

НОВЫЙ ТИП РАДИОПРОТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАГНИТНОГО ИЗОТОПА МАГНИЯ-25

Среди изотопов ^{24}Mg , ^{25}Mg и ^{26}Mg с природным содержанием около 79, 10 и 11 % только ^{25}Mg имеет ядерный спин ($I = 5/2$) и, соответственно, магнитное поле, а ^{24}Mg и ^{26}Mg не имеют спина ($I = 0$) и магнитного поля. Обнаружены изотопные различия в кинетике восстановления клеток *S. cerevisiae* после коротковолнового УФ-облучения. Константа скорости восстановления оказалась вдвое выше для клеток, обогащенных ^{25}Mg , по сравнению с клетками, обогащенными немагнитным изотопом магния. Магнитно-изотопный эффект обусловлен, по-видимому, более высокой эффективностью изотопа ^{25}Mg , по сравнению с немагнитным изотопом, в качестве кофактора (Mg^{2+}) окислительного фосфорилирования, что обеспечивает клетки большим количеством АТФ. Таким образом, магнитный изотоп магния, как и некоторые антиоксиданты, может служить основой создания новых радиопротекторов («пищевых добавок») для защиты от действия хронической радиации. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований и Национальной академией наук Украины, гранты № 10-03-01203а и № 12-04-90424-Укр_а.

Ключевые слова: репарация, клетки дрожжей, радиопротекторы, магнитный изотоп магния-25.

Серед ізотопів ^{24}Mg , ^{25}Mg та ^{26}Mg з природним вмістом біля 79, 10 і 11 % тільки ^{25}Mg має ядерний спин ($I = 5/2$) та, відповідно, магнітне поле, а ^{24}Mg і ^{26}Mg не мають спіну ($I = 0$) та магнітного поля. Отримано ізотопну різницю у кінетиці відновлення клітин *S. cerevisiae* після короткохвильового УФ-опромінення. Константа швидкості відновлення виявилась вдвічі вищою для клітин, збагачених ^{25}Mg , порівняно з клітинами, збагаченими немагнітним ізотопом магнію. Магнітно-ізотопний ефект обумовлений, мабуть, більш високою ефективністю ізотопу ^{25}Mg , порівняно з немагнітним ізотопом, у якості кофактора (Mg^{2+}) окислювального фосфорилування, що забезпечує клітини більшою кількістю АТФ. Таким чином, магнітний ізоотп магнію, як і деякі антиоксиданти, може слугувати основою створення нових радіопротекторів («харчових добавок») для захисту від дії хронічної радіації.

Робота підтримана Російським фондом фундаментальних досліджень та Національною академією наук України, гранти № 10-03-01203а та № 12-04-90424-Укр_а.

Ключові слова: репарація, клітини дріжджів, радіопротектори, магнітний ізоотп магнію-25.

Among isotopes ^{24}Mg , ^{25}Mg and ^{26}Mg with the natural contents about 79, 10 and 11 %, only ^{25}Mg has of nuclear spin ($I = 5/2$) and, accordingly, magnetic field, and ^{24}Mg and ^{26}Mg have no spin ($I = 0$) and magnetic field. The isotope distinctions in velocity of reparation of cells *S. cerevisiae* after short-wave UV of an irradiation are found out. The constant of speed of reparation has appeared twice above for cells enriched ^{25}Mg , in comparison with cells enriched with a not magnetic isotope Mg. The magnetic-isotope effect is caused, apparently, by higher efficiency of an isotope ^{25}Mg , in comparison with a not magnetic isotope, in quality cofactor (Mg^{2+}) oxidizing phosphorylation, that provides cells with a plenty ATP. Thus, the magnetic isotope Mg, as well as some antioxidants, can form the basis creation new radioprotectors («of the food additives») for protection against action of chronic radiation.

