18 лет, проживающих на не загрязненных радионуклидами территориях. Из зубов, удаленных по стоматологическим показаниям, отбирались образцы, которые не подвергались диагностическому рентгеновскому обследованию зубов, челюсти и черепа. Препарирование эмали проводили в соответствии с разработанным нами протоколом ЭПР-дозиметрических исследований [7]. При этом коронку зуба отделяли от корня и раскалывали на щечную и язычную части. Половинки зубов очищали от остатков органических веществ, зубного камня, пигментированных вкраплений и удаляли кариозные участки. Отделение эмали от дентина и пульпы осуществляли путем обработки зубов кратковременными воздействиями сменными твердосплавными борами разного размера на низких оборотах вращения ( $\leq 30000$  об/мин) с водяным охлаждением. Очищенную эмаль дробили на гранулы размером 0,5—1,0 мм в агатовой ступке и готовили навески по 100 мг.

Для оценки количества ПЦ, индуцированных рентгеновским и гамма-излучением различной энергии, тщательно перемешивали гранулы эмали, полученные из 30 зубов. Это позволило исключить влияние фактора индивидуальной радиационной чувствительности. После этого готовили навески по 100 мг, которые облучали через плексиглас на дозиметрической линейке и рентгеновской установке одинаковой приложенной дозой 5 Гр. Приложенная доза рассчитана с учетом конверсионного фактора и мощности кермы в воздухе источников ионизирующего излучения. Гамма-облучение проводили на дозиметрической линейке от калиброванных источников  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$  с мощностью кермы в воздухе 30 и 630 мГр/мин на поверхности фантома соответственно; средняя энергия гамма-квантов 662 и 1250 кэВ. Рентгеновское облучение осуществляли на установке Pantak HF-320 (США) с мощностью кермы в воздухе 45 мГр/мин на поверхности фантома. Эффективная энергия рентгеновского излучения рассчитывалась исходя из определения слоя половинного ослабления в алюминии за счет изменения напряжения на аноде рентгеновской трубки и подбора толщины фильтра из алюминия. Оценка амплитуды радиационно-индуцированного сигнала ЭПР проводилась по трем образцам на каждое облучение.

При исследовании профиля поглощения рентгеновского и гамма-излучения в зубе человека целый зуб облучали со стороны щечной части на рентгеновской установке и дозиметрической линейке одинаковой приложенной дозой 20 Гр. Для сравнительного анализа реконструированных доз, сформированных рентгеновскими лучами или гамма-радиацией, щечную часть зуба облучали на дозиметрической линейке, а язычную — на рентгеновской установке одинаковыми приложенными дозами 100, 250 и 500 мГр.

Как при исследовании профиля поглощения, так и при реконструкции доз, гамма-облучение проводили на дозиметрической линейке от калиброванного источника  $^{60}\text{Co}$ . Рентгеновское облучение осуществляли на установке Pantak HF-320 (USA). Средняя энергия гамма-квантов 1250 кэВ, эффективная энергия рентгеновского излучения 34 кэВ. Воздействие на зубы рентгеновским излучением проводилось при стандартных для современной рентгеновской диагностики зубочелюстной системы параметрах (напряжение анода рентгеновской трубки 70 кВ, толщина фильтра из алюминия 2.4 мм). Расстояние от передней поверхности фантома до источника  $^{60}\text{Co}$  и фокуса рентгеновской трубки составляло 2.0 и 1.5 м. В обоих экспериментах облучение осуществляли со стороны эмали через плексиглас, который имитировал щеку человека. Во всех случаях образцы облучали в Институте стандартизации и метрологии как на дозиметрической линейке, так и на рентгеновской установке Pantak HF-320 из состава Национального эталона кермы в воздухе, с погрешностью 3.5 % и доверительной вероятностью  $P = 0.95$ . В каждой серии экспериментов облучение образцов осуществляли одновременно. Для формирования механоиндуцированных ПЦ эмаль от дентина отделяли кратковременными воздействиями стоматологическими борами с высокими оборотами вращения ( $\geq 300000$  об/мин).

