

# ЗАВИСИМОСТЬ ПОРОГА ИНИЦИИРОВАНИЯ ВОЛНОВОГО ПРОЦЕССА В РЕАКЦИИ БЕЛОУСОВА- ЖАБОТИНСКОГО ОТ МОЩНОСТИ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ АЛЬФА-ЧАСТИЦ С ЭНЕРГИЕЙ 30 МэВ

А.П. Кайнова, А.В. Кузьмич, А.Б. Приселкова

НИИЯФ МГУ

*НИИ ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ имени М.В.Ломоносова*

wg2@anna19.sinp.msu.ru

## Введение

Как известно, явления, возникающие в ходе химических автоколебательных реакций, моделируют многие процессы самоорганизации, происходящие в живых системах. Они, по-видимому, являются существенной частью таких феноменов, как распространение мышечного сокращения, свёртывание крови, реакция гликолиза и т.д. [см. ссылки в 1]. Таким образом, подвергая внешнему воздействию систему, в которой происходит химическая колебательная реакция, (например, реакция Белоусова-Жаботинского (БЖ)), можно моделировать и в какой-то степени прогнозировать результат этого воздействия на биологические системы. В литературе описаны два эксперимента по воздействию жёсткого электромагнитного излучения на протекание реакции БЖ (см. ссылки в 1). В этих экспериментах наблюдалось полное подавление автоколебаний во всем объеме при облучении гамма-квантами из источника  $^{60}\text{Co}$ . Возникновение центров образования волн не отмечалось.

Инициирование волнового процесса в реакции БЖ локальным воздействием пучка частиц из циклотрона впервые наблюдалось нами в [1]. Была получена оценка порога инициирования этого процесса.

В настоящей работе рассматриваются зависимость порога инициирования волнового процесса от интенсивности пучка альфа частиц с энергией 30 МэВ из 120-см циклотрона НИИЯФ МГУ.

## Методика эксперимента

Воздействие на реакцию типа Б-Ж потоков альфа-частиц с энергией 30,5 МэВ изучалось на 120-см циклотроне НИИЯФ МГУ. ЛПЭ таких частиц соответствует ЛПЭ релятивистских галактических ядер группы углерода-азота.

Пучок альфа-частиц из циклотрона проходил по ионопроводу через систему линз, диафрагм и отклоняющих магнитов, далее выходил из окна ионопровода на воздух и попадал на капилляр, содержащий реакционную смесь. В качестве окна на фланце ионопровода использовалась алюминиевая фольга толщиной 50 мкм. Окончательно пучок формировался дополнительными сменными диафрагмами. Диафрагмы крепились на шток, перемещаемый микродвигателем, что позволяло дистанционно управлять вводом и выводом диафрагм (или перекрыванием пучка). Диаметр отверстия

диафрагмы составлял 2 мм. Диафрагмы были изготовлены из тантала, поскольку наведенная радиоактивность в нем мала из-за высокого значения кулоновского барьера.

Наблюдение и видеосъемка изучаемого процесса осуществлялись при помощи веб-камеры Philips и компьютера, подключенного к ней с помощью последовательно соединенных USB-репитеров. Результаты съемки записывались на жесткий диск компьютера в режиме on-line. Затем в режиме off-line цвет в анализируемых точках разлагался на RGB-составляющие. Полученные таким способом результаты использовались для количественного анализа автоволновых процессов.

Пучок мониторировался по величине заряда, попадающего на диафрагму и кювету. Для измерения этого заряда использовался интегратор тока с чувствительностью  $2 \cdot 10^{-4}$  мкКл/импульс и пересчетный прибор. Для улучшения равномерности плотности тока пучка на выходе из окна он был несколько расфокусирован магнитными квадрупольными линзами циклотрона и периодически просматривался с помощью сцинтилляционного экрана. Точность определения величины поглощенной дозы оценивалась в 15%.

Реакция проводилась в капилляре из пирекса длиной 90 мм, внешним и внутренним диаметром 1,2 и 0,9 мм, соответственно. Капилляр располагался в горизонтальной плоскости перпендикулярно пучку.

