

Буланова К.Я., Лобанок Л.М., Бокуть С.Б., Милевич Т.И. Особенности изменений структурной организации мембран эритроцитов и молекул гемоглобина в зависимости от мощности и величины дозы γ -облучения// Экологический вестник. – 2015, №2. – С.40-46.

УДК 577.54.042

К. Я. Буланова¹, Л. М. Лобанок², С. Б. Бокуть¹, Т. И. Милевич³

¹Международный государственный экологический университет имени А. Д. Сахарова, г. Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный медицинский университет, г. Минск, Республика Беларусь

³ГНУ «Институт радиобиологии НАН Беларуси», г. Гомель, Республика Беларусь

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ МЕМБРАН ЭРИТРОЦИТОВ И МОЛЕКУЛ ГЕМОГЛОБИНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МОЩНОСТИ И ВЕЛИЧИНЫ ДОЗЫ γ -ОБЛУЧЕНИЯ

Обнаружены структурно-функциональные перестройки в мембранах эритроцитов и молекулах гемоглобина на 10-е сутки после облучения организма ионизирующей радиацией в дозе 0,25 Гр в однократном и пролонгированном режимах. После облучения в дозе 0,5 Гр в эти же сроки постлучевого периода и при указанных способах облучения значимых изменений структуры мембран и молекул гемоглобина не было выявлено.

➤ **Ключевые слова:** мембрана эритроцитов, гемоглобин, доза γ -облучения

Введение

Наиболее распространенным объектом для изучения пострадиационных изменений в плазматических мембранах являются эритроциты крови. Эти клетки являются безъядерными и высокоспециализированными: гемоглобин является основным внутриклеточным компонентом. Поэтому они оказались удобным объектом для исследования многих физико-химических процессов, происходящих в их наружных мембранах и молекулах гемоглобина после воздействия ионизирующей радиации. Большинство исследований влияния ионизирующих излучений на мембраны этих форменных элементов и гемоглобин связаны, в основном, с эффектами больших доз. В частности, показано, что при воздействии облучения обнаруживаются повреждения структуры мембран. Однако подобные нарушения в эритроцитах и других клетках крови не возникают при действии на организм излучений в малых дозах или с низкой их мощностью. Основываясь на результатах, полученных в модельных мембранных системах, можно предположить, что развитие постлучевых изменений в мембранах эритроцитов организмов, облученных в малых дозах и с низкой мощностью, будет происходить вследствие нарушения белок-белковых, белок-липидных и липид-липидных взаимодействий. Известно, что для оценки изменений подвижности элементов мембранной структуры как липидов, так и белков, можно использовать такой интегральный показатель, как вязкость [1].

Успехи, достигнутые в последние годы в мембранологии, позволяют рассматривать мембрану эритроцита не только в качестве структурного компонента клетки – специфически организованной оболочки с регулируемыми физико-химическими свойствами, но и как координатора работы клетки в зависимости от характера поступающих информационных сигналов химической и физической (излучения) природы. Основным внутренним компонентом эритроцитов является гемоглобин, поэтому радиационно-индуцированные структурно-функциональные нарушения мембраны способны отразиться на его характеристиках. В то же время, изменения молекулы гемоглобина способны оказать влияние на характеристики мембраны по механизму обратной связи.

Современные представления о лучевом поражении гемоглобина основано, главным образом, на данных радиационно-химических исследований в модельных опытах. С их помощью оказалось возможным получить ценные сведения относительно характера радиобиологических повреждений в растворах гемоглобина, определить величины выходов продуктов его окисления и распада для разных видов ионизирующей радиации. Результаты этих исследований показали также, что при радиацион-

ном повреждении гемоглобина затрагиваются все уровни и элементы его молекулярной организации. Практически отсутствуют данные о влиянии малых доз радиаций на молекулы гемоглобина, хотя, как установлено в последнее время, именно малые дозы инициируют увеличение скорости реакций перекисного окисления липидов, сдвиги в процессах конформационных переходов различных форм гемоглобина в сторону увеличения метгемоглобина. Таким образом, изменения структурно-функционального состояния гемоглобина организма, облученного в малых дозах и с низкой интенсивностью, изучены недостаточно.

