

Д.В. Иванов<sup>1,3</sup>, Д.Р. Байтимиров<sup>1</sup>, С.Ф. Конев<sup>1</sup>, Е.К. Василенко<sup>2</sup>, Е.Е. Аладова<sup>2</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ВОЛОСА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОДЕРЖАНИЯ МЕЛАНИНА

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России, Озёрск, Россия

<sup>3</sup> Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

Контактное лицо: Аладова Е.Е., e-mail: aladova@subi.su

### РЕФЕРАТ

**Цель:** Исследование парамагнитных свойств радиационно-индуцированных центров, возникающих при облучении образцов волос ионизирующим излучением в зависимости от цвета образца.

**Материал и методы:** Для проведения экспериментальной части использовался спектрометр электронного парамагнитного резонанса Bruker Elexsys E580. Для улучшения отношения сигнал/шум спектр записывался с тремя накоплениями с постоянной по времени развертки равной 1 мин. Измерения проводили с помощью высокочувствительного прямоугольного резонатора Bruker SuperHighQ. Для облучения образцов использовался линейный ускоритель электронов УЭЛР-10-10С2 инновационно-внедренческого центра радиационной стерилизации Физико-технологического института УрФУ.

**Результаты:** Исследования параметров ЭПР-сигнала меланина образцов волос различного цвета: черных, рыжих, рыжих и седых разной степени пигментированности, показали, что интенсивность ЭПР сигнала меняется в зависимости от цвета волос. Радиационная чувствительность волоса тем выше, чем более светлым является окрас волоса. Сигнал меланина, являющийся фоновым для радиационно-индуцированного сигнала, увеличивается с увеличением интенсивности окраски волоса.

**Ключевые слова:** дозиметрия, электронный парамагнитный резонанс, меланин, радиационная чувствительность, волосы человека

**Для цитирования:** Иванов Д.В., Байтимиров Д.Р., Конев С.Ф., Василенко Е.К., Аладова Е.Е. Исследование дозиметрических характеристик человеческого волоса в зависимости от содержания меланина // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67. № 4. С. 89–95. DOI: 10.33266/1024-6177-2022-67-4-89-95

## Research of Dosimetric Characteristics of Human Hair Depending on the Content of Melanine

D.V. Ivanov<sup>1,3</sup>, D.R. Baitimirov<sup>1</sup>, S.F. Konev<sup>1</sup>, E.K. Vasilenko<sup>2</sup>, E.E. Aladova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> B.N. Yeltsin Urals Federal University, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> Southern Urals Biophysics Institute, Ozersk, Russia

<sup>3</sup> M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia

Contact person: Aladova E.E., e-mail: aladova@subi.su

### ABSTRACT

**Purpose:** Investigation of paramagnetic properties of radiation-induced centers that occur when hair samples are irradiated with ionizing radiation, depending on the color of the sample.

**Material and methods:** A Bruker Elexsys E580 electron paramagnetic resonance spectrometer was used. To improve the signal-to-noise ratio, the spectrum was recorded with three accumulations with a constant scan time equal to one minute. Measurements were made using a highly sensitive rectangular Bruker SuperHighQ resonator. For irradiation of samples, the linear electron accelerator UELR-10-10C2 of the innovation and implementation center for radiation sterilization of the Urals Federal University (Institute of Physics and technology) was used.

**Results:** Research of the EPR signal parameters of the melanin in hair samples of different colors (black, brown, red and gray with different degrees of pigmentation) showed that the intensity of the EPR signal varies depending on the hair color. The higher the radiation sensitivity of the hair, the lighter the color of the hair. The melanin signal, which is the background for the radiation-induced signal, increases with increasing intensity of hair color.

**Key words:** dosimetry, electron paramagnetic resonance, melanin, radiation sensitivity, human hairs

**For citation:** Ivanov DV, Baitimirov DR, Konev SF, Vasilenko EK, Aladova EE. Research of Dosimetric Characteristics of Human Hair Depending on the Content of Melanine. Medical Radiology and Radiation Safety. 2022;67(4):89-95. DOI: 10.33266/1024-6177-2022-67-4-89-95

### Введение

Важнейшей задачей дозиметрии является определение дозы излучения в различных средах и особенно в тканях живого организма, что необходимо прежде всего для выявления, оценки и предупреждения возможной радиационной опасности для человека. На данный момент дозиметрия находит себе применение во многих областях, связанных с использованием ионизирующего излучения.

Список задач, решаемых дозиметрией, постоянно расширяется. Первоначальной задачей было обеспечение безопасности, сейчас же все большее значение приобретает дозиметрия в радиационно-физических, радиа-

ционно-химических радиобиологических исследованиях; новые задачи стоят перед дозиметрией со стороны радиационных технологиях.

Для решения задач дозиметрии используют различные методы, одним из которых является метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Данный метод обеспечивает высокие показатели по точности определения дозы облучения путем регистрации малых концентраций свободных радикалов, количество которых пропорционально дозе облучения. Одной из главных причин развития ЭПР-дозиметрии является простота анализа спектров с помощью магнитных параметров на

основе молекулярных структур. Другим важным фактором и в то же время замечательным свойством ЭПР-метода является чувствительность спектральных характеристик к электронному распределению, молекулярной ориентации, природе окружения и молекулярным движениям.

Ранее нашей научной группой были выполнены исследования по изучению воздействия ионизирующего излучения на ткани одежды, пластмассу, резину, кожу, а также на человеческие ногти и волосы [1].