Спектры эмали зубов регистрировали на ЭПР-спектрометре Bruker ECS-106 (Germany) в X-диапазоне с использованием резонатора 4102 ST при следующих характеристиках: мощность СВЧ поля 10 мВт, коэффициент усиления  $10^5$ , амплитуда модуляции 0.25 мТл, время развертки поля 10 с, постоянная времени приемника 10 мс, развертка поля 10 мТл, число накоплений спектра 100, температура комнатная. Для определения индивидуального коэффициента радиационной чувствительности зубной эмали использовали стандартную методику добавленных доз. Дополнительное облучение образцов проводили суммарными дозами 0.25, 0.5, 1.0, 2.0 и 4.0 Гр через плексиглас от образцового гамма-источника  $^{60}\text{Co}$ .

Математическую обработку сложных спектров ЭПР для реконструкции индивидуальных поглощенных доз и определения формы линий составляющих его сигналов осуществляли путем моделирования экспериментальных спектров с помощью собственной компьютерной программы "Зубная эмаль-3" [7—9]. Расчет формы модельного спектра проводился оптимизацией параметров, определяющих его компоненты, до достижения минимума суммы квадратов отклонений модельного спектра от экспериментального во всех точках выбранного диапазона (метод наименьших квадратов). В процессе моделирования программа определяла форму каждой компоненты спектра по совокупности параметров: степень анизотропии  $\delta = (B_{\parallel} - B_{\perp}) / \Delta B_{\text{ЭПР}}$ , где  $B$  — индукция внешнего магнитного поля; ширина линии  $\Delta B_{\text{ЭПР}}$  "от пика до пика" при  $\delta = 0$ ; центр линии  $S_L$  — максимум линии спектра поглощения при  $\delta = 0$  [10]. Весь процесс моделирования и расчет индивидуальных поглощенных доз проводили в автоматическом режиме.

**Результаты и их обсуждение.** Спектры ЭПР зубной эмали содержат только так называемый нативный сигнал (рис. 1, спектр 1). Этот сигнал представляет собой близкий к изотропной форме синглет шириной  $\Delta B_{\text{ЭПР}} = 0.8$  мТл и характеризуется  $g = 2.0048$ . Считается, что он формируется в органической матрице эмали (белки и липиды), которая составляет 2—4 % общей массы эмали [2]. Под воздействием рентгеновского и гамма-излучения в эмали зубов возникают стабильные ПЦ. Сигналы этих центров в спектрах ЭПР проявляются в виде линий анизотропной формы:  $g_1 = 2.0027$ ,  $g_2 = 1.9973$  (спектры 2 и 3). Амплитуда радиационно-индуцированных сигналов возрастает с увеличением дозы облучения. Радиационно-индуцированный сигнал формируется в гидроксипатите — неорганическом веществе эмали зубов, содержание которого  $\approx 90$  % общей массы эмали [2].

Изучение с помощью компьютерной программы "Зубная эмаль-3" формы линий радиационно-индуцированных сигналов ЭПР более 100 образцов эмали зубов показало, что параметры

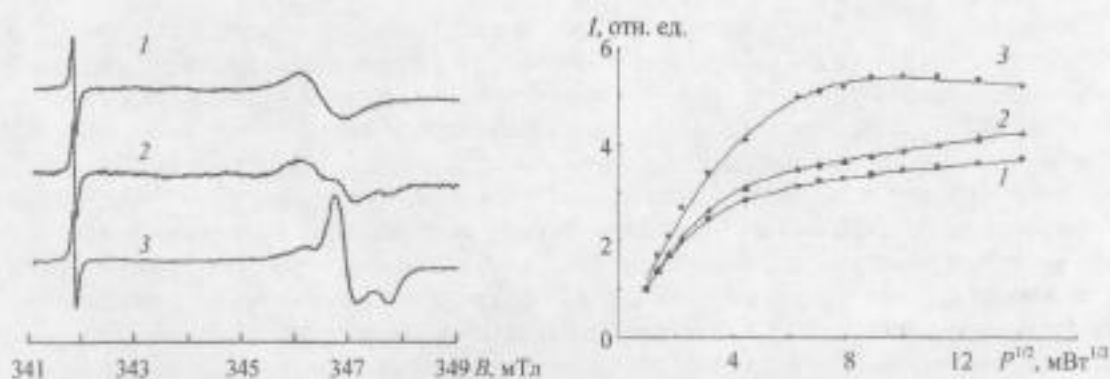


Рис. 1. Типичные спектры ЭПР эмали зубов: 1 — исходный образец, 2 и 3 — образцы, облученные гамма- и рентгеновским излучением одинаковой приложенной дозой 200 мГр

