

Л. М. ХРОМЧЕНКО

ИЗУЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ ЯДЕР УГЛЕРОДА,  
КИСЛОРОДА И МАГНИЯ МЕТОДОМ МАГНИТНОГО АНАЛИЗА

(Представлено академиком П. И. Лукирским 25 IX 1953)

В работе изложены опыты по изучению продуктов ядерных реакций методом магнитного анализа. В наших опытах узкий пучок моноэнергетических дейтронов с энергией до 4,5 Мэв падал на мишень, где вызывал соответствующие ядерные реакции. Прибор находился в однородном магнитном поле. Заряженные частицы — продукты реакции — двигались в магнитном поле и, пройдя через узкую щель, попадали на детектор — тонкослойную фотопластинку. В зависимости от  $E/M$  и энергии частиц они попадали в разные места пластинки.

Большинство работ по магнитному анализу продуктов ядерных реакций применяет в качестве детектора толстослойные фотопластинки. Измерение длин треков позволяет определить природу частиц, счет их — интенсивность со-

ответствующей группы. Наш метод оказался достаточно светосильным, чтобы в местах локализации соответствующих групп частиц наблюдать вместо отдельных треков видимые глазом линии. Поэтому от изучения пластинок под микроскопом мы могли перейти к несравненно более быстрому измерению интенсивности линий при помощи микрофотометра. Статистическая достоверность групп в наших кривых значительно выше, чем в предыдущих работах.

На наших пластинках виден ряд параллельных линий, характеризующих дискретные группы частиц — продуктов реакции. При известных геометрии прибора и магнитном поле  $H$  положение линии на пластинке однозначно определяет энергию данной группы частиц, если мы знаем их природу, т. е.  $E/M$ . Для определения последней нами, по предложению Ю. А. Немилова, был использован разработанный им для несколько иной цели метод клиновидного фильтра <sup>(1)</sup>. Фильтр покрывал всю пластинку по длине и наполовину по ширине. Толщина фильтра вдоль пластинки, т. е. по оси импульсов частиц, была рассчитана так, чтобы в каждой

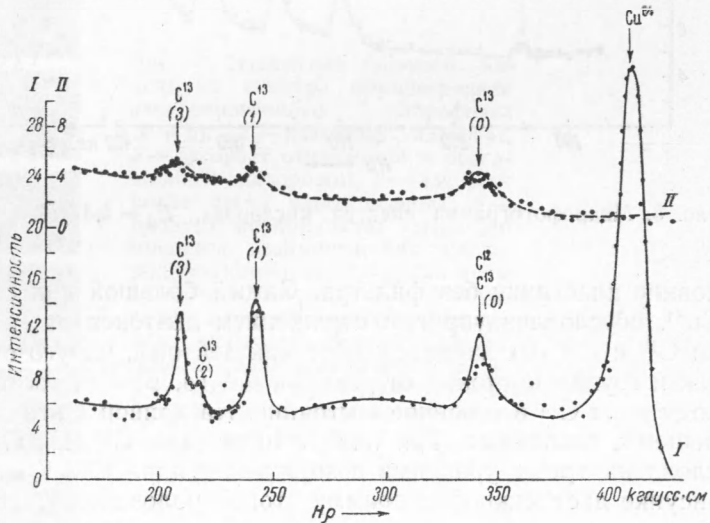
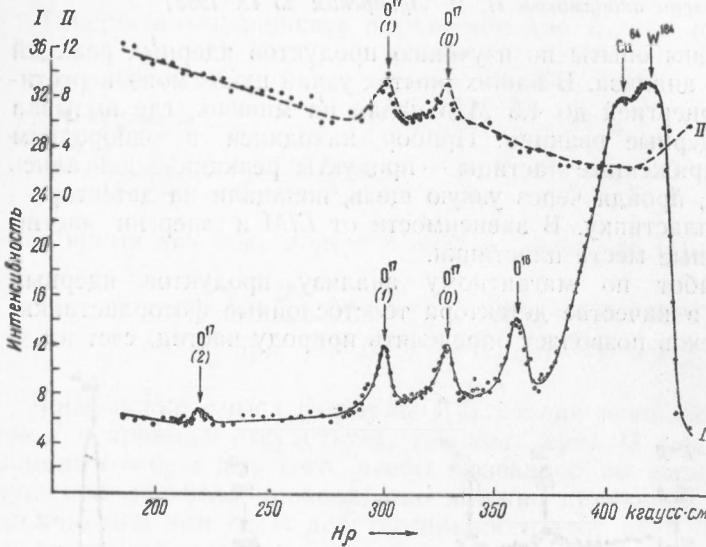


Рис. 2. Микрофотограмма спектра углерода.  $E_d = 4,40$  Мэв

точке пластинки полностью затормозить все дейтоны и пропустить протоны. Таким образом, одна половина пластинки регистрировала все заряженные частицы, вторая лишь протоны.