Исследования волос методом ЭПР проводятся довольно давно [2]. Стержень человеческого волоса состоит из трех слоев [3]. Внешний слой, называемый кутикулой, занимает примерно 4% массы волоса. Сердцевинный слой – медулла – это центральная часть волосяного стержня, занимает примерно 6% его массы. Основную же массу волоса (до 90%) составляет кортекс. В нем содержится разное для каждого человека количество пигмента – меланина. Кортекс имеет сложное строение и состоит из белка кератина, богатого цистеином белка, который содержит многие другие типы аминокислот. Кератин получается специализированными клетками, которые умирают после того, как они были заполнены белком в волосяном фолликуле, поэтому состав волос зависит от их кровоснабжения во время формирования. По этой причине существует интерес к использованию анализа волос как маркера здоровья и воздействия потенциально опасных веществ [4]. Волос также способен адсорбировать различные химические вещества и соли из окружающей среды и, следовательно, может быть ценным инструментом для идентификации ряда связанных со здоровьем проблем, включая пассивное курение [5], алкоголизм [6], употребление наркотиков [7], воздействие тяжелых металлов [8–10], также некоторые заболевания, которые связаны с нарушениями накопления металлов [11].

Цвет волос обусловлен наличием в них меланина. Есть два типа меланина, эумеланин, который выглядит коричневым, и феомеланин, который выглядит красным, и полный диапазон цветов волос зависит от относительной концентрации этих двух пигментов [12,13]. Выработка меланина изменяется с возрастом и состоянием здоровья, и также подвержена стрессу [14]. Меланин имеет характерный ЭПР-сигнал [15,16].

Попытки использования человеческих волос в ретроспективной ЭПР дозиметрии предпринимались достаточно давно [17]. Было показано, что ЭПР сигнал меланина является фоновым для радиационно-индуцированного сигнала [18]. Образцы человеческих волос показали относительно невысокую радиационную чувствительность. Учитывая тот факт, что содержание меланина в волосах различного цвета может сильно варьировать, дозиметрия на них всегда будет иметь систематическую неопределенность. Целесообразной является разработка методики коррекции этой неопределенности в зависимости от цвета образца волоса.

Цель данной работы – исследование парамагнитных свойств радиационно-индуцированных центров, возникающих при химической обработке и при облучении образцов волос ионизирующим излучением в зависимости от цвета образца.

### Материал и методы

ЭПР-спектры записывались на спектрометре Bruker Elexsys E580 при комнатной температуре. Для улучшения отношения сигнал/шум спектр записывался с тремя накоплениями с постоянной по времени разверткой, равной 1 мин. Диапазон развертки поля был установлен равным

500 мТл для записи широкого сигнала и 5 мТл для записи сигнала меланина. Постоянное магнитное поле модулировалось частотой 100 кГц. Амплитуда модуляции магнитного поля выбиралась равной 1 мТл (сигнал кератина) и 0,01 мТл (сигнал меланина). Коэффициент усиления сигнала составлял 60 Дб. При измерениях использовался высокочувствительный прямоугольный резонатор Bruker SuperHighQ.

Исследования проводились над следующими образцами: черный волос – образец №1, русый – №2, седой и рыжий. Седые волосы от одного испытуемого разделили на три группы: №3 – к данной группе относятся полностью поседевшие волосы, №4 – волосы, имеющие остаточное пигментирование, №5 – непоседевшие волосы. Было исследовано два рыжих волоса одного донора – №6, №7, Средняя масса образцов составила 0,003г. Объем образцов подбирался таким образом, чтобы прядь волос помещалась в пробирку диаметром 5 мм, и чтобы образец занимал не более 10 мм в высоту.

Для облучения образцов использовался линейный ускоритель электронов УЭЛР-10-10С2 инновационно-внедренческого центра радиационной стерилизации Физико-технологического института УрФУ. Каждый из исследованных образцов делился на три порции, которые облучались дозами 11, 22 и 33 кГр в течение нескольких минут, затем в течение дня записывались ЭПР спектры. Такой диапазон доз был использован из-за технических ограничений использованного ускорителя.

Оценка интенсивности сигналов ЭПР производилась с помощью стандартного программного обеспечения Bruker X-EPR.

### Результаты и обсуждение

#### Воздействие ионизирующего излучения на волос

В данной работе проводилось исследование методом ЭПР семи образцов волос разного цвета, а именно: черные – №1, русые – №2, три образца, выделенных из седых волос (№3 – полностью седые волосы, №4 – волосы, имеющие остаточное пигментирование, №5 – не поседевшие волосы), два образца рыжих волос – №6, №7. В результате было показано, что спектры необлученных образцов включают в себя несколько компонент (рис. 1).

Первая компонента отвечает сигналам гемопротеиновых остатков ( $g=4,3$ ) и парамагнитных центров примесей, адсорбированных из внешней среды (в данном случае – ионы  $Fe^{3+}$ ). Характерной особенностью таких центров является ширина линии, которая составляет примерно 100 Гс.

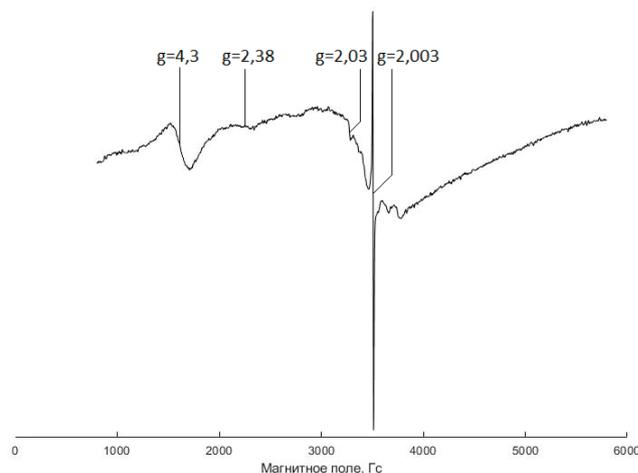


Рис. 1. Структура ЭПР-спектра необлученного волоса  
Fig. 1. Structure of the EPR spectrum of non-irradiated hair

Вторая компонента представляет собой широкий сигнал ЭПР, состоящий из двух линий: узкой симметричной линии шириной  $\Delta H=500$  Гс и  $g=2,38$  и более широкой – с шириной  $\Delta H=1000$  Гс и  $g=2,2$ .

