

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



Б-73

15/1-79
P3 - 11816

196/2-79

Я.Боганч, Й.Дюлаи, А.Надь, В.М.Назаров,
А.Сабо, З.Шереш

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПУЧКОВ
ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
АТОМОВ БОРА В МАТЕРИАЛАХ

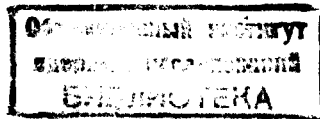
1978

РЗ - 11816

Я.Боганч, Й.Дюлаи,* А.Надь*, В.М.Назаров,
А.Сабо, З.Шереш

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПУЧКОВ
ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
АТОМОВ БОРА В МАТЕРИАЛАХ

*Направлено на III Совещание по использованию новых
ядерно-физических методов для решения научно-
технических и народно-хозяйственных задач /Дубна, 1978/*



* Центральный институт физических исследований,
Будапешт.

Боганч Я. и др.

РЗ - 11816

Использование пучков тепловых нейтронов для изучения распределения атомов бора в материалах

С целью изучения распределения атомов бора в полупроводниках, тонких пленках и биологических объектах разработаны экспериментальные методы измерений, основанные на использовании реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$. Распределение атомов бора в приповерхностных слоях твердых тел определяется по потерям энергии альфа-частиц. Концентрация атомов бора в массивных или гетерогенных биологических объектах измеряется по выходу гамма-квантов (478 кэВ), испускаемых возбужденным ядром ^7Li . В качестве источника нейтронов используется один из каналов реактора ИБР-30. Возможности методов иллюстрируются последними результатами, полученными при изучении: 1) распределения атомов бора при различных энергиях имплантации ионов ^{10}B в кремний, 2) приповерхностного распределения бора в стекловидных металлах типа $\text{B}_{20}\text{Fe}_{80}$, $\text{B}_{20}\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}$, $\text{B}_6\text{P}_{12}\text{Cr}_{14}\text{Ni}_{36}\text{Fe}_{32}$, 3) диффузии в Al бора в процессе его напыления и последующего отжига, 4) распределения бора в стеблях кукурузы в зависимости от его концентрации в питательной среде, 5) возможностей применения методов для определения концентрации ^{10}B in vitro и in vivo для целей нейтронзахватной терапии и радиобиологических исследований.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Bogancs J. et al.

РЗ - 11816

Utilization of Thermal Neutron Beams to Investigate Distributions of Boron Atoms in Materials

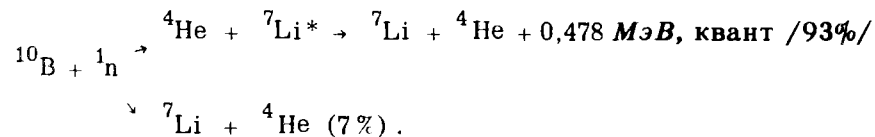
To investigate the distribution of atoms in semiconductors, thin films and biological objects, the experimental methods, based on the reaction $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$. The distribution of B atoms in surface regions of solids is determined by the energy losses of α -particles. The concentration of B atoms in real biological objects is determined by the yield of γ -quanta (478 keV) emitted by the excited nucleus ^7Li . The experiments were carried on at the reactor ИБР-30. The possibilities of the method were illustrated by the results obtained in investigation of: 1) distribution of ^{10}B atoms implanted at different energies in silicon, 2) distribution of B in surface regions in glass like metals of the type: $\text{B}_{20}\text{Fe}_{80}$, $\text{B}_{20}\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}$, $\text{B}_6\text{P}_{12}\text{Cr}_{14}\text{Ni}_{36}\text{Fe}_{32}$. 3) diffusion of B in Al in the process of evaporation followed by annealing, 4) distribution of B in maize stems in dependence of its concentration in feed, 5) possibilities of application of those methods for determination of concentration of ^{10}B in vitro and in vivo for the neutron capture therapy and for radiobiological investigations.

The investigation has been performed at the Neutron Physics Laboratory, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

ВВЕДЕНИЕ

С целью изучения распределения атомов бора в полупроводниках, тонких пленках и биологических объектах в ЛНФ ОИЯИ совместно с ЦИФИ /Будапешт/ разработаны экспериментальные методы измерений, основанные на использовании реакции



Распределение атомов бора в приповерхностных слоях твердых тел измеряется по потерям энергии альфа-частиц $^{1-5}/$. Концентрация атомов бора в массивных или гетерогенных биологических объектах определяется по гамма-квантам, испускаемым возбужденным ядром $^7\text{Li}^{6}/$.

Работы проводятся на 16-метровой пролетной базе одного из каналов импульсного периодического реактора ИБР-30 $^{7}/$ ЛНФ ОИЯИ. Определение концентрации атомов бора и их распределение по глубине в тонких слоях исследуемых материалов осуществляется в пучке тепловых нейтронов. Фон от быстрых нейтронов и гамма-квантов реактора устраняется по методу времени пролета.