Потери энергии альфа-частиц в окне ионопровода и слое воздуха составляли 4,3 МэВ, так что энергия альфа-частиц на внешней поверхности капилляра составляла 26,2 МэВ. Энергия альфа-частиц, попадающих в реакционную смесь, изменялась, от 18,5 МэВ на оси капилляра до 5,5 МэВ и меньше на краях, поскольку частицы проходили через слой пирекса разной толщины. Остаточный пробег альфа-частиц в растворе не превышал толщины слоя раствора.

В конце пробега альфа-частиц ЛПЭ достигала значений порядка  $2 \cdot 10^1$  кэВ/мкм воды.

Время облучения варьировалось в пределах от нескольких секунд до нескольких десятков секунд, а интенсивность пучка от 1 до 30 нА.

Также была исследована зависимость порога инициирования волны от мощности поглощенной дозы альфа-частиц из циклотрона

За время эксперимента тепловой конвекцией и диффузией в камере и в капилляре можно пренебречь. Нагрев стекла (при работе с капилляром) и реакционной смеси незначителен (менее  $0,1^\circ\text{C}$  в течение облучения).

### Результаты эксперимента и их обсуждение

При облучении раствора наблюдалось образование ведущего центра реакции[2]. В противоположных направлениях от центра облучения расходились две практически плоские волны. Инициация волны практически не зависела и от интенсивности пучка. Минимальное значение поглощенной дозы, при которой наблюдалось образование ведущего центра, составило  $8 \cdot 10^1$  Гр.

В случае наложения инициированных пучком волн на спонтанные волны, всегда наблюдающиеся в растворе, происходило их взаимное гашение.

На рис. 1 представлены развертки по времени синей составляющей RGB-разложения в точке, отстоящей от центра облучения на 10 мм. Временной интервал между двумя соседними волнами составляет около 130 с. Интенсивность последовательных волн после однократного облучения убывает со временем.