Целью данного исследования являлся анализ постлучевых изменений вязкостных характеристик общей и аннулярной липидных фаз мембран эритроцитов, а также особенностей конформационных перестроек мембранных белков и молекул гемоглобина.

Объекты и методы исследования

Все исследования выполнены на половозрелых беспородных белых крысах стадного разведения, 6–10-месячного возраста. Экспериментальных животных облучали в пролонгированном режиме на установке «ГАММАРИД-192/120» от цезиевого источника с мощностью дозы $2,8 \cdot 10^{-7}$ Гр/с до суммарных поглощенных доз 0,25 и 0,5 Гр. Другая серия экспериментов включала исследования после однократного (острого) облучения экспериментальных животных на установке «ИГУР» в аналогичных дозах при мощности дозы 10^{-3} Гр/с. Животных брали в опыт на 10 сутки пострадиационного периода. В качестве контроля использовали животных соответствующего возраста.

Мембраны эритроцитов выделялись по общепринятому методу Доджа [2]. Полученный осадок теней эритроцитов в фосфатном буфере (50 мМ, pH = 7,4) замораживали в жидком азоте и хранили до начала проведения измерений.

Структурное состояние мембран эритроцитов оценивали по интенсивности флуоресценции мембранных триптофанилов, эксимеризации пирена, эффективности тушения пиреном триптофановой флуоресценции, полярности окружения зонда в прибелковом липиде и липидном бислое. Регистрацию спектров эмиссии осуществляли на спектрофлуориметре СФЛ-2 (Solar, Республика Беларусь), при ширине щелей 8 нм со стороны возбуждения и 2 нм со стороны эмиссии в термостатируемой кювете ($t = 37^\circ\text{C}$), при длинах волн возбуждения 337 и 286 нм. В последнем случае интенсивности вибронных полос F1 и F3 (при $\lambda = 373$ и 385 нм, соответственно) корректировали с учетом белковой флуоресценции при указанных длинах волн и флуоресценции пирена, возбуждаемого непосредственно светом с $\lambda = 286$ нм.

Спиртовой раствор пирена (2 мМ) добавляли к водной суспензии мембран до конечной концентрации 10 мкМ. Концентрация этанола в суспензии не превышала одного объемного процента. В качестве меры физического состояния липидного бислоя и аннулярного липида использовался коэффициент эксимеризации (отношение эксимерной IЭ (при 470 нм) к мономерной IМ (при 373 нм) флуоресценции пирена.

При изучении гемоглобина кровь отбирали в пластиковые пробирки по 10 мл (в качестве антикоагулянта использовали гепарин). Затем кровь центрифугировали при 3000 об/мин в течение 10 мин. Осадок эритроцитов промывали переосаждением в растворе NaCl, операцию повторяли 5 раз. Гемоглобин выделяли из эритроцитов посредством лизиса эритроцитов при добавлении дистиллированной воды. Отделение белков плазмы достигалось их осаждением полунасыщенным раствором сульфата аммония с последующим диализом. Эритроцитарные мембраны осаждали центрифугированием при 10 000 об/мин в течение 30 мин при 4°C . После центрифугирования раствора и удаления осадка в супернатанте происходит медленная кристаллизация гемоглобина, которую осуществляют в течение длительного времени (около суток) на холоду.