The work is maintained by the Russian fund of basic researches and National academy of sciences of Ukraine, grants ¹ 10-03-01203a and ¹ 12-04-90424-Ukr.a

Key words: reparation, cells of yeast, radioprotectors, magnetic isotope Mg-25.

С середины прошлого столетия атомная энергетика стала частью нашей повседневной жизни. К сожалению, «человеческий фактор» делает неизбежными аварии,

даже катастрофы, как это было в Уиндскейле (Англия, 1957), Три-Майл-Айленде (США, 1979), Чернобыле (Украина, 1986) и Фукусиме (Япония, 2011). Нужно

заблаговременно принимать меры предосторожности, направленные на уменьшение пагубных последствий воздействия радиации на специалистов атомной промышленности, а также для защиты населения территорий, загрязненных радиацией. Для защиты от острого радиационного поражения известен целый ряд эффективных радиопротекторов на основе биологически активных аминов и аминокислот. Однако эти соединения весьма токсичны. Для защиты от хронического излучения в малых дозах необходимы иные лекарственные средства, нетоксичные и пригодные для долгосрочного применения в качестве пищевых добавок.

Многие живые организмы чувствительны к магнитному полю Земли, напряженность которого составляет приблизительно 0.5 G (0.05 mT) [1]. Например, существуют магниточувствительные бактерии, обладающие способностью перемещаться вдоль геомагнитных силовых линий Земли, благодаря наличию у них специфических приспособительных органелл – магнитосом, которые представляют собою частицы магнетита, размером порядка миллимикрона, организованные в цепочки внутри бактериальной клетки [2].

Однако, помимо внешних магнитных полей, существует другая разновидность магнетизма – внутримолекулярные магнитные поля атомных ядер магнитных изотопов. Эти магнитные поля, проявляющиеся, например, как сверхтонкое расщепление в спектрах электронного парамагнитного резонанса, могут в 10-100 раз превышать магнитное поле Земли [3]. Многие химические элементы имеют магнитные и немагнитные изотопы. Например, из трех стабильных изотопов магния, ^{24}Mg , ^{25}Mg и ^{26}Mg , природное соотношение которых 78.99, 10.00 и 11.01%, ^{25}Mg является магнитным изотопом (имеет ядерный спин $I = 5/2$), тогда как ^{24}Mg и ^{26}Mg – немагнитные изотопы (ядерный спин $I = 0$) [4].

Теоретическая часть

Жизнеспособность клеток и многоклеточных организмов определяется надежностью функционирования систем, защищающих и восстанавливающих субклеточные структуры и клетки от спонтанных и индуцированных повреждений [4]. Особую роль играют ферментативные системы восстановления (репарации) генетических структур [4; 5]. Общеизвестно, что для репарационных процессов, в том числе для репарации ДНК в клетках, необходимы молекулы АТФ, большинство которых синтезируется в процессе окислительного фосфорилирования. Обязательным кофактором этого процесса служит ион Mg^{2+} . В природе существуют три стабильных изотопа магния, ^{24}Mg , ^{25}Mg и ^{26}Mg , относительное содержание которых приблизительно 79, 10 и 11 %. Из них только ^{25}Mg является магнитным изотопом (имеет ядерный спин $I = 5/2$), тогда как ^{24}Mg и ^{26}Mg – немагнитные изотопы (ядерный спин $I = 0$) [3]. Недавно было показано, что магнитный изотоп магния, по сравнению с его немагнитными изотопами, служит более эффективным кофактором синтеза АТФ [4; 5]. Обнаружено, что клетки бактерий *Escherichia coli*, выросшие на магнитном изотопе ^{25}Mg , имеют более высокую жизнеспособность по сравнению с

клетками, росшими на немагнитных изотопах ^{24}Mg и ^{26}Mg [6].