Содержание ядер бора in vivo в крупных /более 2000 см 3 / биологических объектах определяется тоже в поле тепловых нейтронов, но рождаемых непосредственно в исследуемом объекте при замедлении быстрых

нейтронов. Кванты от реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ регистрируются после инъекции короткого /2-4 мкс/ импульса быстрых нейтронов в течение диффузии тепловых нейтронов в объекте. Этим самым практически устраняется фон от быстрых нейтронов и мгновенных квантов деления. Использование методов времени пролета и времени диффузии значительно увеличивает отношение эффект/фон по сравнению со стационарными реакторами.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТОМОВ ^{10}B В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ МАТЕРИАЛОВ

В данной работе показаны возможности использования реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ на примере полученных результатов при изучении:

- распределения по глубине всех, а не только электрически активных, ядер бора, после имплантации в кремний ионов $^{10}\text{B}^+$ и $^{10}\text{BF}_2^+$;
- влияния последующих технологических процессов /отжиг, нанесение окисных пленок/ на первичное распределение;
- приповерхностного распределения бора в стекловидных металлах типа $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$, $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$, $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$;
- диффузии в алюминий бора в процессе его напыления и последующего отжига;
- распределение бора в листьях кукурузы в зависимости от концентрации борной кислоты в питательной среде.

1.1. Методика измерений

Схема экспериментальной установки и измерительного тракта показана на рис. 1. Образец устанавливается в пучке нейтронов диаметром 4,0 см параллельно плоскости кремниевого поверхностно-барьерного детектора* на расстоянии 5 см от оси пучка. Для постоян-

* Разрешение используемых детекторов для альфа-частиц ^{241}Am - 18-20 кэВ.

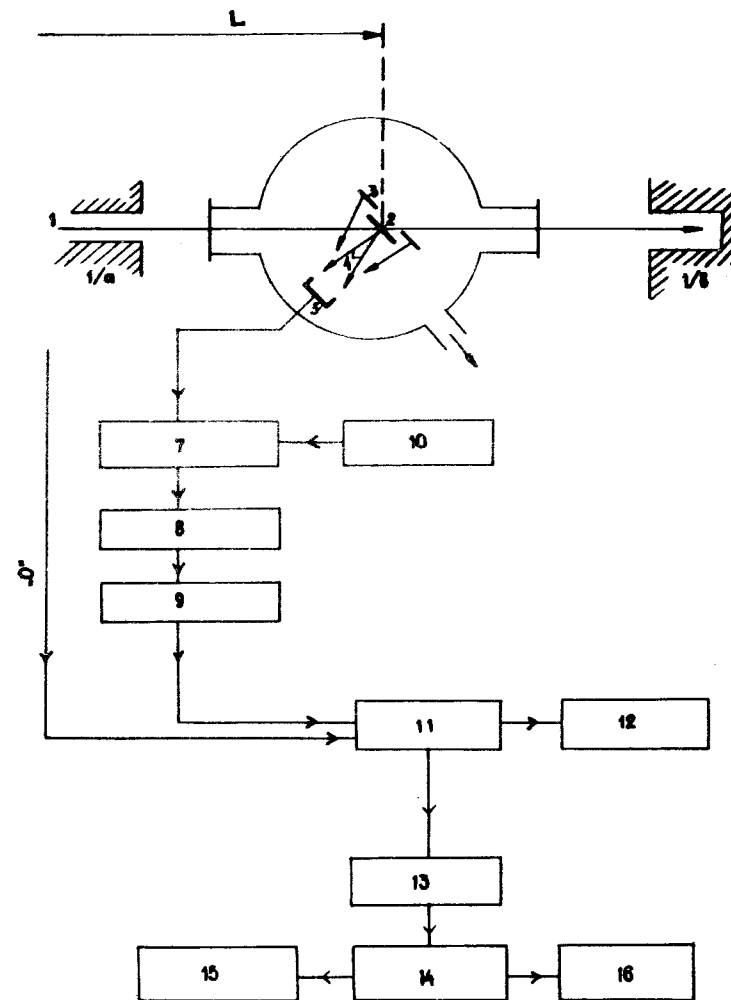


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 - нейтронный пучок, 1а - коллиматор диаметром 4,0 см, 1б - ловушка пучка, 2 - образец, 3 - монитор, 4 - свинцовая защита, 5 - детектор, 7-15 - спектрометрический тракт.

ного контроля измерительного тракта по энергии и для мониторинга пучка используется мишень из ${}^6\text{LiF}$ толщиной $0,06 \text{ мг}\cdot\text{см}^{-2}$. Таким образом, калибровка спектрометрического тракта по энергии осуществляется при каждом измерении по энергетическим линиям частиц и ядер, возникающих в реакциях ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ и ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$, рис. 2.

Получаемый в измерениях аппаратный спектр альфа-частиц $I(\epsilon)$, рис. 3, представляет собой свертку двух функций:

$$I(\epsilon) = \int_{\epsilon} F(\epsilon, E) \Phi(E) dE, \quad /1/$$

где $\Phi(E)$ - реальный спектр альфа-частиц, вылетающих из образца; $F(\epsilon, E)$ - ядро интегрального уравнения /1/, представляющего собой аппаратный спектр альфа-частиц в зависимости от энергии (E), рожденной в образце частицы.