Рис. 2. Интенсивность сигнала ЭПР "от пика до пика" как функция корня квадратного из мощности микроволн в резонаторе спектрометра для парамагнитных центров, индуцированных гамма-квантами (1), рентгеновским излучением (2) и механическим воздействием (3); амплитуды нормированы по амплитуде сигнала при мощности микроволн 1 мВт

формы линий ЭПР, индуцированных рентгеновским излучением, изменяются в следующих интервалах: степень анизотропии  $\delta = 92.96—93.66$ , ширина линии  $\Delta B_{pp} = 0.33—0.34$  мТл и центр линии  $S_1 = 346.943—346.948$  мТл. Параметры формы линий ЭПР, индуцированных гамма-излучением, следующие: степень анизотропии  $\delta = 92.69—96.33$ , ширина линии  $\Delta B_{pp} = 0.31—0.33$  мТл, центр линии  $S_1 = 346.937—346.953$  мТл. Полученные результаты свидетельствуют о близости формы линий ЭПР, индуцированных в зубной эмали рентгеновским и гамма-излучением. Сходность формы линий ПЦ, индуцированных в эмали зубов различными типами электромагнитного излучения — УФ-излучением и гамма-квантами, отмечалась в работе [11].

Изучение зависимости амплитуды парамагнитного сигнала "от пика до пика" от мощности микроволнового излучения  $P$  в резонаторе ЭПР-спектрометра выявило, что кривые насыщения сигналов ПЦ, индуцированных как рентгеновским, так и гамма-излучением, выходят на плато при  $P \approx 200$  мВт (рис. 2). Кроме того, прямолинейные участки обеих кривых насыщения совпадают. Это означает, что времена спин-решеточной релаксации у этих ПЦ практически не различаются. На рис. 2 также приведена кривая насыщения сигнала ПЦ, индуцированных механическим воздействием на эмаль зубов. Сигнал от механоиндуцированных ПЦ насыщается при более низком уровне мощности (100 мВт) и имеет больший угол наклона прямолинейного участка на кривой насыщения, чем сигнал от радиационно-индуцированных радикалов. Это указывает на то, что спины неспаренных электронов радиационно-индуцированных ПЦ имеют более короткие времена спин-решеточной релаксации, чем спины, обуславливающие механоиндуцированный сигнал. Механоиндуцированные ПЦ, которые в спектрах ЭПР проявляются в виде узкого сигнала изотропной формы, возникают в эмали за счет трения при обработке зубов стоматологическими борами на высоких оборотах вращения [12—15]. Из теории механохимии известно, что формирование радикалов при механическом воздействии является результатом превращения упругой энергии в химическую за счет колебательного возбуждения химических связей [16, 17], т. е. осуществляется по механизму, отличному от образования радикалов под действием ионизирующего излучения.

Близкие как спектральные, так и релаксационные характеристики свободных радикалов, индуцированных рентгеновским и гамма-излучением, указывают на их одинаковую природу. В терминах ЭПР-дозиметрии это означает, что при наличии в спектрах ЭПР эмали зубов сигнала анизотропной формы невозможно установить его происхождение. Таким образом, остается открытым вопрос, вследствие чего сформированы радиационно-индуцированные ПЦ: либо под действием внешнего гамма-излучения в аварийной ситуации, либо за счет диагностического рентгеновского обследования зубочелюстной системы и черепа.

