

А. В. СЕВАНЬКАЕВ, Е. А. ЖЕРБИН, Н. В. ЛУЧНИК,
Г. М. ОБАТУРОВ

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ БЫСТРЫХ И ПРОМЕЖУТОЧНЫХ НЕЙТРОНОВ ПРИ ВЫЗЫВАНИИ АБЕРРАЦИЙ ХРОМОСОМ В ЛИМФОЦИТАХ ЧЕЛОВЕКА

(Представлено академиком В. Д. Тимаковым 3 XI 1975)

Довольно ограниченные данные о генетическом действии промежуточных нейтронов дают основание ожидать существования некоторых закономерностей, которые нельзя предсказать путем простой экстраполяции результатов, полученных с другими излучениями ⁽¹⁾, а растущая доступность реакторов для применения их в медицине требует знания основных параметров биологического действия нейтронов разных энергий. В настоящем сообщении приводятся результаты опытов по облучению лимфоцитов человека потоками нейтронов со средней энергией 0,35 Мэв (промежуточные) и 0,85 Мэв (быстрые).

Использовали кровь взрослых клинически здоровых доноров; эритроциты осаждали 10% раствором желатины (45–50 мин.); сразу после облучения добавляли фитогемагглютинин и культивировали макрометодом в течение 50 час. Для получения достаточного количества метафаз за 4 часа до фиксации добавляли колхицин (подробности методики см. ⁽²⁾). Облучение нейтронами проводили на каналах П-2 и Б-3 реактора БР-10 при мощности реактора 0,05–5 Мвт. Мощность дозы при этом была для быстрых нейтронов 4–40 рад/мин, для промежуточных 6–260 рад/мин. Мощность дозы, в соответствии с литературными данными ⁽³⁾, на результатах не сказалась. Вклад в общую дозу гамма-лучей не превышал 5%. Описание реактора и физико-дозиметрические характеристики использованных каналов подробно описаны в работе ⁽⁴⁾. Для сравнения лимфоциты облучали в тех же условиях гамма-излучением ⁶⁰Со при мощности дозы 42 р/мин. При облучении нейтронами для каждой из доз анализировали по 300 метафаз, при облучении гамма-излучением — по 800–2000 метафаз.

Т а б л и ц а 1

Относительная биологическая эффективность промежуточных
и быстрых нейтронов по отношению к γ -излучению ⁶⁰Со
и друг к другу

Доза γ -лучей, рад.	О.б.э. нейтронов		
	быстрые относи- тельно γ -лучей	промежуточные относительно γ -лучей	промежуточные относительно быстрых
10	6,9	29	4,2
20	7,0	27	3,9
30	6,6	25	3,8
50	5,9	21	3,6
100	4,8	15	3,1
200	3,6	11	3,1
300	2,7	7,5	2,8
400	2,1	5,6	2,7

На рис. 1а изображена зависимость от дозы общего числа aberrаций для трех видов радиации. Наряду с подтверждением фактов, известных из литературы (³, ⁵, ⁶), — большей эффективностью нейтронов по сравнению с гамма-излучением и линейным ростом эффекта с дозой — эти результаты выявляют и некоторые новые закономерности. В табл. 1 приведены значения относительной биологической эффективности (о.б.э.) нейтронов со средней энергией 0,35 и 0,85 Мэв по отношению к гамма-излучению и друг к другу. Из таблицы видно, что о.б.э. по отношению к гамма-излучению, вопреки некоторым литературным данным (³, ⁵), заметно растет с уменьшением дозы, а при облучении промежуточными нейтронами достигает при низких дозах очень высоких значений. Значения

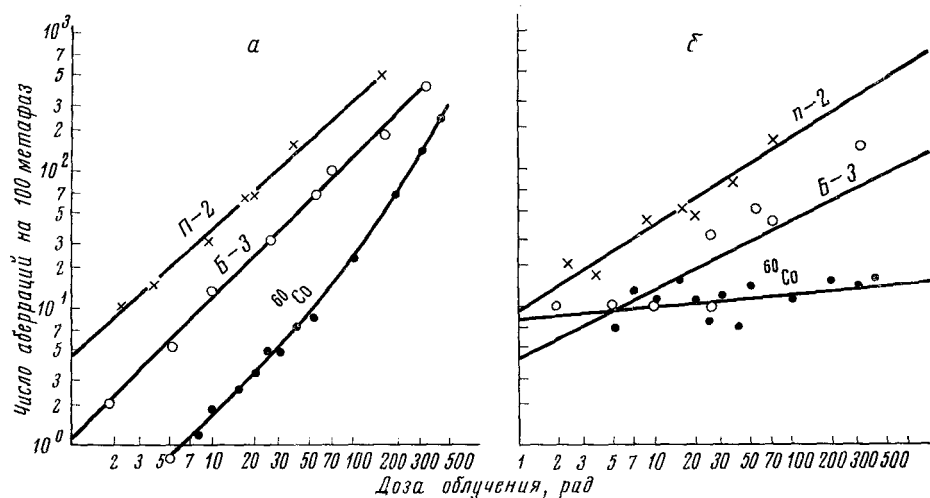


Рис. 1. Зависимость общего числа aberrаций (а) и числа хроматидных aberrаций (б) от дозы облучения. П-2 — промежуточные нейтроны; Б-3 — быстрые нейтроны; ⁶⁰Со — γ -излучение данного источника

о.б.э., приведенные в табл. 1, вычислены на основании общего числа aberrаций. Если вместо этого исходить из числа дицентриков и колец, или общего числа aberrаций хромосомного типа, или числа aberrантных клеток, то получаются сходные результаты.