Для выяснения детальных механизмов этой новой, магнитной изотопии и возможной ее роли в живой природе представляет особый интерес изучение репарационных процессов восстановления клеток от лучевых повреждений. В условиях пострадиационного восстановления отчетливо проявляются результаты воздействия факторов среды, в том числе физиологически активных веществ, способных прямо или косвенно повлиять на эффективность и надежность работы биомолекулярных нанореакторов клетки [7; 8].

Методы исследования

В настоящей работе показано, что магнитный изотоп ^{25}Mg , по сравнению с немагнитным изотопом ^{24}Mg , существенно эффективнее способствует восстановлению дрожжевых клеток после облучения коротковолновым ультрафиолетовым светом (УФ-С). Таким образом, впервые в мире обнаружен магнитный изотопный эффект в радиационной биологии.

Эксперименты выполнялись с клетками *S. cerevisiae*, диплоидный штамм MATtrp1::Kan/MATatrp1-1. Феноменология пострадиационного восстановления клеток этого типа хорошо изучена, процесс восстановления растянут во времени и легко модифицируется [9; 10]. Растворы сульфатов магния готовили из оксидов ^{24}MgO и ^{25}MgO производства ФГУП «Электрохимприбор», Росатом, с изотопным обогащением, соответственно, 99.8 и 98.8 атом. процентов. Элементный состав растворов анализировался с помощью масс-спектрометра высокого разрешения с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) «Element-2» (США). Клетки выращивали на стандартной питательной среде М3. В заранее приготовленную среду, не содержащую магния, объемом 3 мл вводили 0.1 мл инокулята клеток, 0.25 мл водного раствора сульфата магния-24 или магния-25 в 40 % этаноле; конечная концентрация магния в среде роста составляла 3.7 мМ/л. После трех суток культивирования в условиях непрерывной аэрации при 30 °С клетки отмывали от питательной среды (центрифугирование, 2 мин, 3000 об/мин), ресуспендировали в стерильном фосфатном буфере, рН 7.0 («голодная» среда восстановления, концентрация – 10^5 клеток/мл) и облучали в этой среде жестким УФ-светом ($\lambda = 240\text{--}260$ нм). Для определения кинетики восстановления облученные клетки инкубировали при 30 °С в той же «голодной» среде восстановления с периодическим высевом на стандартную питательную среду в чашки Петри с помещением их в темный термостат. Выживаемость определяли методом подсчета макроколоний [9; 10]. Опыты ставились в трехкратной повторности.

Экспериментальная часть

Результаты экспериментов с облученными клетками представлены на рисунках. Доза облучения в экспериментах такого рода прямо пропорциональна времени облучения [9; 10]. Исходя из полученного графика дозовой зависимости (рис. 1), время облучения во всех экспериментах было выбрано, равным 140 с, что соответствовало дозе облучения 190 Дж/м².

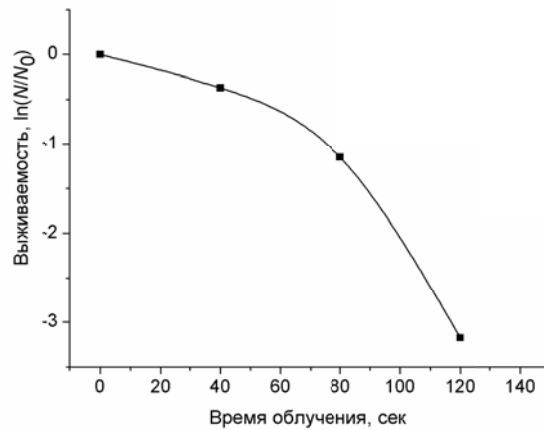


Рис. 1. Выживаемость клеток *S. cerevisiae* в зависимости от дозы УФ-облучения. По оси ординат – логарифм выживаемости, КОЕ/мл, в процентах к колониеобразующей способности необлученного контроля. По оси абсцисс – время облучения

Выживаемость клеток, перенесенных на агар сразу же после облучения в этой дозе, не превышала нескольких процентов (рис. 2). Большинство клеток не успевает репарировать поврежденные генетические структуры до наступления митоза, и при их

делении возникают нежизнеспособные дочерние клетки. Инкубация в «голодной среде», в которой клетки не делятся, обеспечивает дополнительное время для репарационных процессов, и соответственно увеличивается выживаемость.