Дальнейший анализ спектров, приведенных на рис. 1, свидетельствует о том, что интенсивность сигналов ЭПР в эмали зубов, индуцированных рентгеновским излучением, превышает интенсивность сигнала ПЦ, индуцированных гамма-квантами. Для выявления зависимости выхода ПЦ от энергии электромагнитного излучения проведен специальный эксперимент. Образцы эмали зубов одинакового веса подвергались воздействию рентгеновским излучением различной эффективной энергии и гамма-излучением от калиброванных источников  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Как показывают результаты, радиационная чувствительность зубной эмали не зависит от средней энергии гамма-квантов в диапазоне 662—1250 кэВ (табл. 1). В то же время для рентгеновских фотонов с эффективной энергией в диапазоне 16—100 кэВ наблюдается куполообразная зависимость. При этом амплитуда сигнала ЭПР возрастает с повышением энергии рентгеновского излучения и достигает максимума при энергии 44 кэВ, после чего интенсивность сигнала снижается. При одинаковой дозе облучения интенсивность радиационного сигнала, индуцированного рентгеновским излучением с низкой энергией, оказывается в 4—12 раз больше, чем амплитуда сигнала, индуцированного гамма-излучением с энергией, более чем на порядок превосходящей энергию рентгеновского излучения. Сходная зависимость выхода радиационно-индуцированных ПЦ от энергии электромагнитного излучения получена в [6]. Некоторые различия результатов этой работы по сравнению с нашими обусловлены тем, что авторы [6] проводили облучение образцов зубной эмали рентгеновским и гамма-излучением через фантом из нейтрального вещества различной толщины, делая акцент на соблюдении условий вторичного электронного равновесия. Мы ориентировались на необходимость соблюдения одинаковых условий облучения зубов человека, как это происходит *in vivo* при аварийном гамма-облучении и диагностическом рентгеновском обследовании зубочелюстной системы. Поэтому облучение препаратов эмали как на рентгеновской установке, так и на дозиметрической линейке проводили через плексигласовый фантом одинаковой толщины, который имитировал щеку человека.

Известно, что с повышением энергии электромагнитного излучения возрастает его проникающая способность. Поскольку энергия гамма-квантов более чем на порядок превышает энергию рентгеновских фотонов, их проникающая способность в веществе зуба должна быть выше. С этой целью изучен профиль поглощения электромагнитного излучения обоих типов с помощью модельного эксперимента, в котором образцы целых коренных зубов подвергались воздействию рентгеновского и гамма-излучения одинаковой приложенной дозой 2000 мГр. Моделировались условия, максимально приближенные к естественным: целые зубы ориентированы щекой стороной к источнику радиации и облучение проводилось через фантом, имитирующий щеку человека. Затем образцы препарировались для получения трех фракций очищенной эмали с

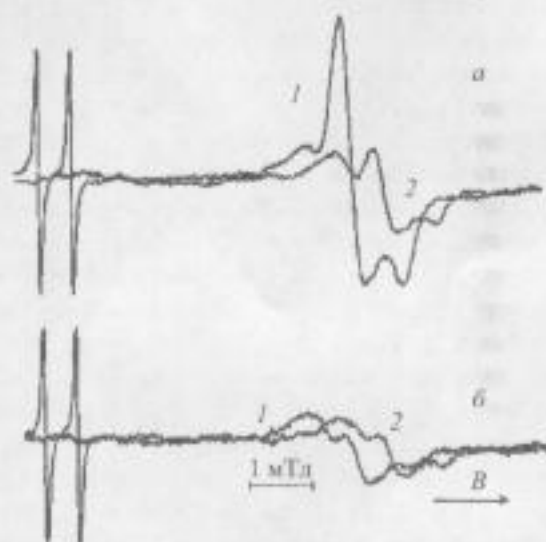
Т а б л и ц а 1. Интенсивность радиационно-индуцированного сигнала ЭПР эмали зубов "от пика до пика" при разных энергиях электромагнитного излучения и одинаковой приложенной дозе облучения 5 Гр

Энергия, кэВ	Интенсивность сигнала ЭПР, усредненная по трем образцам, усл. ед.
<i>Рентгеновское излучение</i>	
16	4,2 ± 0,4
26	10,3 ± 0,7
31	10,4 ± 1,3
34	10,6 ± 1,0
44	12,3 ± 1,1
65	8,4 ± 0,9
100	5,2 ± 0,3
<i>Гамма-излучение</i>	
662	1,2 ± 0,1
1250	1,0 ± 0,1

Примечание. Интенсивность сигнала ЭПР нормирована по амплитуде сигнала парамагнитных центров, индуцированных гамма-квантами от эталонного источника  $^{60}\text{Co}$ .