Третья компонента обусловлена сигналом цистеиновых радикалов ( $g_1=2,00$   $g_2=2,03$   $g_3=2,06$ ). Характер распределения и парциальные вклады этих радикалов в естественном меланопротеиновом волокне (без химической и механической обработки) являются уникальными характеристиками отдельного волоса и могут нести важную диагностическую информацию о нарушении кераатиновой структуры белкового волокна.

Четвертая компонента – узкая симметричная линия, которая наблюдается только на спектрах ЭПР человеческого волоса с характерными параметрами, связанными с парамагнитными центрами, локализованными в гранулах меланина ( $g=2,003$ ) [19].

В данной работе наибольший интерес представили парамагнитные центры, дающие вклад в последнюю (узкую) компоненту сигнала ЭПР.

Были измерены сигналы ЭПР узкой компоненты всех образцов до облучения (рис. 2).

Видно, что интенсивность сигнала меняется в зависимости от образца, то есть от цвета волос, а значит, следует учитывать пигментацию волоса при его использовании для ЭПР-дозиметрии. Так, если оценить начальный ЭПР-сигнал меланина для образца №3 (полностью седые волосы), то можно заметить, что фоновый сигнал меланина мал по сравнению с другими образцами, что указывает на то, что в этом образце мало пигмента.

Для того чтобы определить вклад сигнала меланина в спектр ЭПР, образцы были облучены дозой 11 кГр три раза (т.е. конечная доза была 33 кГр), после каждого облучения снимались спектры ЭПР. Сопоставление начальных и конечных узких сигналов ЭПР меланина приведено на рис. 3.

Интенсивность сигнала у всех образцов после облучения увеличилась, так как возникли свободные радикалы в процессе разрушения структуры меланина, однако

это происходит по-разному в зависимости от свойств волоса: чем больше пигментирование образца, тем больше начальное значение нормированной на массу интенсивности, это значит, что радиационно-индуцированные центры в основном связаны с гранулами меланина.

Зависимость нормированной на массу образца волос интенсивности ЭПР отклика от дозы облучения (радиационная чувствительность) для каждого образца в общем случае имеет насыщение, однако в области низких доз близка к линейной (рис. 4). Видно, что наименьшей чувствительностью к облучению обладает образец №3, что также подтверждает, что в этом образце наименьшее количество гранул с меланином.

Также можно заметить, что интенсивность сигнала идет на спад при дозе 22 кГр у всех образцов, кроме №3, №4, №5. У образцов седых волос с пигментом (то есть образцы №4 и №5) интенсивность падает на гораздо меньшую величину, а у волоса без пигмента (№3) интенсивность возрастает почти линейно до дозы 33 кГр.

Можно предположить, что в образцах черных и русых волос преобладает один и тот же тип меланина – эумеланин, так как зависимости визуально ведут себя схожим образом. Интенсивность сигнала других образцов возрастает почти линейно до дозы 22 кГр, значит в этих образцах доминирует меланин другого типа – феомеланин. Однако зависимости для образцов рыжих волос идут на спад после дозы 22 кГр и ведут себя схоже с поведением черных и русых волос. Это можно объяснить тем, что после достижения пикового значения интенсивности в реакции на облучение начал превалировать тот же тип меланина, что и в черном и русом волосе, то есть в образцах изначально присутствовал меланин обоих типов.

Было проведено сравнение начального и пикового значения нормированных на массу интенсивностей в зависимости от цвета образца (рис. 5). Видно, что прирост интенсивности ЭПР-сигнала после облучения по отношению к начальному значению увеличивается с уменьшением интенсивности окраса волоса. Также можно заметить, что эта зависимость справедлива и для образцов седых волос.

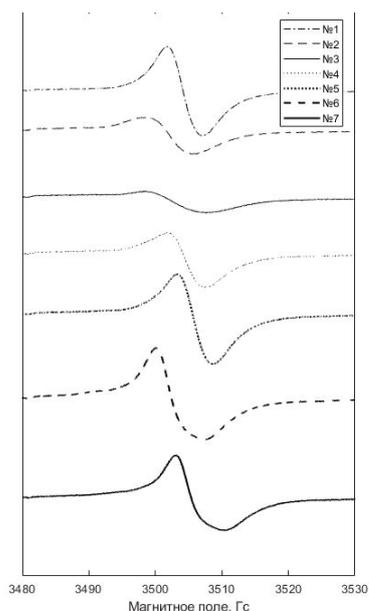


Рис. 2. Сигналы ЭПР меланина образцов до облучения: №1 – черные, №2 – русые, №3, №4, №5 – седые разной степени пигментации, №6, №7 – рыжие  
 Fig. 2. EPR signals of melanin in samples before irradiation: No. 1 – black, No. 2 – fair-haired, No. 3, No. 4, No. 5 – gray-haired with varying degrees of pigmentation, No. 6, No. 7 – red