При решении интегрального уравнения /1/ /нахождение искомой функции $\Phi(E)$ /8/ ядро уравнения представлялось в виде численных значений, получаемых экспериментально от образца кремния с имплантированными ионами ${}^{10}\text{BF}_2^+$ при энергии 30 кэВ , рис. 3.

По распределению числа альфа-частиц в зависимости от потерь их энергии $\Phi(\Delta E)$, найденному из функции $\Phi(E)$, вычисляется глубинное распределение атомов бора в исследуемых материалах.

Средний пробег частиц $\bar{R}(E)$, потерявших в образце энергию ΔE , определяется численным интегрированием уравнения

$$\bar{R}(E) = \int_E^{E-\Delta E} [L(E)]^{-1} dE, \quad /2/$$

где $L(E)$ - тормозная способность альфа-частиц (dE/dx). Значения $L(E)$ для элементов брались из таблиц, составленных Ziegler /9/. В том случае, когда исследуемые образцы были многоэлементными, тормозная способность рассчитывалась согласно правилу Брэгга. Количественное определение ${}^{10}\text{B}$ осуществлялось путем сравнения с эталонами, количество бора в которых

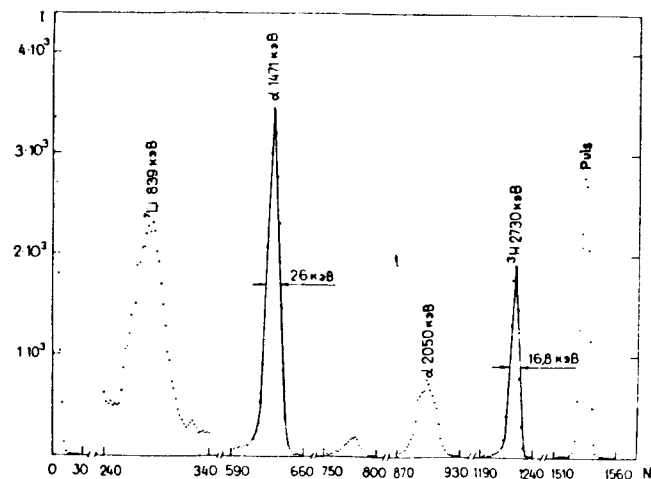


Рис. 2. Амплитудный спектр частиц от реакций ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ и ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$. N - номер канала, I - число импульсов на канал.

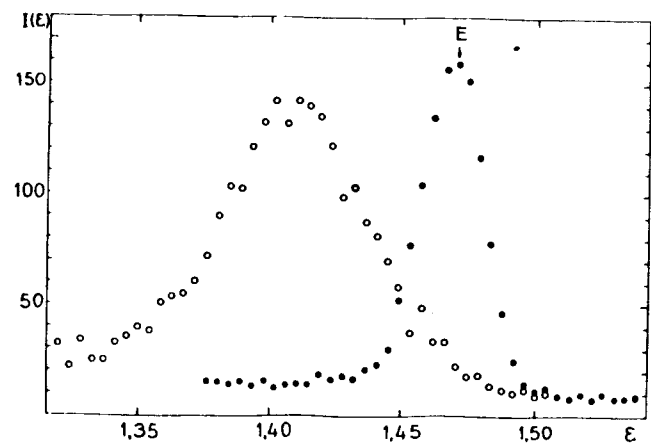


Рис. 3. Аппаратурные спектры альфа-частиц от образцов кремния с имплантированными ионами ${}^{10}\text{B}^+$ и ${}^{10}\text{BF}_2^+$. o - ионы ${}^{10}\text{B}^+$ с энергией 80 кэВ , • - ионы ${}^{10}\text{BF}_2^+$ с энергией 30 кэВ , $E = 1,471$ - энергия альфа-частиц от реакции ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ на тепловых нейтронах.

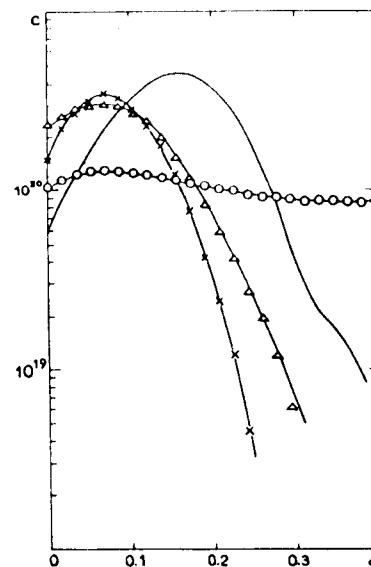
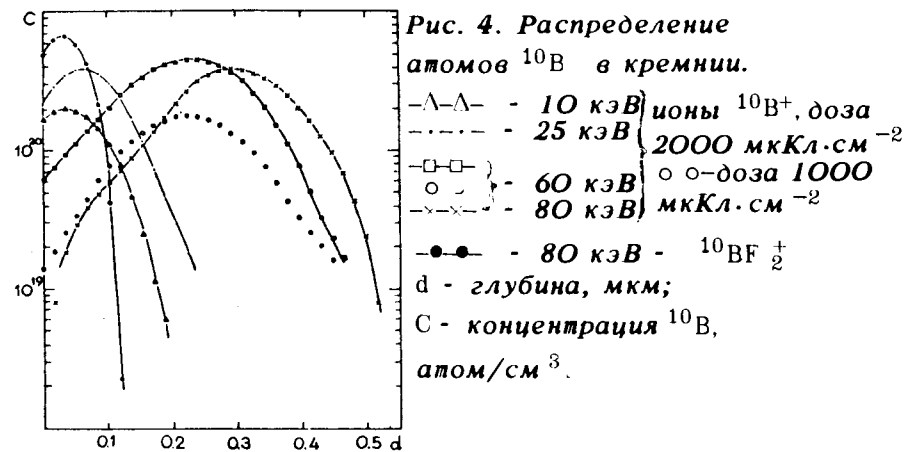
было известно с точностью $\pm 2\%$ /5/. При потоке тепловых нейтронов 10^6 нейтр./см²с минимальное определяемое количество ¹⁰B составляет 0,5 мкг.

