

достоверно увеличивает содержание цАМФ и цГМФ в тимоцитах, а система циклических нуклеотидов в лимфоцитах периферической крови проявляла ярко выраженные изменения при действии аденозина.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеева, Л. В. Биохимия / Л. В. Авдеева, Т. Л. Алейникова, Л. Е. Андрианова. – М. : Изд-во «ГЭОТАР-медиа», 2015. – 768 с.
2. Северин, Е. С. Биохимия: учеб. для вузов / Е. С. Северин. – М. : Изд-во «ГЭОТАР-МЕД», 2004. – 784 с.
3. Щербак, И. Г. Биологическая химия / И. Г. Щербак. – СПб. : Изд-во СПбГМУ, 2005. – 486 с.
4. Уилсон, К. Принципы и методы биохимии и молекулярной биологии / К. Уилсон, Дж. Уолкер. – М. : Изд-во «Бином», 2013. – 849 с.

### АНАЛИЗ ХРОМОСОМНЫХ АБЕРРАЦИЙ, ИНДУЦИРОВАННЫХ В ЛИМФОЦИТАХ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ КРОВИ ЧЕЛОВЕКА, ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ГАММА-ЛУЧАМИ И ПРОТОНАМИ

### ANALYSIS OF CHROMOSOMAL ABERRATIONS INDUCED IN HUMAN PERIPHERAL BLOOD LYMPHOCYTES, AFTER IRRADIATION WITH GAMMA RAY AND PROTONS

**В. С. Рыжкова<sup>1</sup>, П. В. Куцало<sup>2</sup>, Е. А. Насонова<sup>2</sup>**  
**V. Ryzhkova<sup>1</sup>, P. Kutsalo<sup>2</sup>, E. Nasonova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ,  
г. Минск, Республика Беларусь  
veraryzkova@gmail.com

<sup>2</sup>Объединенный институт ядерных исследований,  
г. Дубна, Российская Федерация

<sup>1</sup>Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>The Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

Анализ радиационно-индуцированных цитогенетических эффектов действия  $\gamma$ -лучей, протонов терапевтического пучка фазотрона на входе в объект и протонов в области модифицированного пика Брэгга на лимфоциты периферической крови человека *in vitro*. Вычисленная величина ОБЭ протонов исходного пучка с энергией 150 МэВ составила 0,9 в диапазоне доз 0,5–5 Гр. При действии протонов в области пика Брэгга ОБЭ была около 1,1.

Analysis of the radiation-induced cytogenetic effects of the action of  $\gamma$  rays; protons from a therapeutic fascicle beam at the entrance; and protons in the modified Bragg peak region on human peripheral blood lymphocytes *in vitro*. The calculated RBE of the protons of the original 150-MeV beam was 0.9 in the range up to 0.5–5 Gy. Under the action of protons in the region of the Bragg peak, the RBE was about 1.1.

**Ключевые слова:** протонная терапия, относительная биологическая эффективность, хромосомные aberrации, CABAS.

**Key words:** proton therapy; Relative biological effectiveness chromosome aberrations, CABAS.

В настоящее время стремительно растет использование ионизирующих излучений (ИИ) в медицине для диагностики и терапии рака, в различных областях науки, промышленности и сельского хозяйства. Вследствие этого наблюдается нерегулируемое повышение естественного фона радиации на Земле, вызываемое радиоактивным загрязнением биосферы. Поэтому особую важность приобретает исследование биологического действия различных видов ИИ. В частности, знание цитогенетического действия излучений разного качества необходимо для эффективного планирования лучевой терапии [1], решения проблем радиозащиты и радиационной безопасности работников атомной энергетики, а также космонавтов при планируемых длительных полетах в дальний космос.

Исследование радиационно-индуцированных биологических эффектов (биомаркеров облучения), для сопоставления их с дозой, является основной задачей биодозиметрии. Наиболее распространенными, апробированными и корректными биологическими маркерами облучения, используемыми в биодозиметрии, остаются специфические радиационно-индуцированные цитогенетические нарушения – стабильные и нестабильные aberrации хромосомного типа [2].

Основной целью работы было изучение цитогенетических эффектов действия  $\gamma$ -лучей, протонов терапевтического пучка фазотрона Объединенного института ядерных исследований на входе в объект и протонов в области модифицированного пика Брэгга на лимфоциты периферической крови человека *in vitro*.