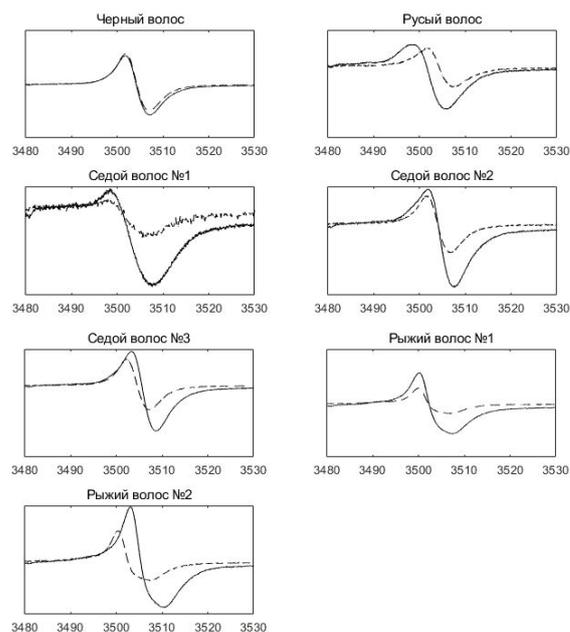


Рис. 3. ЭПР сигналы меланина исследуемых образцов до (пунктирная линия) и после (сплошная линия) воздействия ионизирующего облучения  
 Fig.3. EPR signals of melanin in the studied samples before (dotted line) and after (solid line) exposure to ionizing radiation

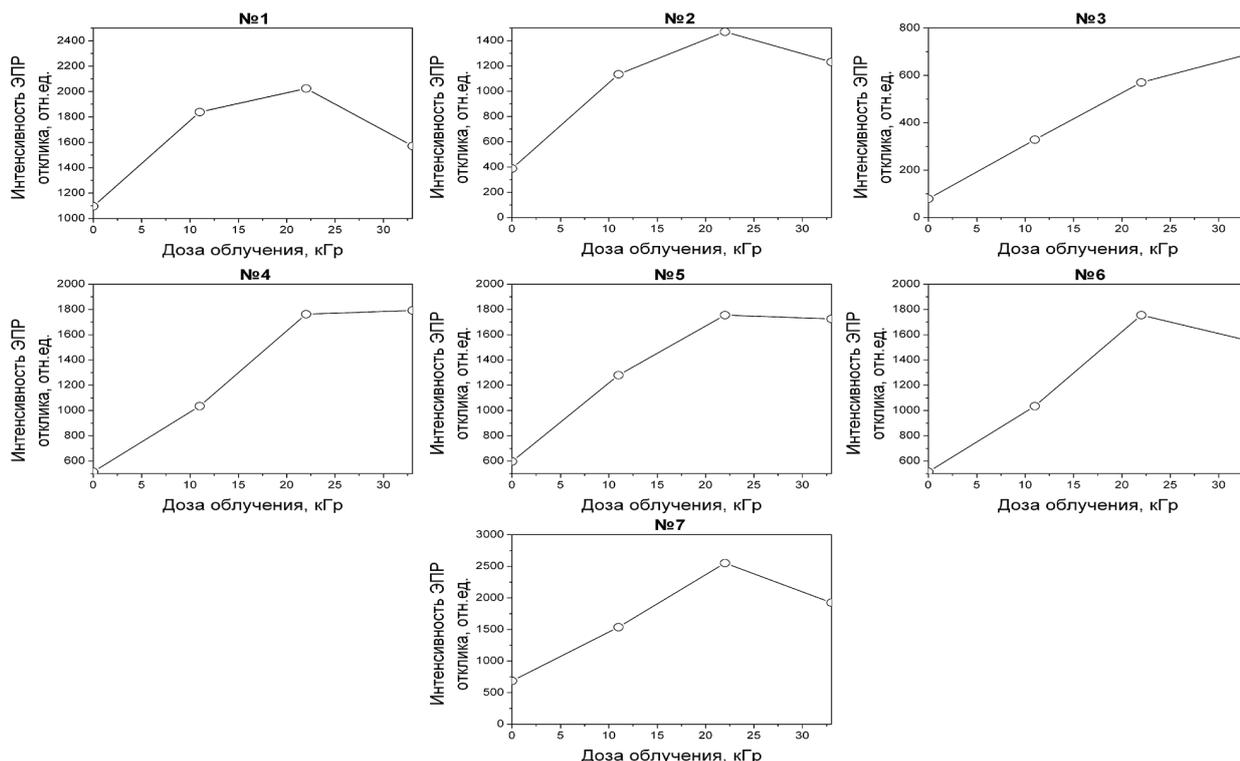


Рис. 4. Зависимость нормированной на массу общей интенсивности ЭПР-сигнала образцов в области расположения радиационно-индуцированного сигнала от дозы облучения  
 Fig. 4. Dependence of the total intensity of the EPR signal normalized to the mass in the area of the radiation-induced signal location on the irradiation dose