Концентрацию гемоглобина в периферической крови, а также на всех стадиях выделения и очистки определяли спектрофотометрически на приборе UV-VIS-2501 PC «Shimadzu» (Япония), используя для расчетов молярный коэффициент поглощения, равный при 514 нм $13,8 \text{ мМ}^{-1} \text{ см}^{-1}$. Для изучения конформационных перестроек исследовалась собственная флуоресценция гемоглобина. Спектры флуоресценции 1-анилинонафталин-8-сульфоната (1,8-АНС) регистрировали при 20°C в термостатируемой кювете. Величины тушения флуоресценции остатков триптофана измерялись при $\lambda_{\text{фл}} = 330\text{--}335$ нм. [3]

Результаты исследований и обсуждение

Острое γ -облучение в дозе 0,25 Гр на 10-е сутки пострадиационного периода, судя по коэффициенту эксимеризации, приводило к значительному уменьшению микровязкости (увеличению текучести) общего липидного бислоя мембран. Аналогичные процессы отмечались также в областях аннулярных (прибелковых) липидов (табл.). После острого облучения в дозе 0,5 Гр достоверных изме-

нений параметров, характеризующих физическое состояние липидного бислоя и аннулярных липидов эритроцитарных мембран, не было обнаружено.

Полученные данные об изменении микровязкости мембран эритроцитов после облучения в дозе 0,25 Гр позволяют предположить, что постлучевая структурная модификация может привести к увеличению динамических дефектов в мембранах и, тем самым, изменить их гидратацию, полярность липидного бислоя, проницаемость. В этой связи, нами проведено изучение полярности липидной фазы в прибелковой области и в общем бислое мембран эритроцитов при соответствующих дозах облучения.

При оценке полярности прибелковых липидов и общего мембранного липидного бислоя установлено, что острое облучение в дозе 0,25 Гр приводит к увеличению гидрофобности интегральных и аннулярных липидов в исследуемые сроки пострadiационного периода. В отличие от этого, при однократной дозе облучения 0,5 Гр не наступало достоверных изменений полярности липидного компонента мембран эритроцитов (таб.).

Таблица

Величины степени эксимеризации пирена, полярности его окружения и предельного тушения белковой флуоресценции пиреном в эритроцитарных мембранах после острого и пролонгированного γ -облучения (отн. ед.) в дозах 0,25 и 0,5 Гр

Серии	Полярность аннулярного липида	Полярность липидного бислоя	Микровязкость аннулярного липида	Микровязкость липидного бислоя	Степень тушения, %
Контроль	0,62 + 0,01	0,65 + 0,03	0,30 + 0,01	0,21 + 0,04	45 + 1
Острое облучение					
0,25 Гр	0,84 + 0,05*	0,71 + 0,04*	0,68 + 0,03*	0,46 + 0,04*	63 + 1*
0,5 Гр	0,54 + 0,02	0,54 + 0,07	0,27 + 0,03	0,27 + 0,03	39 + 1
Пролонгированное облучение					
0,25 Гр	0,93 + 0,04*	1,05 + 0,05*	0,41 + 0,02*	0,42 + 0,05*	53 + 1*
0,5 Гр	0,62 + 0,03	0,62 + 0,06	0,27 + 0,02	0,21 + 0,02	45 + 1

Примечание: * – различия достоверны по отношению к контролю

При пролонгированном воздействии γ -излучения в дозе 0,25 Гр, так же как и при остром радиационном воздействии в этой же дозе, в мембранах эритроцитов происходит уменьшение микровязкости и увеличение полярности, как в общей липидной фазе мембран, так и в области ее аннулярных липидов. Пролонгированное облучение в дозе 0,5 Гр не вызывало достоверных изменений параметров текучести и полярности липидов в эритроцитарных мембранах (таб.).

Необходимо подчеркнуть, что при уменьшении микровязкости как липидного бислоя, так аннулярных липидов и увеличении их гидрофобности при облучении в дозе 0,25 Гр, эффект тушения пиреном флуоресценции мембранных триптофанилов увеличивался, что указывает на рост степени погруженности мембранных белков в липидную фазу. Такой эффект отсутствовал при дозе облучения 0,5 Гр.