1.2. Результаты и обсуждения

На рис. 4 представлены полученные данные о глубинном распределении атомов бора в различных образцах кремния при имплантации в них ионов ¹⁰B⁺ и ¹⁰BF₂⁺ с энергиями 10, 25, 60 и 80 кэВ. В полученных распределениях положение максимумов /средние пробеги ионов \bar{R}_p / хорошо согласуются с теоретическими данными Braice /10/. Полуширина же распределений по сравнению с теорией на 20-30% шире.

Влияние последующего отжига при температурах 400 и 900°С на распределение атомов бора показано на рис. 5. Как видно из рис. 6, наличие на поверхности кремния окисной пленки толщиной 1200 Å приводит к заметному накоплению ядер бора на границе раздела сред. В стекловидных металлах метод позволяет наблюдать концентрацию ¹⁰B до 1,2 мкм. Знание приповерхностного состава стекловидных металлов необходимо для отработки технологии получения тонких пленок для задач микроэлектроники. Из полученных результатов видно /рис. 7/, что приповерхностные концентрации атомов бора одного и того же образца различны и меньше расчетных для этих сплавов. Непосредственно у поверхности, от 0 до 0,2 мкм, наблюдается довольно значительное уменьшение концентрации бора по сравнению с концентрацией в глубине образцов.

На рис. 8 представлено распределение атомов бора в алюминиевой фольге, полученное при вакуумном напылении бора при температуре образца 150-200°С. Обращает на себя внимание диффузия атомов бора на большие глубины в процессе напыления, кривая 1, и отсутствие ее при последующем отжиге образца при температуре 400°С в течение 2 часов. Вероятно, это связано с тем, что в процессе напыления /10-15 с/ диффундирует атомарный бор, а после напыления - не свободный бор, а бориды алюминия.



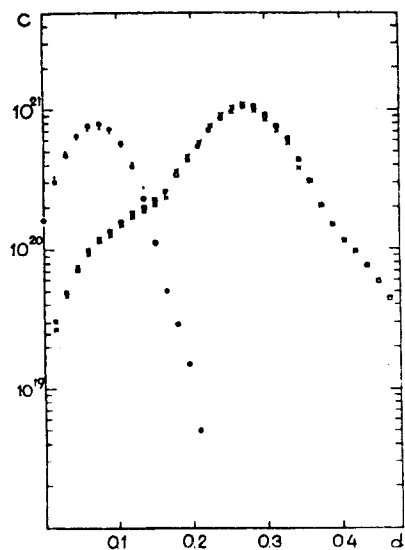


Рис. 6. Распределение атомов бора в кремнии. Доза имплантации - $2000 \text{ мкКл} \cdot \text{см}^{-2}$ при энергии E_i . . . и 000 - ионы $^{10}\text{B}^+$, $E_i = 20 \text{ кэВ}$ без окисной пленки, $\square \square \square$ и $\times \times \times$ - ионы $^{10}\text{B}^+$, $E_i = 80 \text{ кэВ}$, толщина окисной пленки $0,12 \text{ мкм}$. d - глубина, мкм ; c - концентрация ^{10}B , $\text{атом}/\text{см}^3$.

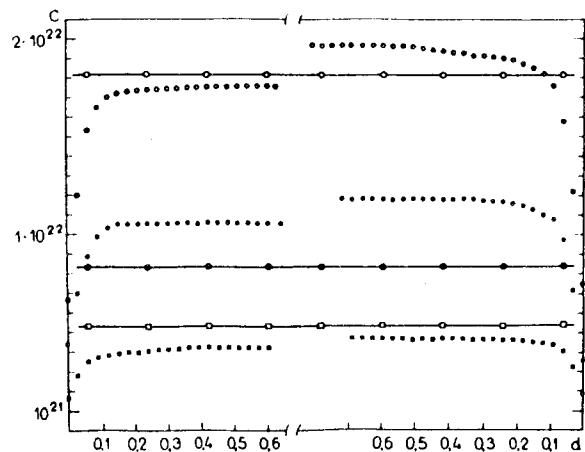


Рис. 7. Приповерхностное распределение ядер ^{10}B в стекловидных металлах.