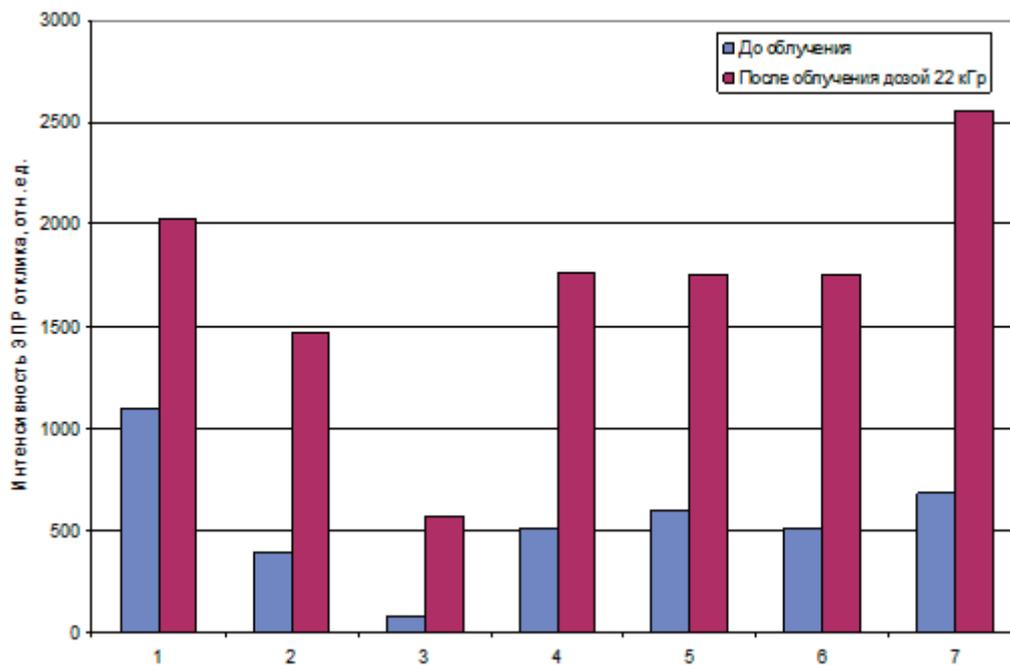


Рис. 5. Изменение нормированной на массу общей интенсивности ЭПР-сигнала образцов в области расположения радиационно-индуцированного сигнала, вызванное облучением образца. По горизонтали подписаны номера образцов  
 Fig. 5. Change in the mass-normalized total intensity of the EPR signal of the samples in the area of the radiation-induced signal, caused by the irradiation of the sample. Numbers of samples are signed horizontally

Учитывая вышесказанное, можно предположить, что должна существовать обратная зависимость радиационной чувствительности от концентрации меланина. Если принять гипотезу, что изначальный ЭПР сигнал меланина пропорционален концентрации меланина в волосе, то можно ожидать, что существует прямая зависимость радиационной чувствительности от обратного значения интенсивности сигнала меланина. На рис. 6

показана зависимость того, во сколько раз вырос ЭПР сигнал после облучения от обратного значения интенсивности исходного сигнала меланина. Прирост сигнала оценивался как разность интенсивности ЭПР сигнала после облучения и исходной интенсивности сигнала меланина. Характеристика, отложенная по оси ординат, может считаться мерой радиационной чувствительности, по оси абсцисс отложена мера «светлоты» волос.

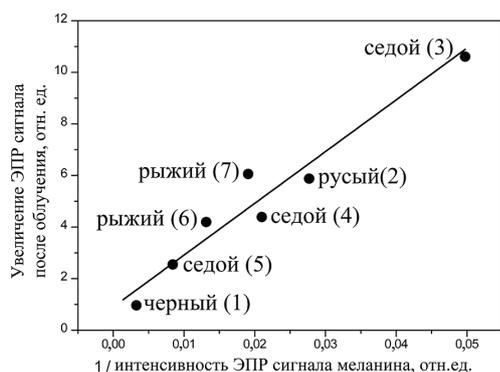


Рис. 6. Иллюстрация того, во сколько раз радиационно-индуцированный сигнал выше первоначального значения сигнала меланина в зависимости от обратного значения интенсивности сигнала меланина для волос различного цвета.

В скобках указаны номера образцов.

Fig. 6. An illustration of how many times the radiation-induced signal is higher than the initial value of the melanin signal, depending on the inverse value of the melanin signal intensity for hair of different colors.

Sample numbers are given in parentheses.

Как видно из рисунка, зависимость близка к линейной,  $R=0,934$ . Черные волосы обладают наименьшей радиационной чувствительностью. Максимальная чувствительность была получена для образцов седых волос (образец 3), однако необходимо заметить, что разброс значений чувствительности для седых волос очень высок, три значения располагаются близко к началу, в середине и в конце графика. Таким образом, можно сделать вывод, что радиационная чувствительность волоса обратно пропорциональна концентрации меланина в нем. Разброс точек, по всей видимости, вызван влиянием других факторов, оказывающих зависимость на

радиационную чувствительность, таких как влажность волоса, использование средств по уходу за волосами, возраст, пол и т.д. Однако, главенствующим фактором, влияющим на радиационную чувствительность, является все же цвет волос.

**Влияние типа образцов волос на устойчивость меланинов к химической обработке**

Ранее нами было проведено исследование, в котором было показано, что химическая обработка перекисью водорода оказывает различное влияние на необлученные образцы темных и светлых волос, причем эумеланин оказался менее устойчивым к воздействию  $H_2O_2$ .

В данном исследовании шесть облученных образцов (черный, русый, два седых разной степени обесцвечивания и два рыжих) были подвержены химической обработке 6% раствором перекиси водорода ( $H_2O_2$ ) с целью уменьшения сигнала меланина в спектре ЭПР. Сравнение спектров и интенсивностей ЭПР до и после химической обработки образцов показаны на рис. 7 и 8 соответственно. Перекись водорода обесцвечивает волос, то есть он становится менее пигментированным, а значит и интенсивность сигнала меланина образцов должна уменьшиться, что и подтверждают данные, показанные на рисунках.

Наиболее чувствительными к химической обработке оказались образцы русого и один из седых волос. Интенсивность ЭПР-сигнала данных образцов уменьшилась в 50,5 и 115,5 раз соответственно. Наименьшее изменение данного параметра наблюдается у образцов черного волоса и не до конца поседевшего волоса – в 1,2 и 1,3 раза, рыжие волосы показали средние результаты в этом исследовании – наблюдалось изменение интенсивности в 3,4 раза у каждого образца. Зависимость чувствительности меланина к химической обработке от окраса волоса для всех образцов является различной.