В наших исследованиях выявлено, что при увеличении текучести липидного компонента мембран его полярность увеличивается. В модельных экспериментах также отмечается подобная закономерность. Так при изучении температурной зависимости флуоресценции пирена, иммобилизованного в мембраны, обнаружено, что полярность, как правило, увеличивалась при плавлении липидов, то есть, при переходе их в более жидкое состояние. Не исключено, что обнаруженные различия в величинах полярности окружения зонда в зоне аннулярных липидов и общей липидной фазе после γ -облучения разной интенсивности в дозе 0,25 Гр обусловлены существованием в мембранных бислоях и прибелковой его части неоднородных по вязкости липидных доменов.

Выявляемые радиационно-индуцируемые изменения физико-химических характеристик липидного компонента эритроцитарных мембран при дозах облучения 0,25 и 0,5 Гр являются обратимыми и легко восстанавливаются внутриклеточными и мембранными системами репарации. Тем не менее, в определенных случаях структурные перестройки белков и липидов могут создать условия, благоприятствующие активации перекисного окисления липидов (ПОЛ). Так в эритроцитах инициация ПОЛ может усилиться в пострadiационный период, например, за счет ионов железа гемоглобина, вследствие его автоокисления и образования метгемоглобина и гемихрома.

Гемоглобин является основным компонентом эритроцитов крови и выполняет ряд специфических функций, в частности, участвует в газообмене и поддержании рН крови. Для выполнения этих функций имеют значение структурно-функциональные характеристики гемоглобина и наличие множества его форм. Функционально активная форма содержит в порфириновом кольце ион двухвалентного

железа, способного связывать молекулы кислорода. Существование различающихся по функциональной активности форм гемоглобина представляет собой один из биохимических механизмов адаптации, нарушение которого ведет к увеличенному образованию окисленных форм гемоглобина. При окислении гемового железа в ферроформу (с трехвалентным железом) образуется метгемоглобин и гемихром. Значительная интенсификация этого процесса может способствовать развитию гипоксического состояния организма. Подобные явления характерны для процесса старения клеток и некоторых патологий, сопровождающихся накоплением продуктов перекисного окисления липидов.

Различные функциональные формы гемоглобина имеют определенные структурные особенности. Гемоглобин, как многие биологически важные соединения, обладает свойством излучательной дезактивации синглетного электронно-возбужденного состояния, т. е. флуоресценции. Собственная флуоресценция белков обусловлена ароматическими аминокислотами, входящими в их состав, причем из трех флуоресцирующих аминокислот (фенилаланин, тирозин, триптофан) наибольший вклад в собственную флуоресценцию белка вносит триптофан. Изменение физико-химического состояния макромолекулы и, следовательно, микроокружения хромофора способно привести к значительным различиям параметров флуоресценции.

Как следует из данных, представленных на рис. 1, однократное облучение в дозе 0,25 Гр приводит к достоверному возрастанию интенсивности флуоресценции гемоглобина на 15%. После облучения в дозе 0,5 Гр интенсивность флуоресценции триптофанов гемоглобина незначительно (на 2,5%) падает (рис. 2).

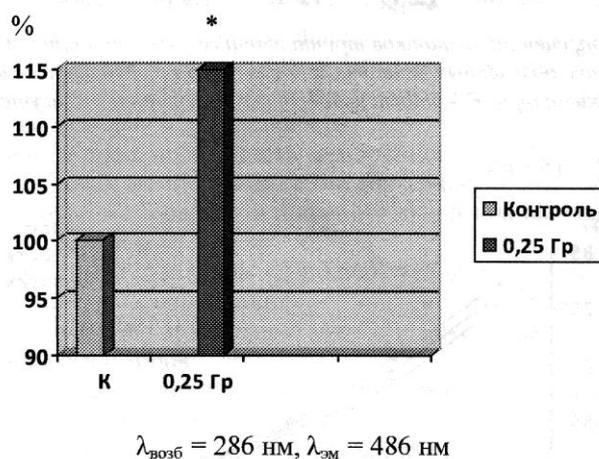


Рисунок 1 – Изменение триптофановой флуоресценции гемоглобина на 10 сутки после острого γ -облучения в дозе 0,25 Гр