Большая разница в эффективности быстрых и промежуточных нейтронов кажется неожиданной. Эффективность различных излучений принято связывать с различиями в линейной передаче энергии (л.п.э.), которая обуславливает разную эффективность частиц. Между тем расчет показал, что л.п.э. для двух примененных потоков нейтронов различается всего на 8% (соответственно 84 и 78 кэв/мкм), что никак не может объяснить наблюдаемых различий. Наблюдаемую разницу в числе aberrантных клеток можно объяснить тем, что при облучении промежуточными нейтронами та же доза создает в единице объема большее число вторичных частиц и потому доля пораженных клеток оказывается выше. Этим, однако, труднее объяснить увеличение числа aberrаций на 1 клетку при действии промежуточных нейтронов. Возможно, что оно связано с тем, что при облучении быстрыми нейтронами происходит избирательная задержка деления или гибель среди более поврежденных клеток.

На рис. 1б изображена зависимость от дозы числа aberrаций хроматидного типа. Как видно из рисунка, гамма-излучение при облучении лимфоцитов на стадии G₀ этих aberrаций не вызывает. То же, судя по литературным данным (⁶), характерно и для монохроматических нейтронов высоких энергий. При действии же нейтронных пучков со средней энергией 0,35 и 0,85 Мэв число их, как видно из рисунка, растет с дозой.

Появление аберраций хроматинного типа при облучении лимфоцитов на стадии G_0 нейтронами низких энергий отмечали и другие авторы (¹, ⁵, ⁷). Некоторые из них пытались объяснить это тем, что в клетках и в среде образуется наведенная радиоактивность, которая создает облучение на всех стадиях митотического цикла. Для проверки правдоподобности такого объяснения нами были проведены специальные расчеты. Оказалось, что при дозе внешнего нейтронного облучения 300 рад (наивысшая из примененных нами доз) полный распад ^{24}Na (основной радиоактивный изотоп, образующийся при облучении клеток и среды) создает после окончания стадии G_1 дозу, не превышающую 10^{-3} рад. Кроме того, как видно из рис. 1б, число аберраций хроматидного типа растет не пропорционально дозе (D), как следовало бы ожидать в случае действия наведенной радиоактивности, а значительно медленнее (примерно пропорционально $\sqrt{D}$). Поэтому совершенно очевидно, что наблюдаемый эффект не может быть связан с наведенной радиоактивностью.

Из того факта, что хромосома на стадии $G_0 - G_1$ реагирует на облучение гамма-лучами как одна нить, часто делают вывод, что хромосома на этой стадии действительно является однонитчатой. Однако обработка некоторыми химическими веществами приводит к тому, что хромосома и на этих стадиях реагирует на облучение как двойная структура (⁸, ⁹). При облучении же нейтронами низких энергий она реагирует, по нашим результатам, на действие радиации как двойная структура и без дополнительных воздействий. Можно высказать предположение, что повреждения половины сечения хромосомы происходят за счет механизмов, практически отсутствующих при облучении гамма-квантами или протонами высоких энергий, например за счет упругих столкновений вторичных заряженных частиц с ядрами атомов облучаемого вещества.

Объяснения новых фактов, предложенные в настоящей статье, являются пока рабочими гипотезами, требующими проверки в дальнейших исследованиях. Подлежат специальному исследованию и некоторые другие закономерности генетического действия нейтронов, также отмеченные в наших опытах, на которых мы не могли подробно остановиться в настоящем сообщении, например иное, по сравнению с гамма-лучами, соотношение между разными типами аберраций или иное распределение повреждений по клеткам.

Авторы приносят благодарность В. А. Зыбину за расчеты средних значений л.п.э., Э. И. Зейналову, В. А. Шанипу, В. В. Голуб, С. И. Капчигашеву за проведение измерений доз на реакторе.

Научно-исследовательский институт
медицинской радиологии
Академии медицинских наук СССР
Обнинск Калужской обл.

Поступило
3 XI 1975

ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. А. Троицкий, Н. В. Турбин, М. А. Арсеньева, Генетические эффекты промежуточных нейтронов, Минск, 1971.
- ² А. В. Севаньяев, Н. П. Бочков, Генетика, т. 4, № 5, 130 (1968).
- ³ D. Scott, H. Sharpe et al., Mutation Res., v. 8, 367 (1969).
- ⁴ E. A. Жербин, В. И. Иванов и др., Мед. радиол., т. 20, № 7, 52 (1975).
- ⁵ S. Todorov, M. Bulanova et al., Mutation Res., v. 17, 377 (1973).
- ⁶ M. Bauchinger, E. Schmid et al., Mutation Res., v. 27, 103 (1975).
- ⁷ M. A. Bender, Advances in Radiation Biol., v. 3, 245 (1969).
- ⁸ S. Wolff, Mutation Res., v. 10, 405 (1970).
- ⁹ W. C. Dewey, H. H. Miller, Exp. Cell Res., v. 57, 63 (1969).