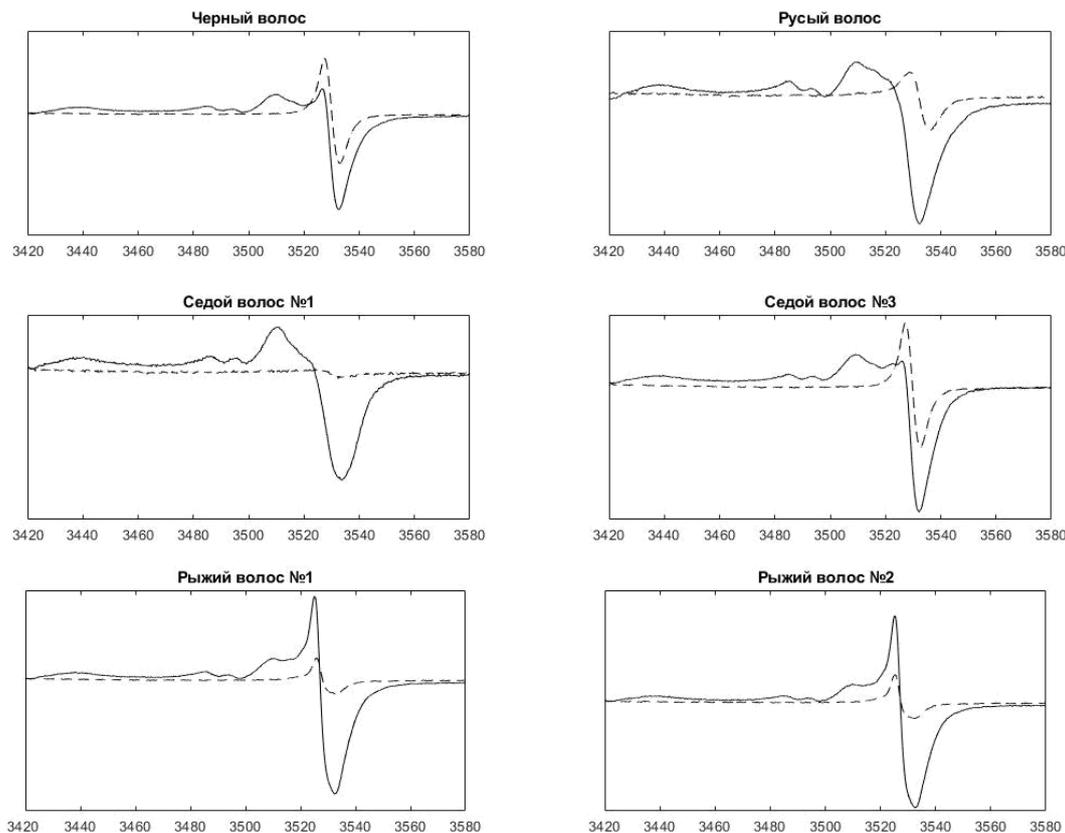


Рис. 7. ЭПР-сигналы исследуемых образцов до (сплошная линия) и после (пунктирная линия) химической обработки  
 Fig. 7. EPR signals of the studied samples before (solid line) and after (dotted line) chemical treatment

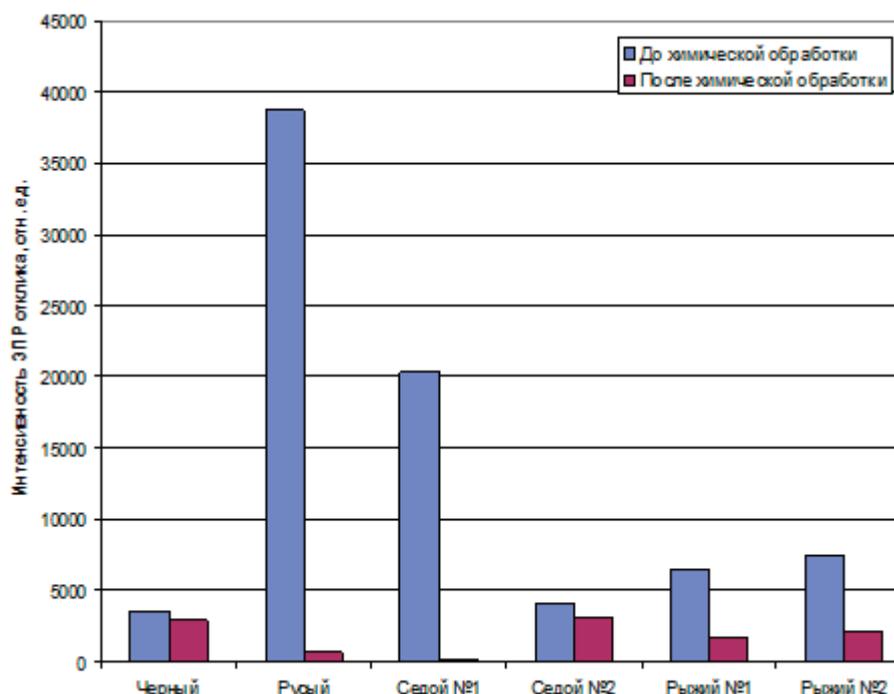


Рис. 8. Изменение интенсивности ЭПР-сигнала облученных волос. По горизонтали подписаны номера образцов  
Fig. 8. Change in the intensity of the EPR signal of irradiated hair. Sample numbers are inscribed horizontally

Как уже было сказано выше, волос состоит из двух типов меланина. Так как облученные образцы светлых волос оказались наиболее восприимчивы к химической обработке, то можно сделать вывод о том, что феомеланин, подвергшийся ионизирующему излучению, становится менее устойчивым к перекиси водорода.