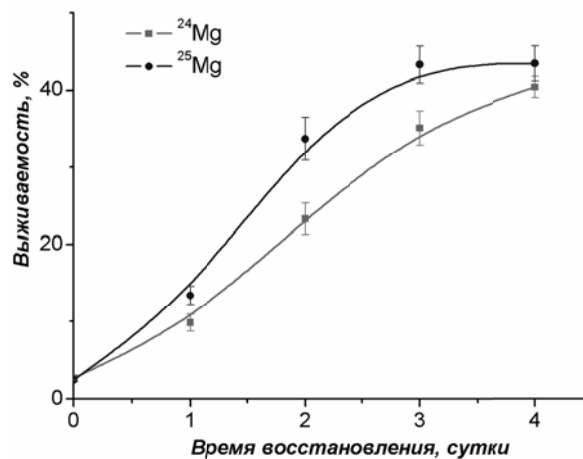


Рис 2. Кинетика пострadiационного восстановления клеток *S. cerevisiae*, обогащенных различными изотопами магния. По оси ординат – выживаемость, КОЕ/мл, в процентах к колониеобразующей способности необлученного контроля. По оси абсцисс – время инкубации в «голодной» среде в сутках.

Из приведенных на рис. 2 кинетических кривых видно, что клетки, обогащенные изотопом ²⁵Mg, восстанавливаются эффективнее, чем клетки, обогащенные изотопом ²⁴Mg. Известно, что кинетика пострadiационного восстановления дрожжевых клеток описывается функцией уменьшения со временем эффективной дозы облучения (модель Новика-Сцилларда):

$$D_{\text{eff}}(t) = D_0 [k + (1 - k)\exp(-\beta t)], \quad (1)$$

где D_{eff} – эффективная доза облучения, D_0 – исходная доза облучения, t – время восстановления, β – константа скорости восстановления, k – доля необратимых повреждений [9; 11].

Результаты расчетов кинетических параметров представлены в табл. 1. Из них видно, что клетки, обогащенные магнитным изотопом магния, демонстрируют вдвое большую константу скорости пострadiационного восстановления по сравнению с клетками, обогащенными немагнитным изотопом

магния. Доля необратимых лучевых повреждений при этом почти не изменяется.

Таблица 1

Значения параметров β (константа скорости восстановления) и k (доля необратимых повреждений) кинетических кривых пострadiационного восстановления клеток *S. cerevisiae*, обогащенных различными изотопами магния

Изотоп магния	β , час ⁻¹	k
²⁴ Mg	0.032 ± 0.003	0.70 ± 0.14
²⁵ Mg	0.058 ± 0.004 *	0.61 ± 0.12 **

* Различие между средними значениями статистически достоверно при $P = 0.02$.

** Различие между средними значениями статистически недостоверно при $P \leq 0.05$.

Можно было бы предположить, что причиной эффекта служит различие в содержании примесей каких-нибудь посторонних элементов, поступающих

Таблиця 2

Кривые восстановления клеток диплоидных дрожжей после облучения в дозе (УФС) 150 сек (170 Дж/м²). При выдерживании на голодной среде без приложения магнитного поля (Ln N/N₀)

Вариант	Mg-24	Mg-25	Смесь
150 сек (0 – суток)	- 2,112	- 3,064	- 2,465
1 сутки	- 1,80	- 2,32	- 1,57
2 суток	- 1,04	- 1,43	- 0,906
Скорость восстановления	0,022	0,034	0,032

Таблиця 3

Кривые восстановления клеток диплоидных клеток дрожжей после облучения в дозе (УФС) 150 сек (170 Дж/м²). При выдерживании на голодной среде с приложением магнитного поля (600 эрстед = 60 мТ), (Ln N/N₀)