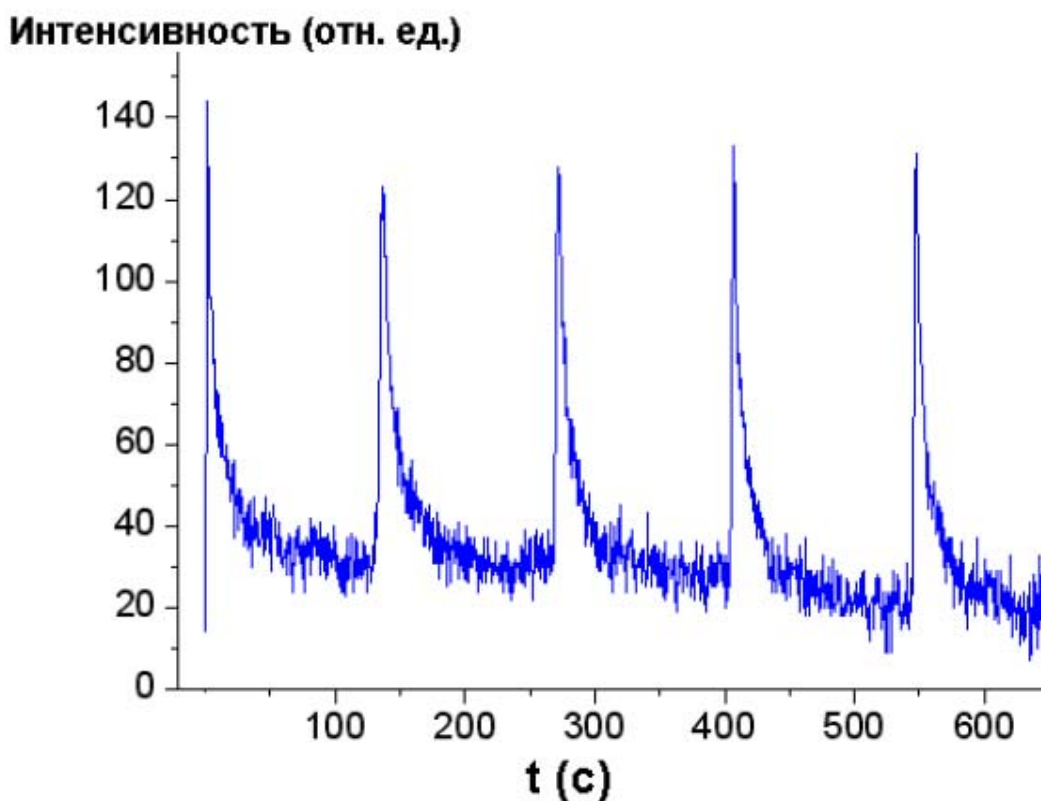


Рис.1. Зависимость интенсивности синей составляющей RGB-разложения от времени для данного эксперимента при  $D=150$  Гр

Облучение пучком альфа-частиц всего объема реакционной смеси в кювете приводило к приостановлению автоволнового процесса во всем объеме кюветы при значениях поглощенной дозы порядка 60 кГр. После прекращения облучения автоволновой процесс возобновлялся через 2-3 минуты. Можно предположить, что ионизирующее излучение с высокой ЛПЭ активизирует реакцию восстановления бромат-аниона до бромид-аниона. Это утверждение также отчасти подтверждается изменением окраски при облучении кислого раствора, содержащего бромат калия и ферроин с синего на красный и возвращение прежней окраски после прекращения облучения (ферроин является индикатором протекания окислительно – восстановительных процессов).

На рис. 2 представлена зависимость порога инициирования автоволны от мощности поглощенной дозы. Обратная зависимость может быть связана с

тем, что реакция рекомбинации свободные радикалов имеет второй порядок по  $\cdot OH$  в отличие от реакции (1).

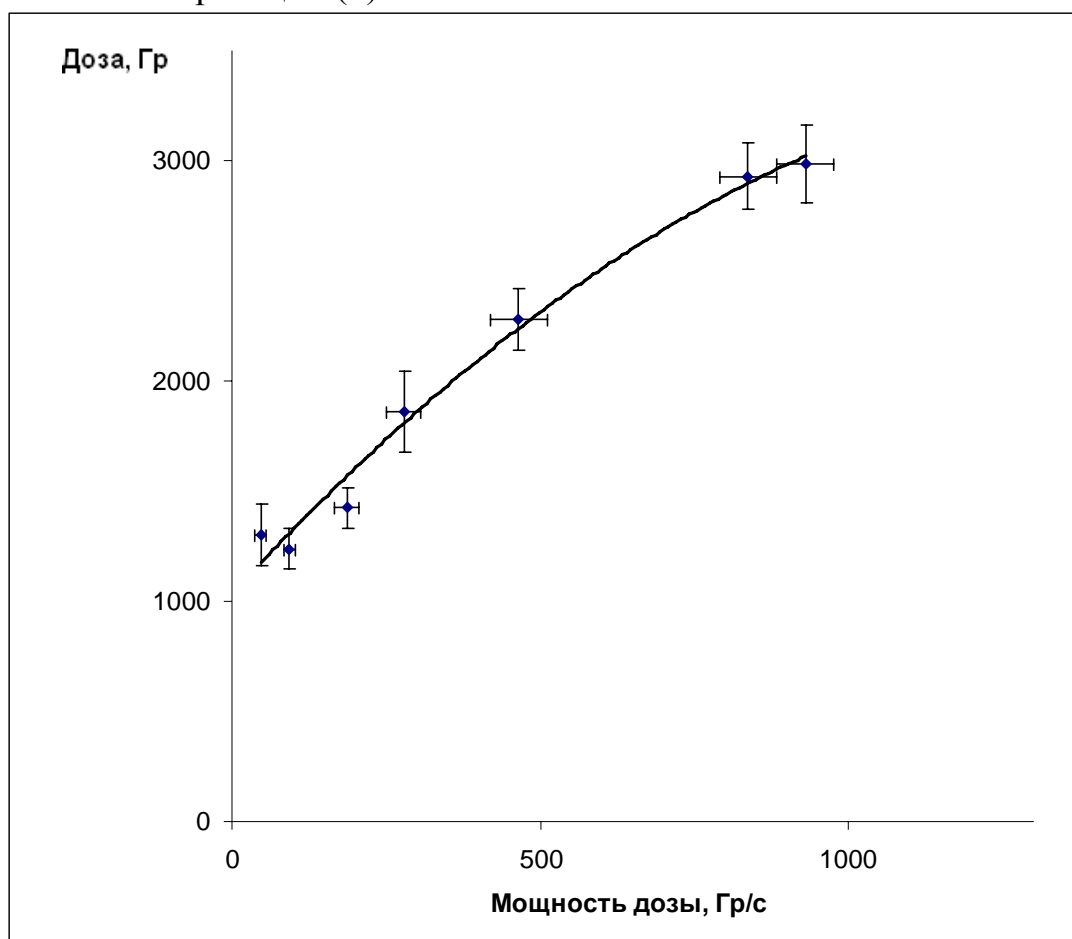
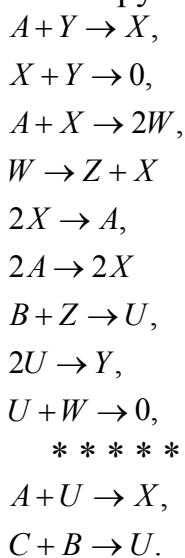