каждого зуба: щечной, язычной и дистальной. Как показывает анализ спектров ЭПР, интенсивность дозиметрического сигнала, сформированного под действием рентгеновского излучения, в щечной фракции эмали превышает интенсивность этого сигнала в дистальной фракции в ~2 раза, а в язычной — в ~3 раза. На рис. 3 приведены спектры ЭПР щечной и язычной фракций эмали зуба, предварительно облученного (приложенная доза 2000 мГр) рентгеновским излучением, и другого зуба — гамма-квантами. Как видно, амплитуда дозиметрического сигнала, образовавшегося под действием гамма-радиации, практически одинакова в двух фракциях и значительно различается при рентгеновском облучении. При смешивании язычной, щечной и дистальной фракций эмали зуба, подвергнутого рентгеновскому облучению, суммарная интенсивность дозиметрического сигнала зависит от их массовых пропорций в навеске 100 мг. Картина будет усложняться наличием в удаленных зубах пломб, которые могут различаться по химическому составу, а значит, и по способности поглощать рентгеновское излучение. В случае внешнего гамма-облучения такое смешивание не будет приводить к изменению амплитуды дозиметрического сигнала при изменении массовых пропорций этих фракций. Ослабление рентгеновского излучения по интенсивности сигнала ЭПР по пути от передней к задней стенке зуба отмечалось ранее в ряде работ (см., например, [18, 19]). Некоторое несоответствие результатов этих работ по сравнению с нашими обусловлено различиями параметров рентгеновской трубки и толщины слоя половинного ослабления. В наших экспериментах воздействие на зубы рентгеновским излучением осуществлялось при стандартных для современной рентгеновской диагностики зубочелюстной системы параметрах (напряжение анода рентгеновской трубки 70 кВ, толщина фильтра из алюминия 2.4 мм). При этом эффективная энергия рентгеновского излучения составляла 34 кэВ.

Рис. 3. Спектры ЭПР щечной (1) и язычной (2) фракций эмали целого зуба при облучении: а — рентгеновским излучением с эффективной энергией 34 кэВ, б — гамма-квантами со средней энергией 1250 кэВ от калиброванного источника  $^{60}\text{Co}$  (облучение проводилось со стороны щечной части одинаковой приложенной дозой 2000 мГр)



Выявленное снижение интенсивности сигнала ЭПР эмали в язычной части зуба по сравнению со щечной может служить доказательством прохождения индивидуумом диагностического рентгеновского обследования зубочелюстной системы и черепа. Это очень важно, во-первых, потому что в паспорте на удаленный зуб не всегда указаны сведения о проведении рентгеновских обследований зубов, челюсти и черепа [7]. Во-вторых, при наличии в паспорте отметки о прохождении рентгеновской диагностики препарирование эмали для ЭПР-дозиметрических исследований необходимо осуществлять только со щечной или только с язычной поверхности зуба, т. е. смешивание этих двух фракций недопустимо.

Для реконструкции индивидуальных поглощенных доз с помощью ЭПР-дозиметрии эмали зубов используются методики добавленных доз [2]. При этом каждый препарат эмали дополнительно облучают гамма-радиацией. После этого для оценки индивидуальной радиационной чувствительности строят калибровочную прямую и методом обратной экстраполяции определяют индивидуальную поглощенную дозу. Как показано выше, при одинаковой дозе облучения интенсивность сигнала радикалов, индуцированных рентгеновским излучением с эффективной энергией 34 кэВ, оказывается примерно на порядок больше, чем амплитуда сигнала ПЦ, сформированных под воздействием гамма-радиации (табл. 1). При использовании стандартной методики ЭПР-дозиметрии это должно приводить к неравнозначному завышению дозы. Для подтверждения этого предположения проведена серия экспериментов, в которых щечная и язычная

Таблица 2. Реконструированные и приложенные дозы облучения

Приложенная доза, мГр	Реконструированная доза, усредненная по трем образцам, мГр	Отношение реконструированной к приложенной дозе
<i>Рентгеновское излучение</i>		
100	768.1 ± 139.5	7.5
250	2258.7 ± 127.4	9.0
500	5650.9 ± 587.8	11.3
<i>Гамма-излучение</i>		
100	158.0 ± 32.6	1.6
250	272.6 ± 25.6	1.1
500	506.3 ± 28.2	1.0

части зубов подвергались воздействию рентгеновского и гамма-излучения соответственно. В одной серии девять половинок щечной части зуба подвергались воздействию рентгеновского излучения. При этом первые три половинки одновременно облучались приложенными дозами 100 мГр, а вторые — 250 мГр и третьи — 500 мГр. В другой серии девять половинок язычной части зуба подвергались воздействию гамма-излучения по той же схеме. Из этих половинок готовили препараты эмали, по спектрам ЭПР которых рассчитывалась доза облучения. Сравнительный анализ дозовых нагрузок, сформированных рентгеновским и гамма-излучением, проводился попарно по препаратам эмали половинок одного зуба, что позволяло исключить фактор индивидуальной радиационной чувствительности. Анализ результатов реконструкции доз (табл. 2) показывает, что дозы, сформированные под действием рентгеновского излучения, в среднем в 10 раз больше по сравнению с приложенными. В то же время дозовые нагрузки, сформированные гамма-излучением, приблизительно равны приложенным дозам.