Образцы цельной крови, полученные от здоровых доноров, были облучены  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -лучами установки РОКУС-Мв диапазоне доз от 0,5 до 5 Гр (с мощностью дозы 0,82 Гр/мин), а также протонами терапевтического пучка фазотрона медико-технического комплекса Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова, ОИЯИ. Часть образцов цельной крови в пробирках была облучена немодифицированным пучком протонов на входе в объект с энергией 150 МэВ, подготовленного для проведения лучевой терапии пациентов. Средняя величина ЛПЭ и мощность дозы в объеме мишени составили 0,57 кэВ/мкм и 0,7 Гр/мин, соответственно. Вторая часть образцов была облучена в пике Брэгга, который с помощью гребенчатого фильтра был дополнительно модифицирован с образованием плато, расширенного до 10 мм. Энергия протонов в этом участке варьировала от 30 до 0 МэВ, ЛПЭ от 0,7 до 3,0 кэВ/мкм с максимальным вкладом при значении 1,4 кэВ/мкм. Мощность дозы составила 1,3 Гр/мин. Во всех экспериментах клетки облучали в диапазоне доз от 0,5 до 5 Гр.

Последующие процедуры культивирования и фиксации лимфоцитов периферической крови человека проводили согласно стандартизированному протоколу, рекомендованному МАГАТЭ [3]. Спектр и частоту радиационно-индуцированных хромосомных aberrаций нестабильного типа, обнаруживаемых без кариотипирования, оценивали в первом пострadiационном митозе через 48 часов от начала культивирования. На основе полученных результатов была изучена дозовая зависимость образования клеток с хромосомными aberrациями и общего числа хромосомных aberrаций в лимфоцитах периферической крови при действии исследованных видов ИИ *in vitro*. Оценка ОБЭ протонов терапевтического пучка, проведенная по соотношению доз протонного и  $\gamma$ -излучения при равных уровнях эффектов, показала, что величина ОБЭ протонов исходного пучка с энергией 150 МэВ близка к 0,9 в диапазоне доз 0,5–5 Гр. При действии протонов в области пика Брэгга ОБЭ составляла 1,1.

Кривые зависимости частот нестабильных ХА также были построены с помощью программного обеспечения САВАС [4], полученные кривые могут быть использованы в качестве калибровочных кривых для оценки дозы при случайном облучении людей.

Таким образом, выявлены количественные и качественные различия по цитогенетическим показателям в лимфоцитах периферической крови человека при действии  $\gamma$ -лучей, протонов терапевтического пучка фазотрона на входе и в области модифицированного пика Брэгга. Показано, что протоны в области пика Брэгга являются более эффективными по своему повреждающему воздействию, в то время как действие протонного пучка на входе практически равнозначно действию  $\gamma$ -лучей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Tommasino F. Proton Radiobiology / F. Tommasino, M. Durante // *Cancers*. – 2015. – V. 7. – P. 353–381.
2. Нугис, В. Ю. Современное состояние проблемы цитогенетической индикации дозы / В.Ю. Нугис, М.Г.Козлова, В.А.Никитина // *Мед. радиол. и рад. безопасность*. 2016. №5. С.83–89.
3. IAEA. Cytogenetic analysis for radiation dose assessment. Technical Report series № 405. International Atomic Energy Agency. – Vienna, 2001. – P. 105–122.
4. Deperas J. CABAS: a freely available PC program for fitting calibration curves in chromosome aberration dosimetry / J. Deperas, M. Szluinska, M. Deperas-Kaminska, A. Edwards et al. // *Radiat. Prot. Dosimetry*. – 2007. №124(2). – P. 115–23.

## ПРЕИМУЩЕСТВА МЕТОДА ПЦР В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ADVANTAGES OF THE METHOD OF PCR IN REAL TIME

**Е. А. Сальникова, Е. Е. Тарасова**  
**E. Salnikova, E. Tarasova**

Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ,  
г. Минск, Республика Беларусь  
vigasha845@gmail.ru

Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus

ПЦР в реальном времени (*ПЦР Real-time*) используется в клинико-лабораторной диагностике для выявления инфекционных агентов любой природы, для которых применение других методов (культурального, бактериологического, иммунологического) не дает достоверной информации. ПЦР *Real-time* используется для одновременной амплификации и измерения количества данной молекулы ДНК. Метод ПЦР в реальном времени включает в себя одновременно детекцию и количественное определение специфической последовательности ДНК в образце.

Метод использует общие принципы ПЦР. Основное отличие состоит в том, что измеряется количество амплифицированной ДНК в реальном времени после каждого цикла амплификации. Для количественного определения используют два метода — флуоресцентные красители, интеркалирующие в двуцепочечные мо-