Вариант	Mg-24	Mg-25	Смесь
150 сек (0 – суток)	- 2,112	- 3,064	- 2,465
1 сутки	- 1,48	- 1,92	- 1,67
2 суток	- 0,96	- 1,43	- 1,13
Скорость восстановления	0,024	0,034	0,028

По результатам этого эксперимента были проведены сравнительные оценки скоростей пострадиационного восстановления при отсутствии и наложении внешнего магнитного поля при выдерживании в термостате на голодной среде (табл. 4).

Таблиця 4

Оценки значений скорости пострадиационного восстановления β для клеток диплоидных дрожжей (штамм 2а -3) (2п) (магний 0,5 от первого варианта)

Вариант	β – при отсутствии действия магнитного поля	β – при действии магнитного поля
Mg-24	0,009	0,013
Mg-25	0,012	0,021
Смесь	0,009	0,009

Из табл. 3 видно, что влияние на скорость восстановления внешнего магнитного поля является меньшим относительно варианта относительно мало влияет на вариант выдерживания с добавлением Mg-24, и заметно в 1.8 раза увеличивает скорость восстановления при выдерживании клеток с Mg-25.

Заключение

Показано, что магнитный изотоп магния, как и некоторые антиоксиданты, может служить основой создания новых радиопротекторов («пищевых добавок») для защиты от действия хронической радиации.

Выяснено, что помещение клеток дрожжей в постоянное магнитное поле величиной 60 мТ способно заметно увеличивать скорость репарации диплоидных клеток дрожжей.

Обнаружено, что магнитный изотоп ²⁵Mg существенно более эффективно, чем немагнитный изотоп ²⁴Mg, способствует восстановлению клеток от лучевых повреждений. Полученные результаты демонстрируют принципиальную возможность создания радиопротекторов на основе соединений стабильного магнитного изотопа магния. Механизмы «магнитно-изотопного катализа» и его возможные биологические следствия – дело дальнейших исследований.

в среду роста вместе с различными изотопами магния. Однако, согласно данным масс-спектрометрии, элементный состав сред был одинаков для всех образцов при содержании примесных элементов не более нескольких микромолей на литр, независимо от типа изотопа магния. Кроме количества примесей, поступавших в среду роста от других реактивов, существенно превышалось количество тех же примесей от изотопов магния. Более того, содержание примесей в среде роста было одинаково во всех экспериментах, независимо от типа изотопа магния. Поэтому примеси не могут служить причиной более высокой эффективности изотопа ²⁵Mg по сравнению с ²⁴Mg.

Следовательно, активизация процесса восстановления клеток от лучевых поражений обусловлена магнитно-изотопным эффектом, а именно тем, что изотоп ²⁵Mg имеет магнитный момент (ядерный спин) в отличие от изотопа ²⁴Mg. В химии магнитно-изотопный эффект известен для многих элементов, имеющих магнитные и немагнитные изотопы, связан с законом сохранения электронного углового момента (спина) в химических реакциях и считается доказательством участия в реакции пары парамагнитных частиц – радикалов или ион-радикалов [4]. В биохимии магнитно-изотопный эффект был обнаружен в экспериментах с митохондриями, изолированными из сердца мышей, а именно: окислительное фосфорилирование идет с магнитным изотопом ²⁵Mg в 2-3 раза эффективнее, чем с немагнитными ²⁴Mg и ²⁶Mg [5]. Для объяснения этого эффекта было предположено [4; 5], что в активном центре АТФ-синтазы происходит перенос электрона от аниона фосфатной группы АДФ к иону Mg²⁺ с образованием ион-радикальной пары – Mg⁺-фосфатный радикал. Благодаря сверхтонкому взаимодействию, магнитный момент ядра ²⁵Mg изменяет электронный угловой момент этой пары, переводя ее из исходного синглетного состояния (полный электронный спин S = 0) в относительно долгоживущее триплетное состояние (S = 1), в котором выход реакции синтеза АТФ, соответственно, возрастает [4; 5].