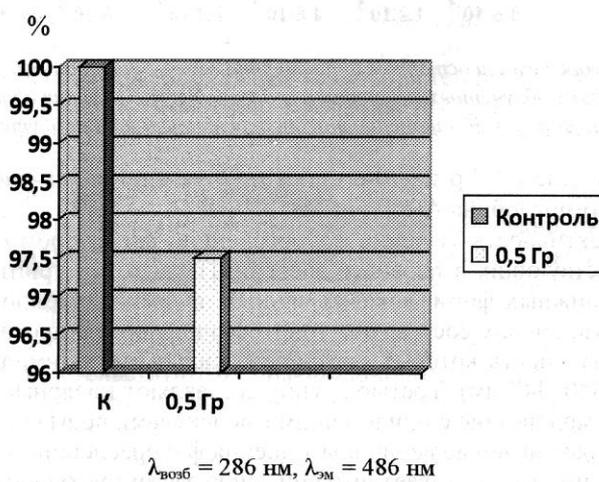


Рисунок 2 – Изменение триптофановой флуоресценции гемоглобина на 10 сутки после острого γ -облучения в дозе 0,5 Гр

Величина связывания АНС с белками очень чувствительна к модификациям их четвертичной структуры. Существование постлучевых конформационных перестроек должно отражаться в измене-

нии энергии основного и электронно-возбужденного состояний. Это непременно должно привести к нарушению динамических и статических контактов гемоглобина с тушителями флуоресценции

Исследовалась кинетика тушения белковой флуоресценции гемоглобина зондом АНС, способным к взаимодействию с положительно заряженными участками белков в гидрофобных и гидрофильных областях молекулы, в контроле и на 10 и 30 сутки после острого облучения в дозах 0,25 и 0,5 Гр.

На 10-е сутки после облучения в дозе 0,25 Гр эффективность тушения флуоресценции триптофановых остатков гемоглобина низкими концентрациями АНС была меньше, чем в контроле (рис. 3), то есть, перенос энергии возбуждения от донорских групп к акцепторным молекулам АНС снижался.

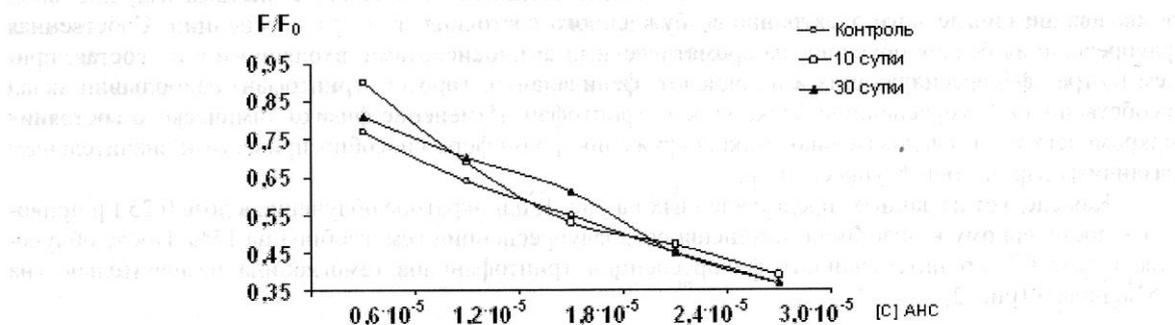


Рисунок 3 – Тушение флуоресценции остатков триптофана гемоглобина при добавлении флуоресцентного зонда АНС к препаратам облучённых животных в дозе 0,25 Гр: F_0 – интенсивность флуоресценции в отсутствие акцептора, F – интенсивность флуоресценции в присутствии акцептора