$\circ \circ \circ$ $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$. — теоретическая концентрация.
 . . . $\text{Fe}_{80}\text{P}_{10}\text{B}_{10}$. d - глубина, мкм ; c - концентрация ^{10}B , $\text{атом}/\text{см}^{-3}$.
 $\square \square \square$ $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$.

В качестве примера применения метода в биологии в табл. 1 приведены полученные данные о концентрации бора в листьях кукурузы при различных концентрациях борной кислоты в питательной среде и распределение бора по длине листа.

Таблица 1

Концентрация H_3BO_3 , $\text{мол}/\text{л}$	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	Контроль	Примечание
Концентрация ^{10}B , $\text{атом}/\text{см}^3$.	8,6	0,79	0,65	0,35	время роста 72 час
$\cdot 10^{-20}$	1,9	0,57	0,28	-	24 час

Участок стебля листа, расст. (в мм) от черешка	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
0-15	14,0	9,60	8,2
15-27			
27-42			

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ БОРА ПО ГАММА-КВАНТАМ

В последние годы большое внимание исследователей привлекает использование в нейтронозахватной терапии боросодержащих соединений типа $\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{SH}^-$ и $\text{Na}_2\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{SH}^{11/}$. Знание распределения этих соединений в облучаемом объекте необходимо для определения дозного поля. Для выбора наиболее оптимальных условий облучения мишени требуется непрерывное наблюдение in vivo за процессами накопления /задержки/ боросодержащих соединений в опухолевых и нормальных

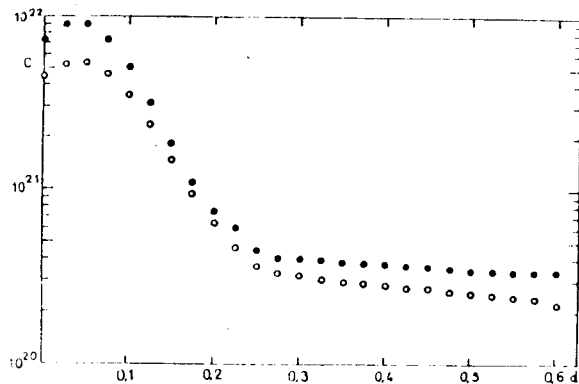


Рис. 8. Распределение атомов бора в алюминии. —●—●— после вакуумного распыления бора, температура подложки около 200°C , —○—○— этот же образец, но после отжига при температуре 400°C в течение 120 мин. d - глубина, мкм; c - концентрация ^{10}B , атом/см³.

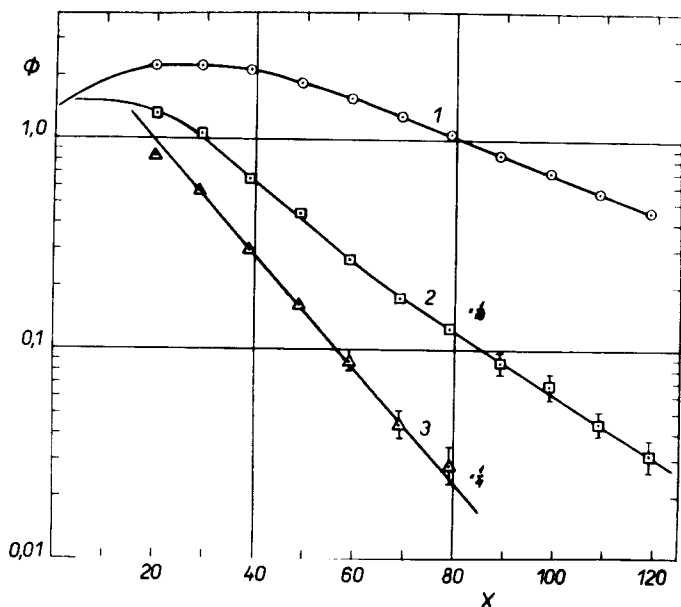


Рис. 9. Распределение плотности потока тепловых нейтронов $\Phi(x)$ по оси пучка при облучении фантома: 1 - быстрыми нейтронами со средней энергией 3,0 МэВ, 2 - надтепловыми нейтронами со средней энергией 100 эВ, 3 - тепловыми нейтронами, X - глубина фантома, мм.

тканях. Кроме того, необходимо *in vitro* изучать процессы выведения соединений из крови. Для этих целей и была разработана методика определения концентрации ^{10}B по гамма-лучам.

2.1. Методика измерений

Для определения концентрации атомов бора в крупных объектах *in vivo* использовался мононаправленный пучок быстрых нейтронов. Использование быстрых нейтронов обосновывается тем, что в водородосодержащих средах определяющую роль в формировании поля тепловых нейтронов несут первичные нейтроны пучка и потому затухание результирующего поля тепловых нейтронов в направлении пучка $\Phi(x)$, рис. 9, значительно меньше, чем для тепловых и надтепловых нейтронов.

Результирующее временное поле тепловых нейтронов в любой точке \vec{r} среды после инъекции в нее короткого импульса быстрых нейтронов, как известно, затухает по закону:

$$\Phi(\vec{r}, t) = \sum_a S_a R_a(\vec{r}) \exp(-at). \quad /3/$$

Операцию суммирования гармоник с постоянными затуханиями a можно провести экспериментально, если регистрировать нейтроны по захватным гамма-лучам со всего объема облучаемого объекта. Тогда усредненный по объему поток нейтронов затухает с постоянной затухания основной гармоники $a_0 = \tau^{-1}$ *.