#### Заключение

Исследованы параметры ЭПР-сигнала человеческого волоса в зависимости от дозы ионизирующего излучения для волос различного цвета.

Показано, что радиационные характеристики человеческого волоса сильно зависят от его цветовой группы.

#### Конфликт интересов. Финансирование.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 11.310.19.2 по теме «Совершенствование обеспечения аварийной готовности и реагирования Южно-Уральского регионального медико-дозиметрического аварийного центра в случае радиационных аварий» (шифр «Реагирование-19»), финансируемого ФМБА России. ЭПР измерения частично выполнены в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Спин», № АААА-А18-118020290104-2).

Статья подготовлена с равным участием авторов.

15.03.2022.

23.04.2022.

#### Участие авторов.

Поступила:

Принята к публикации:

#### Conflict of interest.

Financing.

The author declare no conflict of interest.

The work was carried out within the framework of state contract No. 11.310.19.2 on the topic "Improving the provision of emergency preparedness and response of the South Ural Regional Medical and Dosimetric Emergency Center in the event of radiation accidents" (code "Response-19"), funded by the Federal Medical and Biological Agency of Russia. EPR measurements were partly carried out within the framework of the state order of the Ministry of Education and Science of Russia (topic "Spin", No. АААА-А18-118020290104-2).

Article was prepared with equal participation of the authors

15.03.2022.

23.04.2022.

#### Contribution.

Article received:

Accepted for publication:

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

## REFERENCES

- Иванов Д.В., Байtimiров Д.Р., Конев С.Ф., Аладова Е.Е., Василенко Е.К. Использование различных материалов для ЭПР дозиметрии в случаях аварийного облучения // Вопросы радиационной безопасности. 2018. № 3. С. 75-81
- Gordy W., Ard W.B., Shieids H. // Proc. Nat. Acad. Sci. 1955. No. 41. P. 983-996. DOI: 10.1073/pnas.41.11.983.
- Чернова О.Ф., Целикова Т.Н. Атлас волос млекопитающих // Тонкая структура остевых волос и игл в сканирующем электронном микроскопе. М.: Товарищество научных изданий КМК. 2004.
- Goldstein B., Gibson J., Henderson R., et al. Biological Markers in Environmental Health Research // Environ. Health Persp. 1987. No. 74. P. 3-9. DOI: 10.1289/ehp.87743.
- Jaakkola M.S., Samet J.M. Occupational Exposure to Environmental Tobacco Smoke and Health Risk Assessment. Environ // Health Persp. 1999. V.107, No. 6. P. 829-835. DOI: 10.1289/ehp.99107s6829.
- Klein J., Koren G. Hair Analysis—a Biological Marker for Passive Smoking in Pregnancy and Childhood // Hum. Exp. Toxicol. 1999. No. 18. P. 279-282. DOI: 10.1191/096032799678840048.
- Girod C., Staub C. Acetylcodeine as a Marker of Illicit Heroin in Human Hair: Method Validation and Results of a Pilot Study // J. Anal. Toxicol. 2001. No. 25. P. 106-111. DOI: 10.1093/jat/25.2.106.
- Cizdziel J.V., Gerstenberger S. Determination of Total Mercury in Human Hair and Animal Fur by Combustion Atomic Absorption Spectrometry // Talanta. 2004. No. 64. P. 918-921. DOI: 10.1016/j.talanta.2004.04.013.
- Revich B.A. Lead in Hair and Urine of Children and Adults from Industrialized Areas // Arch. Environ. Health. 1994;49:59-62. DOI: 10.1080/00039896.1994.9934416.
- Bustueva K.A., Revich B.A., Bezpalko L.E. Cadmium in the Environment of Three Russian Cities and in Human Hair and Urine // Arch. Environ. Health. 1994. No. 49. P. 284-288. DOI: 10.1080/00039896.1994.9937481.
- Daniel K.G., Harbach R.H., Guida W.C., Dou Q.P. Copper Storage Diseases: Menkes, Wilsons, and Cancer // Front. Biosci. 2004. No. 9. P. 2652-2662. DOI: 10.2741/1424.
- Di Donato P., Napolitano A. 1,4-Benzothiazines as Key Intermediates in the Biosynthesis of Red Hair Pigment Pheomelanins // Pigm. Cell Res. 2003. No. 16. P. 532-539. DOI: 10.1034/j.1600-0749.2003.00085.x.
- Greco G., Panzella L., Verotta L., d'Ischia M., Napolitano A. Uncovering the Structure of Human Red Hair Pheomelanin: Benzothiazolylthiazinodihydroisoquinolines as Key Building Blocks // J. Nat. Prod. 2011. No. 74. P. 675-682. DOI: 10.1021/np100740n.
- Costin G.-E., Hearing V.J. Human Skin Pigmentation: Melanocytes Modulate Skin Color in Response to Stress // Faseb J. 2007. No. 21. P. 976-994. DOI: 10.1096/fj.06-6649rev.
- Sealy R.C., Hyde J.S., Felix C.C., Menon I.A., Prota G. Eumelanins and Pheomelanins: Characterization by Electron Spin Resonance Spectroscopy // Science. 1982. V.217, No. 4559. P. 545-547. DOI: 10.1126/science.6283638.
- Chikvaidze E., Khachatryan I. ESR Study of Photoinduced Free Radicals by Visible Light in Hair and the Effects of Ascorbic Acid (Vitamin C) // Int. J. Cosmet. Sci. 2011. No. 33. P. 322-327. DOI: 10.1111/j.1468-2494.2010.00628.x.
- Şeyda Çolak, Turan Özbey. An ESR Study on Biological Dosimeters: Human Hair. Rad. Meas. 2011. V.46, No. 5. P. 465-472. DOI: /10.1016/j.radmeas.2010.12.002.
- Trevedi A., Greenstock C.L. Use of Sugars and Hair for ESR Emergency Dosimetry // Appl. Radiat. Isot. 1993. No. 44. P. 85-90. DOI: 10.1016/0969-8043(93)90201-k.
- Tepe Çam S., Polat M., Seyhan N. The Use of Human Hair as a Biodosimeter // Appl. Radiat. Isot. 2014. No. 94. P. 272-281. DOI: 10.1016/j.apradiso.2014.08.021.
- Ivanov D.V., Baytimirov D.R., Konev S.F., Aladova Ye.Ye., Vasilenko Ye.K. Possibility of Various Materials to Be Used for EPR Dosimetry in Cases of Emergency Radiation Exposure. Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Journal of Radiation Safety Issues. 2018;3:75-81 (In Russ).
- Gordy W., Ard W.B., Shieids H. Proc. Nat. Acad. Sci. 1955;41:983-996. DOI: 10.1073/pnas.41.11.983.
- Chernova O.F., Tselikova T.N. Atlas of Hair of Mammals. Tonkaya Struktura Ostevykh Volos i Igl v Skaniruyushchem Elektronnom Mikroskope = The Fine Structure of Guard Hairs and Needle in a Scanning Electron Microscope. Moscow, Tovarishchestvo Nauchnykh Izdaniy KMK Publ., 2004 (In Russ).
- Goldstein B., Gibson J., Henderson R., et al. Biological Markers in Environmental Health Research. Environ. Health Persp. 1987;74:3-9. DOI: 10.1289/ehp.87743.
- Jaakkola M.S., Samet J.M. Occupational Exposure to Environmental Tobacco Smoke and Health Risk Assessment. Environ. Health Persp. 1999;107:6:829-835. DOI: 10.1289/ehp.99107s6829.
- Klein J., Koren G. Hair Analysis—a Biological Marker for Passive Smoking in Pregnancy and Childhood. Hum. Exp. Toxicol. 1999;18:279-282. DOI: 10.1191/096032799678840048.
- Girod C., Staub C. Acetylcodeine as a Marker of Illicit Heroin in Human Hair: Method Validation and Results of a Pilot Study. J. Anal. Toxicol. 2001;25:106-111. DOI: 10.1093/jat/25.2.106.
- Cizdziel J.V., Gerstenberger S. Determination of Total Mercury in Human Hair and Animal Fur by Combustion Atomic Absorption Spectrometry. Talanta. 2004;64:918-921. DOI: 10.1016/j.talanta.2004.04.013.
- Revich B.A. Lead in Hair and Urine of Children and Adults from Industrialized Areas. Arch. Environ. Health. 1994;49:59-62. DOI: 10.1080/00039896.1994.9934416.
- Bustueva K.A., Revich B.A., Bezpalko L.E. Cadmium in the Environment of Three Russian Cities and in Human Hair and Urine. Arch. Environ. Health. 1994;49:284-288. DOI: 10.1080/00039896.1994.9937481.
- Daniel K.G., Harbach R.H., Guida W.C., Dou Q.P. Copper Storage Diseases: Menkes, Wilsons, and Cancer. Front. Biosci. 2004;9:2652-2662. DOI: 10.2741/1424.
- Di Donato P., Napolitano A. 1,4-Benzothiazines as Key Intermediates in the Biosynthesis of Red Hair Pigment Pheomelanins. Pigm. Cell Res. 2003;16:532-539. DOI: 10.1034/j.1600-0749.2003.00085.x.
- Greco G., Panzella L., Verotta L., d'Ischia M., Napolitano A. Uncovering the Structure of Human Red Hair Pheomelanin: Benzothiazolylthiazinodihydroisoquinolines as Key Building Blocks. J. Nat. Prod. 2011;74:675-682. DOI: 10.1021/np100740n.
- Costin G.-E., Hearing V.J. Human Skin Pigmentation: Melanocytes Modulate Skin Color in Response to Stress. FASEB J. 2007;21:976-994. DOI: 10.1096/fj.06-6649rev.
- Sealy R.C., Hyde J.S., Felix C.C., Menon I.A., Prota G. Eumelanins and Pheomelanins: Characterization by Electron Spin Resonance Spectroscopy. Science. 1982;217:4559:545-547. DOI: 10.1126/science.6283638.
- Chikvaidze E., Khachatryan I. ESR Study of Photoinduced Free Radicals by Visible Light in Hair and the Effects of Ascorbic Acid (Vitamin C). Int. J. Cosmet. Sci. 2011;33:322-327. DOI: 10.1111/j.1468-2494.2010.00628.x.
- Şeyda Çolak, Turan Özbey. An ESR Study on Biological Dosimeters: Human Hair. Rad. Meas. 2011;46;5:465-472. DOI: /10.1016/j.radmeas.2010.12.002.
- Trevedi A., Greenstock C.L. Use of Sugars and Hair for ESR Emergency Dosimetry. Appl. Radiat. Isot. 1993;44:85-90. DOI: 10.1016/0969-8043(93)90201-k.
- Tepe Çam S., Polat M., Seyhan N. The Use of Human Hair as a Biodosimeter. Appl. Radiat. Isot. 2014;94:272-281. DOI: 10.1016/j.apradiso.2014.08.021.