[НЬ] = 15 мкМ

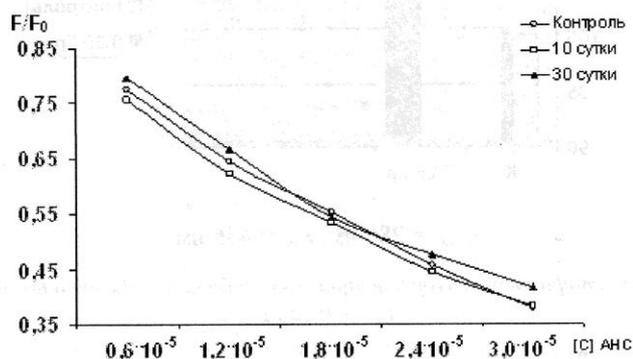


Рисунок 4 – Тушение флуоресценции остатков триптофана гемоглобина при добавлении флуоресцентного зонда АНС к препаратам облучённых животных в дозе 0,5 Гр: F_0 – интенсивность флуоресценции в отсутствие акцептора, F – интенсивность флуоресценции в присутствии акцептора

После облучения в дозе 0,5 Гр на 10-е сутки не отмечено каких-либо изменений в эффектах тушения флуоресценции гемоглобина АНС (рис. 4).

Известно, что эффективность тушения флуоресценции акцептором определяется типом триптофановых остатков, участвующих в переносе энергии. Первый тип триптофановых остатков относится к разряду малоподвижных форм, локализованных преимущественно в гидрофобных областях ($\lambda_{фл} = 330-332$ нм). Вторую группу составляют триптофаны ориентированные в полярные области белковой молекулы, подвижность которых ограничена сильными взаимодействиями с дипольными молекулами воды ($\lambda_{фл} = 340-342$ нм). Третью группу составляют полярные, подвижные триптофаны, имеющие слабое взаимодействие с прилежащими молекулами воды ($\lambda_{фл} = 350-352$ нм). Поскольку в наших исследованиях сравниваемые величины тушения флуоресценции остатков триптофана измерялись при $\lambda_{фл} = 330-335$ нм, это указывает, что снижение эффектов тушения осуществлялось за счет взаимодействия АНС с триптофановыми остатками гидрофобных зон. Полученные данные позволяют предположить, что низкие дозы облучения стимулируют процессы, определяющие формирование молекул гемоглобина с более плотно упакованной структурой.

В целом, полученные результаты об особенностях структурно-функциональной перестройки мембран эритроцитов свидетельствуют, что выявляемый на 10-е сутки постлучевой эффект зависит

в большей мере от дозы облучения, чем от ее мощности. Так после воздействия ионизирующих излучений в дозе 0,25 Гр независимо от ее мощности на 10-е сутки отмечались сходные эффекты – уменьшение микровязкости (увеличение текучести) липидного компонента.

Для поглощенной дозы 0,5 Гр, независимо от мощности источника излучения, было характерно отсутствие существенных различий между вязкостными характеристиками мембран эритроцитов контрольных животных и облученных (однократно и пролонгированно).

Как известно, изменение вязкостных характеристик является отражением различных модификаций межмолекулярных связей, которые, по сути, определяются сочетанием уровней подвижных и стабильных взаимодействий компонентов мембран, что вытекает из представлений о мембранной структуре, основанных на двух гипотетических моделях: жидко-мозаичной [4] и твердо-каркасной [5]. В одной из них подчеркиваются динамические аспекты организации мембран, в другой – на первый план выходит стабильность ее компонентов и межмолекулярных связей.

Важность поддержания относительной стабильности структуры мембран определяется необходимостью сохранения тех специфических мембранных функций, которые вызваны их тканевой принадлежностью, клеточной специализацией. Относительная стабильность связана с бислоиностью липидной организации мембран, существованием характерного для каждого вида мембран химического состава, сохранением асимметричности в распределении белков и липидов во внутренних и поверхностных слоях, создании агрегатов липидов с белками, липидов с липидами, липидных рафтов и белковых комплексов в пределах слоя.