Следовательно, при проведении измерений во временном окне /от 20 до 400 мкс/, рис. 10, практически

* Измеряя постоянные затухания для отравленной $1/v$ поглотителем (a_{0B}) и неотравленной (a_{00}) среды, можно определить среднюю концентрацию вводимых ядер N_B по

$$\text{выражению } N_B = \frac{a_{0B} - a_{00}}{v\sigma_a}, \text{ где } \sigma_a - \text{сечение поглощения вводимых ядер. Таким способом можно определять}$$

концентрацию Li.

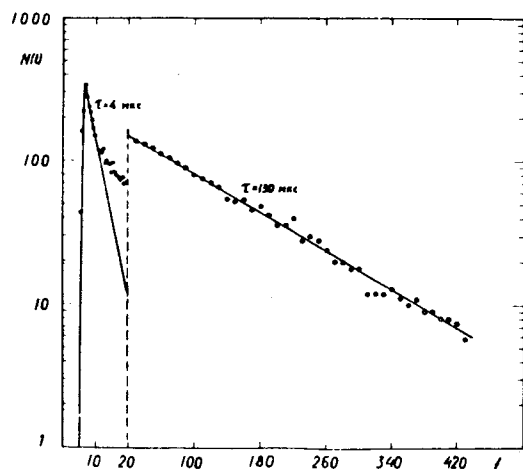


Рис. 10. Временное распределение $N(t)$ гамма-квантов при инъекции в фантом быстрых нейтронов с длительностью импульса $\tau = 4,0$ мкс. $\tau = 130$ мкс - среднее время жизни нейтронов в тканезквивалентном фантоме объемом 4000 см^3 , t - время в мкс.

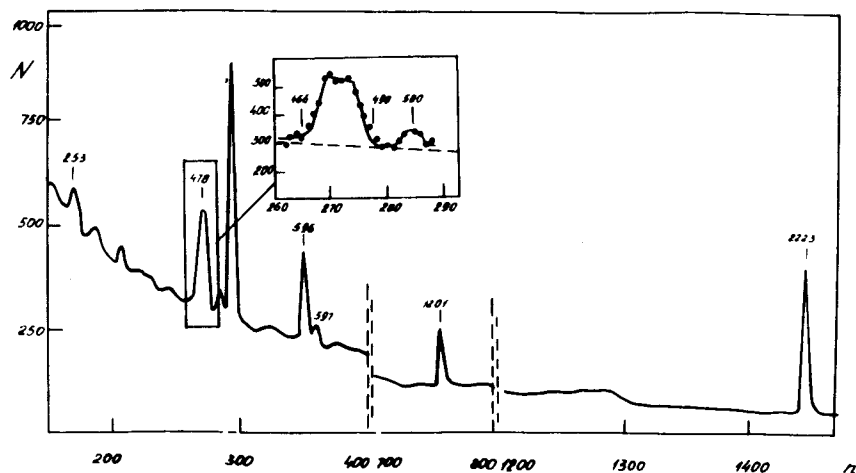


Рис. 11. Амплитудный спектр Ge(Li) -детектора при концентрации ^{10}B в фантоме 10 мкг/см^3 . 2223- линия водорода в кэВ, 1201 - линия двойной утечки в кэВ, 478 - линия ^{10}B в кэВ.

регистрируются только гамма-кванты от захвата тепловых нейтронов элементами исследуемого объекта.

Из примера амплитудного спектра, рис. 11, видно, что фон в районе линии 478 кэВ* определяется в основном комптоновскими квантами от водородной линии 2223 кэВ. Концентрация ядер бора *in vitro* в толстых, относительно пробега альфа-частицы, образцах определялась тоже по гамма-лучам, но в пучке тепловых нейтронов. В обоих случаях для регистрации гамма-квантов используются Ge(Li) -детекторы объемом 20-30 см^3 . Схема расположения детекторов и образцов относительно пучка нейтронов показана на рис. 12.

2.2. Результаты и обсуждения

Для определения чувствительности и диапазона измеряемых концентраций атомов ^{10}B были экспериментально получены следующие характеристики метода.

1. Зависимость числа импульсов в фотопике линии 478 кэВ от концентрации ^{10}B в тканезквивалентном фантоме объемом 4000 см^3 , рис. 13. Эта зависимость была получена при диаметре коллиматора на Ge(Li) -детекторе 30 мм и расстоянии от оси пучка до оси детектора 350 мм. При указанных условиях надежно определяется концентрация $3,0 \pm 0,35 \text{ мкг}$ при локальной дозе быстрых нейтронов $1,0 \text{ рад}$. Нелинейность зависимости $N(c)$ при концентрациях выше 50 мкг/см объясняется уменьшением плотности потока тепловых нейтронов, рис. 14а, за счет увеличения макроскопического сечения захвата Σ_a .