На рис. 4 представлены калибровочные прямые препарата эмали щечной и язычной частей одного и того же зуба, в которых доза сформирована рентгеновским излучением (прямая 1) и гамма-радиацией (прямая 2) одинаковой приложенной дозой 500 мГр. Как видно, рассчитанная с помощью прямой 1 доза  $D = 5382.3$  мГр, т. е. более чем на порядок выше приложенной дозы. В то же время рассчитанная по прямой 2 доза  $D = 528.7$  мГр, т. е. практически совпадает с приложенной. Сравнение этих двух прямых показывает, что интенсивность дозиметрических сигналов исходных спектров (соответствует точке пересечения калибровочных прямых с осью ординат), рассчитанная компьютерной программой "Зубная эмаль-3", в  $\approx 10$  раз больше для прямой 1, чем для прямой 2. Именно этой причиной объясняется как несоответствие приложенных и реконструированных доз в случае применения электромагнитного излучения различной энергии при формировании дозовой нагрузки и дополнительного облучения, так и совпадение этих доз в случае использования электромагнитного излучения одинаковой энергии.

Полученные данные указывают на то, что наличие в эмали зубов ПЦ, индуцированных либо отдельно рентгеновским излучением, либо сочетанным воздействием гамма- и рентгеновского излучения, приводит к значительному завышению доз облучения, реконструируемых по спектрам ЭПР эмали зубов. Ранее нами с помощью компью-

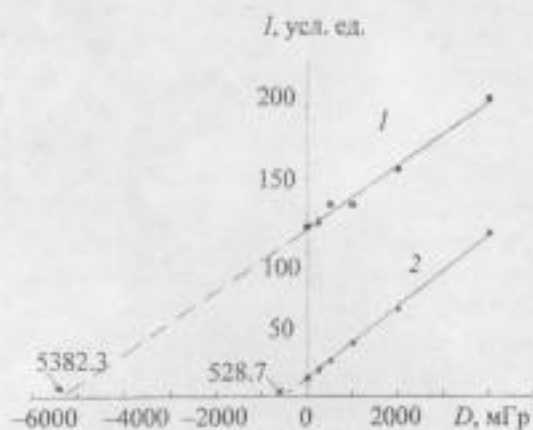


Рис. 4. Калибровочные прямые и рассчитанные дозы  $D$  (указаны стрелками) препаратов эмали щечной (1) и язычной (2) частей одного зуба; щечная половина зуба облучена рентгеновским излучением с эффективной энергией 34 кэВ, язычная — гамма-излучением со средней энергией 1250 кэВ от калиброванного источника  $^{60}\text{Co}$ . Обе части зуба облучены предварительно одинаковой приложенной дозой 500 мГр

терного моделирования был учтен вклад в дозу облучения механически индуцированного сигнала, формирующегося в процессе лечения зубов [9, 15, 20]. Это стало возможным благодаря различной форме линии радиационно- и механически индуцированных сигналов [12, 14]. В то же время идентичность формы линий сигналов ПЦ, индуцированных обоими типами электромагнитного излучения, исключала их деконволюцию. Оценка вклада диагностического рентгеновского облучения в суммарную накопленную дозу, формирующуюся за счет сочетанного воздействия рентгеновского излучения и аварийной гамма-радиации, является серьезной проблемой, которая до сих пор не решена. Без ее решения невозможна адекватная ретроспективная реконструкция доз облучения населения, пострадавшего в результате аварии на Чернобыльской АЭС.