Рис.2 Зависимость порога инициирования от мощности поглощенной дозы альфа-частиц из циклотрона

Также предложена модель, описывающая колебания под воздействием ионизирующего излучения[2] .



где  $X = [HBrO_2]$ ,  $Y = [Br^-]$ ,  $Z = [Me^{n+1}]$ ,  $A = [BrO_3^-]$ ,  $B = [BrMA]$ ,  $U = [BrMA\cdot]$ ,  $W = [BrO_2\cdot]$ ,  $C = [\cdot OH] = 2.4 \cdot 10^{-7} M$  из расчёта  $0.3 \cdot 10^{-8} M$  на 80 Гр, и начальная концентрация BrMA принималась равной  $([BrMA]_0)/1.7$ .

Данная модель описывает колебания под воздействием ионизирующего излучения. Также в данной модели предсказывается полное гашение колебаний при больших дозах облучения:  $D_{кр} \cong 8кГр$ .

Предсказано наличие режима, при котором присутствует только одна пара автоволн. Такой режим соответствует значению доз близких к критической  $D_{кр}$ .

Таблица 1. Зависимость типа ведущего центра от поглощенной дозы D

D [Гр] Эксперимент	D [Гр] Модель	Тип ведущего центра
$0 - 6 \cdot 10^1$	$0 - 8 \cdot 10^1$	инициированный ведущий центр не образуется
$6 \cdot 10^1 - 6 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^1 - 7.7 \cdot 10^3$	образование ведущего центра
$\sim 10^3$	$7.7 \cdot 10^3 - 8 \cdot 10^3$	образование ведущего центра, при котором присутствует только одна пара автоволн
$> 6 \cdot 10^4$	$> 8 \cdot 10^3$	полное гашение автоволн

### Выводы

Исследована зависимость порога возникновения ведущих центров в колебательной реакции типа Белоусова-Жаботинского при локальном воздействии на реакционную смесь излучения с высоким значением ЛПЭ. Предполагается, что причиной образования этих центров являются образующиеся в процессе облучения свободные радикалы.

Исследования воздействия излучения с высоким значением ЛПЭ на реакцию Белоусова-Жаботинского помимо их фундаментального значения могут быть использованы для моделирования радиационного воздействия ионизирующих излучений с высокой величиной ЛПЭ на живые системы.

1. В.М.Лебедев, А.Б.Приселкова, А.В.Спасский, К.А.Труханов, Перспективные материалы. (2005), **4**, 11-15
2. D.N.Artamonov, A.B.Priselkova, A.V.Spasky, and K.A.Trukhanov, Proc. Summer School Nuclear physics Methods and Accelerators in Biology and Medicine Jul. 2007 Prague, Publ. AIP New York 242-243 (2007)