Таким образом, можно полагать, что при облучении в дозе 0,5 Гр, независимо от ее мощности, на 10-е сутки после облучения вязкостные характеристики мембран эритроцитов не отличаются от контроля, что указывает на установление относительной стабильности структуры и функции мембран эритроцитов. После облучения в дозе 0,25 Гр на 10-е сутки характер межмолекулярных связей изменяется, увеличивается текучесть липидного компонента, что является отражением преобладания в этот период второго свойства мембран – динамичности.

Динамичность – относительная лабильность мембранной структуры, проявляется в подвижности отдельных молекул в пределах мембраны и ее бислоя, динамичности межмолекулярных связей, а в целом, отражает способности мембран к расширению диапазона выполняемых функций, то есть адаптации.

При лабилизации мембранной структуры возникают условия для реализации новых ее функциональных возможностей – осуществления дополнительно к рецептор-опосредованным процессам еще и структурных перестроек мембран (кооперативного и некооперативного характера) в ответ на воздействие различного рода регуляторов.

Согласно гипотезе генерализованных структурных перестроек мембраны [4] воздействие, затрагивающее критическое число элементов, оказывается достаточным для перестройки всей структуры. Передача конформационных изменений на расстояние осуществляется двумя способами: при участии белковых или липидных компонентов. Смысл кооперативности применительно к функциям биологических мембран заключается в том, что конформационные изменения, вызываемые фактором на локальных участках, способствуют распространению возмущения на всю мембрану и стимулируют переход ее в новое структурное состояние с иными динамическими характеристиками. Это приводит к существенным сдвигам активности многих транспортных систем и мембранозависимых ферментов, что составляет основу для расширения возможностей приспособления.

Таким образом, можно полагать, что обнаруженные на 10-е сутки после облучения в дозе 0,25 Гр изменения текучести, являются отражением адаптационных структурно-функциональных перестроек мембран эритроцитов.

Отсутствие изменений структурного состояния мембран после облучения в дозе 0,5 Гр и их выраженность при дозе 0,25 Гр позволяют предположить, что, возможно, скорость пострадиационного восстановления структурно-функциональных свойств эритроцитов выше после облучения в дозе 0,5 Гр, чем при облучении 0,25 Гр. Таким образом, процессы адаптации при большей дозе, очевидно, завершаются в более ранние сроки.

Приведенные выше данные о снижении связывания 1,8-АНС гемоглобином после острого γ -облучения в дозе 0,25 Гр свидетельствуют о конформационной модификации молекул гемоглобина. К сожалению, в настоящее время трудно ответить каков механизм структурной перестройки молекул гемоглобина облученного организма. Возможно, влияет постлучевая активация ПОЛ, способствующая увеличению концентрации метгемоглобина. С другой стороны, как мы отмечали выше, 1,8-АНС способен связываться с гемоглобином в гемовых карманах, а при действии γ -облучения в дозе 1 Гр связь гема с апобелком может ослабляться. Возможен и иной механизм, когда конформационной постлучевой перестройкой затрагивается апобелок гемоглобина, в результате чего происходит изменение поверхностного заряда молекулы.

Из приведенных сравнительных данных об особенностях тушения флуоресценции триптофанилов зондом АНС следует, что модификация молекул гемоглобина, вызванная γ -облучением малой

мощности носит обратимый характер: при облучении в дозе 0,5 Гр восстановление исходной конформации гемоглобина наблюдается уже на 10 сутки; облучение в дозе 0,25 Гр, вероятно, увеличивает период восстановления, который завершается не к 10-м, а к 30 суткам. К настоящему времени среди радиобиологов установилось мнение, что в определенном диапазоне малых доз радиации скорость процессов репарации может увеличиваться при возрастании дозы облучения, снижая, таким образом, величину постлучевого эффекта. Это может являться причиной отсутствия прямо пропорциональной линейной зависимости величин пострадиационных эффектов от доз облучения.