**Заключение.** На основании изучения спектральных и релаксационных характеристик установлена одинаковая природа парамагнитных центров, индуцированных в эмали зубов рентгеновским и гамма-излучением. Показано, что при одинаковой дозе облучения интенсивность сигнала ЭПР, индуцированного рентгеновским излучением с эффективной энергией 34 кэВ, примерно на порядок больше амплитуды сигнала, индуцированного гамма-радиацией. Выявлено трехкратное ослабление сигнала ЭПР по пути рентгеновских лучей от щечной к язычной части зуба, что доказывает прохождение индивидуумом диагностического рентгеновского обследования зубочелюстной системы и черепа. Показано, что реконструированные по спектрам ЭПР дозы облучения, сформированные под действием рентгеновского излучения, были на порядок больше приложенных, а дозовые нагрузки, сформированные гамма-радиацией, равны приложенным дозам. Полученные данные указывают на то, что для адекватной реконструкции индивидуальных поглощенных доз по спектрам ЭПР эмали зубов населения, подвергшегося сочетанному воздействию рентгеновских лучей и аварийной внешней гамма-радиации в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС, необходимо учитывать вклад в дозовую нагрузку диагностического рентгеновского облучения, применяемого при обследовании зубов, челюсти и черепа.

- [1] J.M.Brady, N.O.Aarestad, H.M.Swartz. *Health Phys.*, 15 (1968) 43—47
- [2] A.Bougai, A.Brik, V.Chumak, M.Desrosiers, S.Dubovsky, P.Fattibene, E.Haskell, A.Ivannikov, V.Kirillov, S.Onori, A.Romanyukha, S.Sholom, K.Shortt, V.Skvortzov, V.Stepanenko, I.Turai, S.Vatnitsky, A.Wieser. *Use of Electron Paramagnetic Resonance Dosimetry with Tooth Enamel for Retrospective Dose Assessment*, Vienna, IAEA (2002)
- [3] Sources and Effect of Ionizing Radiation. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). Report to the General Assembl. Annex J. Exposures and Effect of the Chernobyl Accident, United Nations, New York (2000)
- [4] Н.А.Рабухина, А.П.Аржанцев. *Рентгенодиагностика в стоматологии*, Москва, Мед.-информ. агентство (1999)
- [5] М.М.Виденчик. *Радиобиологические эффекты и окружающая среда*, Москва, Энергоатом (1991)
- [6] M.Iwasaki, C.Miyazawa, A.Kubota, E.Suzuki, K.Sato, J.Naoi, A. Katoh, K.Niwa. *Radioisotopes*, 40 (1991) 25—28
- [7] В.А.Кириллов, С.В.Дубовский, О.Д.Шиманская, С.В.Толстик. *Мед.-биол. аспекты аварии на ЧАЭС*, № 2 (2005) 3—14
- [8] S.V.Dubovsky, V.A.Kirillov. *Appl. Radiat. Isot.*, 54 (2001) 833—837
- [9] V.A.Kirillov, S.V.Dubovsky. *Radiat. Meas.*, 44 (2009) 144—148
- [10] С.В.Дубовский, В.А.Кириллов. *Журн. прикл. спектр.*, 67, № 5 (2000) 636—639
- [11] V.V.Rudko, I.P.Vorona, N.P.Baran, S.S.Ishenko. *Radiat. Meas.*, 42 (2007) 1181—1184
- [12] В.А.Кириллов, С.В.Дубовский, С.В.Толстик. *Докл. НАН Беларуси*, 44 (2000) 73—76
- [13] D.Aragnò, P.Fattibene, S.Onori. *Appl. Radiat. Isot.*, 55 (2001) 375—382
- [14] V.Kirillov, S.Dubovsky, S.Tolstik. *Radiat. Prot. Dosim.*, 102 (2002) 41—48
- [15] V.Kirillov, O.Shimanskaya, S.Tolstik. *Radiat. Meas.*, 42 (2007) 1185—1189
- [16] П.И.Бутягин. *Успехи химии*, 40 (1971) 1935—1959
- [17] Е.Г.Аввакумов. *Механические методы активации химических процессов*, Новосибирск, Наука (1986)
- [18] J.E.Aldrich, B.Pass. *Radiat. Prot. Dosim.*, 17 (1986) 175—179
- [19] T.Shimano, M.Iwasaki, C.Miyazawa, T.Miki, A.Kai, M.Ikeya. *Appl. Radiat. Isot.*, 40 (1989) 1035—1038
- [20] В.А.Кириллов, С.В.Толстик. *Весті НАН Беларусі. Сер. мед. навук*, № 1 (2009) 23—27