Ионы Mg²⁺ служат не только кофакторами синтеза и гидролиза АТФ. От них, например, зависят структурно-функциональные свойства РНК различных типов, активность РНК-полимераз и рибонуклеаз и др. Существуют специализированные белки, регулирующие гомеостаз и транспорт ионов магния в клетках [12]. Однако в настоящее время в доступной литературе нет примеров магнитно-изотопных эффектов в каких-либо ферментативных процессах, за исключением синтеза АТФ в цитированных выше работах [4; 5]. Поскольку пострадиационное восстановление клеток требует синтеза целого ряда стрессовых белков, можно предположить, что кинетика восстановления лимитируется наличием АТФ как главного источника энергии в клетке. Соответственно, причиной магнитно-изотопного эффекта в наших экспериментах служит более высокая эффективность синтеза АТФ «топливно-силовыми» нанореакторами клеток.

Специальное исследование было проведено нами по изучению влияния внешнего магнитного поля на процессы пострадиационного восстановления клеток дрожжей (табл. 2 и 3).

ЛІТЕРАТУРА

1. K. J. Lohmann, Magnetic-field perception, *Nature*, 2010, 464:1140–1142; J.L. Gould, Magnetoreception, *Current Biol*, 2010, 20:R431–R435.
- A. Komeili, Molecular mechanisms of magnetosome formation, *Annu. Rev. Biochem*, 2007, 76:351–66.
2. D.M. Grant, R.K. Harris, eds., *Encyclopedia of Nuclear Magnetic Resonance*, 1996, Wiley, Chichester.
3. Young E.A., Galy A. // *Rev. Mineral. Geochem*. 2004. V. 55. P. 197-230.
4. Миллер Дж. Эксперименты в молекулярной генетике / Дж. Миллер. – Москва : Мир, 1976. – 436 с.
5. Дерябин Д. Г. / Д. Г. Дерябин, Е. С. Алешина // *Прикл. биохим. микробиол.*, 2008. V. 44. p. – 324-329. [*App. Biochem. Microbiol.* 2008. V. 44. P. 292-296 (Engl. Transl.)].
6. Варфоломеев С. Д. Биокинетика. Практический курс / С. Д. Варфоломеев, К. Г. Гуревич. – Москва : Фаир-Пресс, 1999. 720 с.
7. Бучаченко А. Л., Кузнецов Д. А., Архангельский С. Б. и др. // *ДАН*. 2004. Т. 396. – С. 828-830 59 [*Doklady Biochem. Biophys.* 2004. V. 396. P. 197-199 (Engl. Transl.)].
8. Бучаченко А. Л., Кузнецов Д. А., Бердинский В. Л. // *Биофизика*. 2006. Т. 51. С. 545-552 [*Biophysics*. 2006. V. 51. P. 489-496 (Engl. Transl.)].
9. Бучаченко А. Л. Новая изотопия в химии и биохимии / А. Л. Бучаченко. – Москва : Наука. 2007. – 189 с.
10. Koltov V. K. // *Nanotechnology-2008*. Vol. 1. Danville: Nano Science & Technology Institute (USA), 2008, pp. 254–257.
11. Надежность и старение биологических систем / [Гродзинский Д. М., Войтенко В. П., Кутлахмедов Ю. А., Кольтовер В. К.]. – Киев : Наукова думка – 1987. – 172 с.
12. Регенерационные механизмы онтогенетической радиоадаптации у растений. / [Михеев А. Н., Овсянникова Л. Г., Сытник С. В., Дяченко А. И., Гродзинский Д. М.]. // *Радиационная биология. Радиоэкология* – 2008 – 48, № 1. – С. 59-66.
13. Бучаченко А.Л. Новая изотопия в химии и биохимии / Бучаченко А. Л. – М. : Наука, – 2007. – 190 с.
14. Buchachenko A.L., Kouznetsov D.A., Breslavskaya N.N., Orlova M.A.. Magnesium isotope effects in enzymatic phosphorylation// *J. Phys. Chem. B* – 2008 – 112, No. 8. – P. 25-48.
15. Влияние различных изотопов магния на уровень активности супероксиддисмутазы при изучении кинетики роста *Escherichia coli*. / [Богатыренко Т. Н., Кудряшова Е. А., Туманова Л. В., Кольтовер В. К.] // V Междунар. конгресс «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине», тезисы докл. – Санкт-Петербург, 2009. – С. 92.
16. Кольтовер В. К. Восстановление клеток от лучевых повреждений с помощью антиоксидантов и надежность биологических систем / В. К. Кольтовер, Ю. А. Кутлахмедов, Е. Л. Афанасьева // *ДАН СССР*. – 1980. – 254, № 3. – С. 760-763.
17. Koltov V. K. Bioantioxidants: The system reliability standpoint. // *Toxicology and Industrial Health*. – 2009 – 25, No. 4-5, – P. 295-299.
18. Корогодина В. И. Проблемы пострadiационного восстановления / В. И. Корогодина. – М. : Атомиздат – 1966 – 486 с.
19. Королев В. Г. Экзцизионная репарация поврежденных оснований ДНК. АП- эндонуклеазы и ДНК-полимеразы. / В. Г. Королев // *Генетика*. 2005. – 41, № 10. – С. 1301-1309.
20. Novick A., Szilard L. Experiments on light-reactivation of ultra-violet inactivated bacteria. // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1949. – 35. – P. 591-600.
21. Dann C. E., Wakeman C. A., Sieling C. L., Baker S. C., Irnov I., Winkler W. C. Structure and mechanism of a metal-sensing regulatory RNA. // *Cell*. 2007. – 130, No. 5. – P. 878-892.