С этих позиций выраженный постлучевой эффект на дозу 0,25 Гр, проявленный в виде структурных перестроек мембран эритроцитов, молекул гемоглобина, а также отсутствие каких-либо радиационно-индуцированных изменений после облучения в дозе 0,5 Гр можно связать с различиями в скорости протеканию процессов репарации, инициированных этими излучениями. Представляет интерес также рассмотреть особенности проявлений постлучевых эффектов малых доз и низкой интенсивности с позиций сигнально-информационной гипотезы восприятия организмом ионизирующих излучений [6,7]. Согласно данной гипотезе нелинейность в отношениях доза-эффект является характерной особенностью сигнально-информационного, а не энергетического восприятия средовых факторов, в частности, малых доз и низкоинтенсивных излучений. Формирование ответных реакций организма в этой области излучений не зависят от энергетических или каких-либо других характеристик материального носителя (излучения), а определяются особенностями взаимодействия биологических объектов с низкоинтенсивными средовыми факторами, как источниками сигнальной информации. Различия в кодовом восприятии организмом разной по содержанию сигнальной информации, характеризующей разные по интенсивности и времени воздействия виды излучений, вызывают создание индивидуальных для каждой сигнальной информации алгоритмов управления биохимическими и физиологическими процессами, целью которых является поддержание и сохранение жизнеспособности организма в создавшихся новых средовых условиях существования.

Список литературы

1. Сунгуров, А. Ю. Радиобиология клеточной поверхности / А. Ю. Сунгуров // Итоги науки и техники. – 1988. – Т.7. – 179 с. – (Радиационная биология).
2. Dodge, J. T. The preparation and chemical characteristics of hemoglobin-free ghosts of human erythrocytes. / J. T. Dodge, C. Mitchell, D. J. Hanahas / Arch. Biochem. Biophys. Acta. – 1963. – vol. 100. – P. 119–130.
3. Особенности спектральных характеристик флуоресценции гемоглобина после низкоинтенсивного облучения крыс в разных дозах / К. Я. Буланова [и др.] // Матер. междунар. симпоз. «Актуальные проблемы дозиметрии», Минск, 27-29 окт., 1999. – Минск. – С. 91–94.
4. Singer, S. I. A fluid-globular protein mosaic model of membrane structure / S. I. Singer, S. L. Nicolson // Ann.N.-Y.Acad.Sci. – 1972. – Vol. 195, N 1. – P. 16–23.
5. Конев, С. В. Кооперативные переходы белков в клетке / С. В. Конев, С. Л. Аксенцев, Е. А. Черницкий. – Минск : Наука и техника, 1970 – 200 с.
6. Буланова, К. Я. Системный подход в радиобиологических исследованиях / К. Я. Буланова, Л. М. Лобанок // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2004. – Т.44, № 1. – С. 5–14.
7. Новый подход к оценке механизмов и последствий действия ионизирующих излучений в малых дозах на организм / К. Я. Буланова [и др.] // Весці НАН Беларусі. Серыя медыцынскіх навук. – 2006. – № 1. – С. 109–122.

K. Y. Bulanava, L. M. Labanok, S. B. Bokut, T. I. Milevich

FEATURES OF CHANGES IN STRUCTURAL ORGANIZATION OF ERYTHROCYTES MEMBRANES AND HEMOGLOBIN MOLECULES DEPENDING ON THE RATE AND MAGNITUDE OF THE DOSE OF γ -IRRADIATION

Structural and functional changes in the membranes of red blood cells and hemoglobin molecules were found on the 10th day after the exposure of the body to ionizing radiation at a dose of 0.25 Gy in single and extended modes. After irradiation at a dose of 0.5 Gy in the same post-radiation period and same irradiation methods, significant changes in membrane structure and hemoglobin molecules were not detected.