2. Определен диапазон измеряемых концентраций ^{10}B в модели опухоли объемом 10 см^3 при концентрации бора в окружающей среде 20 мкг/см^3 . Из аналогичных, представленных на рис. 13 зависимостей $N(c)$ /рис. 14в/ видно, что *in vivo* можно определять концентрацию ^{10}B в диапазоне $30\text{-}100 \text{ мкг/см}^3$.

* Уширение линии 478 кэВ объясняется доплеровским сдвигом ($\pm v/c$) гамма-квантов, испускаемых возбужденным ядром ^7Li .

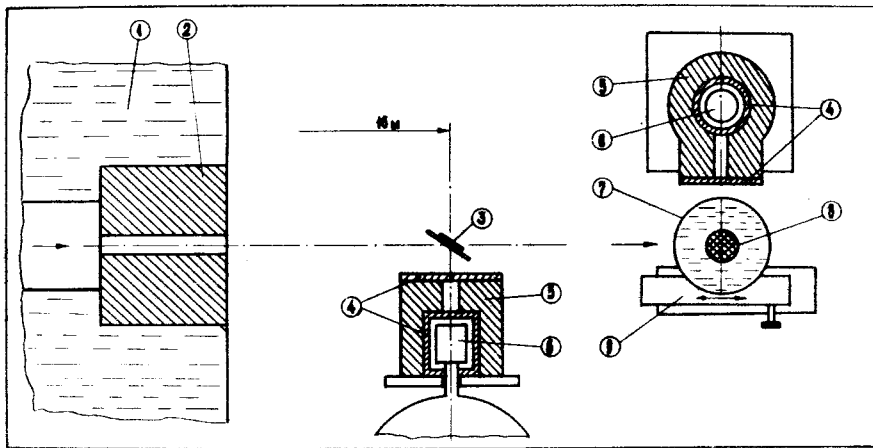


Рис. 12. Схема эксперимента. 1 - водяная защита, 2 - свинцовый коллиматор, 3 - образец, 4 - защита из ${}^6\text{LiF}$, 5 - свинцовая защита, 6 - Ge(Li) - детектор, 7 - фантом, 8 - модель опухоли, 9 - механизм перемещения фантома по оси пучка.

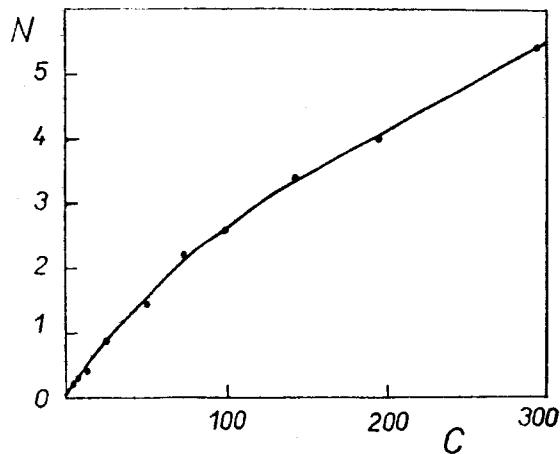


Рис. 13. Зависимость числа импульсов от концентрации ${}^{10}\text{B}$. $N \cdot 10^{-3}$ - число импульсов, c - концентрация ${}^{10}\text{B}$ в фантоме, мкг/см³.

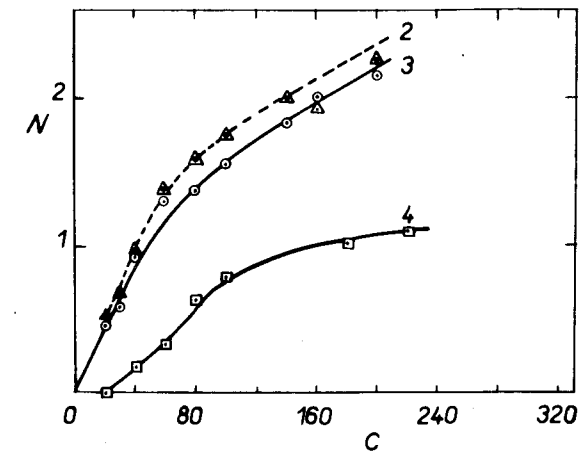
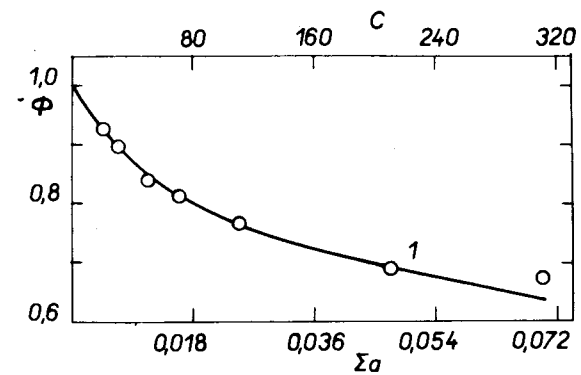


Рис. 14. А. Зависимость плотности потока тепловых нейтронов от концентрации ${}^{10}\text{B}$ в фантоме. Φ - плотность потока в относительных единицах, c - концентрация ${}^{10}\text{B}$, мкг/см³, Σ_a - макроскопическое сечение, см⁻¹. В. Зависимость числа импульсов от концентрации ${}^{10}\text{B}$ при просматривании детектором: 2 - гомогенного фантома при концентрации бора 20 мкг/см³ с моделью опухоли, в которой изменялась концентрация бора от 20 до 220 мкг/см³; 3 - гомогенного фантома без опухоли; 4 - эффект только от модели опухоли. $N \cdot 10^{-3}$ - число импульсов.