Рецензенти: *Міхеев О. М.*, д.мед.н., зав. лаб;
Дружина Н. А., д.мед.н., професор.

© Кольтовер В. К., Корольов В. Г.,
Кутлахмедов Ю. О., Євстіхіна Т. А. 2012 Дата надходження статті до редколегії: 15.04.2012 р.

КОЛЬТОВЕР Віталій Кімович – д.б.н., проф., зав. лаб. Інституту проблем хімічної фізики РАН, Чорноголовка, Московська область, Росія.

Коло наукових інтересів: радіаційна біофізика, теорія і моделі старіння, ЕПР, антиоксиданти, надійність біологічних систем.

КОРОЛЬОВ Володимир Геннадійович – д.б.н., проф., зав. молекулярної та радіаційної біофізики Петербурзького інституту ядерної фізики, Гатчина, Ленінградська область, Росія.

Коло наукових інтересів: молекулярна та радіаційна біофізика і радіобіологія, молекулярна та радіаційна генетика, репарація клітин від УФ- і гамма-радіаційного ураження.

КУТЛАХМЕДОВ Юрій Олексійович – д.б.н., проф., зав. лаб. радіоекологічної надійності біосистем Інституту клітинної біології та генетичної інженерії НАНУ, Київ, Україна.

Коло наукових інтересів: радіобіологія, радіоекологія, надійність біологічних систем на різних рівнях організації біоти, радіаційні та хімічні ризики для людини і біоти навколишнього середовища.

ЄВСТІХІНА Тетяна Анатоліївна – інженер відділення молекулярної та радіаційної біофізики Петербурзького інституту ядерної фізики, Гатчина, Ленінградська область, Росія.

Коло наукових інтересів: молекулярна та радіаційна біофізика і радіобіологія, молекулярна та радіаційна генетика, репарація клітин від УФ- і гамма-радіаційного ураження.