3. Найдена нижняя граница определяемых концентраций ^{10}B *in vitro* в пучке тепловых нейтронов с потоком 10^8 нейтр./см²с для следующих видов образцов:

- обезвоженных тканей экспериментальных животных - $10 \pm 0,5$ мкг,
- водных растворов /кровь, плазма крови/ при объеме в пучке не менее 10 см^3 - $2,5 \pm 0,1$ мкг/см³.

Благодаря таким значениям чувствительности определения ^{10}B метод можно использовать не только в практике нейтронзахватной терапии, но и при изучении распределения нуклидов, содержащих ^{10}B , в экспериментальных животных.

ВЫВОДЫ

Измерения, проведенные на импульсном реакторе ИБР-30 по методу времени пролета, показали, что в перспективе на ИБР-2 /7/ при потоке тепловых нейтронов в пучках до $5 \cdot 10^8$ нейтр./см²с время измерения одного образца с концентрацией ^{10}B 10^{15} атом/см² сократится до 5-10 мин. В настоящее время на одно измерение профиля затрачивается 20-30 часов. Кроме того, увеличение интенсивности пучка позволит изучать профили бора в материалах в широком диапазоне доз ионов. В пучках ИБР-2 можно будет измерять распределение таких атомов, как Li, N и He по реакциям $^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$, $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ и $^3\text{He}(n,p)\text{T}$ соответственно. Например, на ИБР-30 при размещении детектора и образца в пучке /плохая геометрия/ за 1 час измерений хорошо видна линия протонов в реакции $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ от азота воздуха /0,5 мм/, рис. 15. Сплошное распределение протонов обусловлено азотом лавсана /толщина 0,3 мм/.

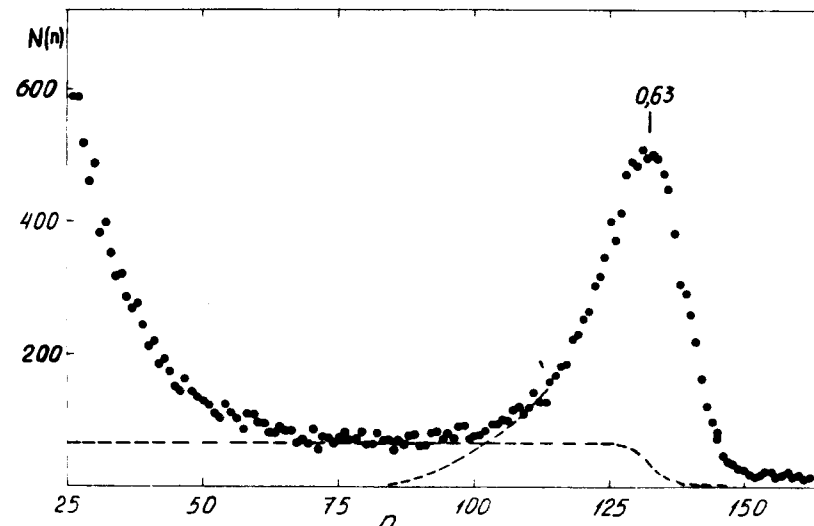


Рис. 15. Аппаратурный спектр протонов от реакции $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$. n - номер канала, N(n) - число импульсов на канал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Garbrah B.W., Whitley J.E. *Anal.Chem.*, 1967, 39(3), p.345.
2. Comar D. e.a. *Nucl. Appl.*, 1969, 6, p.344.
3. Bontemps A., Ligeon E. *Rapport CEA-N-1492, Grenoble*, 1971.
4. Kvitek J., Hnatowicz V., Kotas P. *Radiochem. Radioan. Lett.*, 1976, 23 (3), p.205.
5. Боганч Я. и др. ОИЯИ, P3-10777, Дубна, 1977.
6. Murray B.W. e.a. *Biomedical Dosimetry, Proceedings of a Symposium, Vienna, Inst. Atomic Energy Agency, Vienna, 1975, IAEA-SM-193/48, p.179.*
7. Ананьев В.Д. и др. ОИЯИ, 13-4395, Дубна, 1969.
8. Боганч Я. и др. ОИЯИ, P11-11212, Дубна, 1978.
9. Ziegler J.F., Cole G.W., Baglin J.E.E. *J.Appl. Phys.*, 1972, 43, p.3808.
10. Brice D.K. *Ion-Implantation Range and Energy Deposition Distributions, vol. 1 (IF1), Plenum, New York, 1975, p.569.*
11. Hatanaka H., Sweet W.H. *Biomedical Dosimetry. Proc. of a Symposium, Vienna. IAEA-SM-193/79, 1975, p.147.*

Рукопись поступила в издательский отдел
31 июля 1978 года.