На рис. 1 приведены репродукции трех таких пластинок со спектрами углерода, кислорода и магния. Верхняя часть пластинок — без фильтра, нижняя — с фильтром. Яркие линии справа, обусловленные дейтонами, упруго отраженными от вещества мишеней, в нижней половине пластинок полностью отсутствуют — отфильтрованы. Протоны же от реакции (d, p) дают линии на обеих половинках пластинок.

Углерод. Углерод и кислород исследовались нами как элементы, почти неизбежно присутствующие в виде примеси в большинстве мишеней. Изучение углерода преследовало также цель калировки прибора,



как масса  $C^{12}$  и  $Q_0$  для реакции  $C^{12}(d, p)C^{13}$  известны наиболее точно как из данных по магнитному анализу (2, 3), так и из масс-спектроскопических измерений (4) и поэтому могут служить надежным эталоном. Углеродной мишенью служил слой сажи на подкладке из медной фольги. Микрофотограмма пластинки со спектром углерода приведена на рис. 2. Кривая I снята на

Рис. 3. Микрофотограмма спектра кислорода,  $E_d = 4,32$  Мэв

половине пластинки без фильтра. Самый большой пик справа, с индексом  $Cu^{64}$ , обусловлен упругим отражением дейтонов от медной фольги. Пики  $C^{12}$  и  $C^{13}$  (0) характеризуют как дейтоны, упруго отраженные от  $C^{12}$ , так и группу протонов от реакции  $C^{12}(d, p)C^{13}$ , соответствующих переходу ядра  $C^{13}$  в основное состояние. На кривой I эти две группы не разрешены, совпадают. Три пика с индексами  $C^{13}$  (1),  $C^{13}$  (2),  $C^{13}$  (3) обусловлены тремя уровнями возбуждения ядра  $C^{13}$ . Кривая II на этом же рисунке дает микрофотограмму второй половины пластинки, с фильтром.

Таблица 1  
Уровни возбуждения ядра  $C^{13}$  в Мэв

Настоящая работа	(*)	(*)	(*)
3,107	3,086	3,11	3,14
3,699	3,686	3,683	—
3,869	—	3,884	4,13

На ней полностью отфильтрован пик дейтонов от  $Cu^{64}$ , отчетливо прошли (с некоторым ослаблением интенсивности) протоны, соответствующие уровням (0), (1) и (3), и не выделился (ввиду малой интенсивности группы) пик (2). По упругому отражению от  $Cu^{64}$  и  $C^{12}$  нами определялась энергия первичных дейтонов, бомбардировавших мишень, и для расчета энергии возбуждения принималось среднее значение из всех определений по данной пластинке. В табл. 1 приведены средние значения энергии уровней возбуждения ядра  $C^{13}$  из промера трех пластинок со спектром углерода и данные других авторов для уровней этого же ядра.

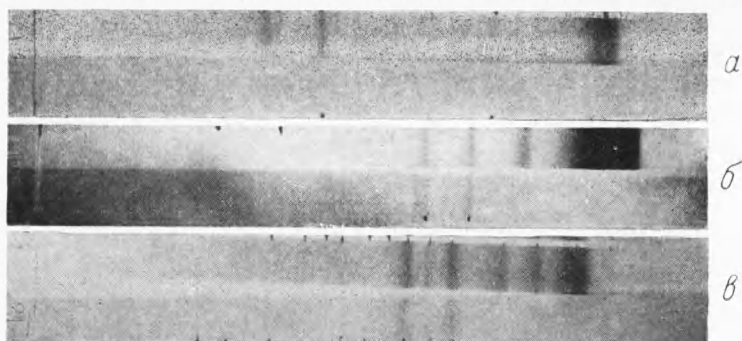


Рис. 1. Энергетические спектры: а — углерода, б — кислорода, в — магния

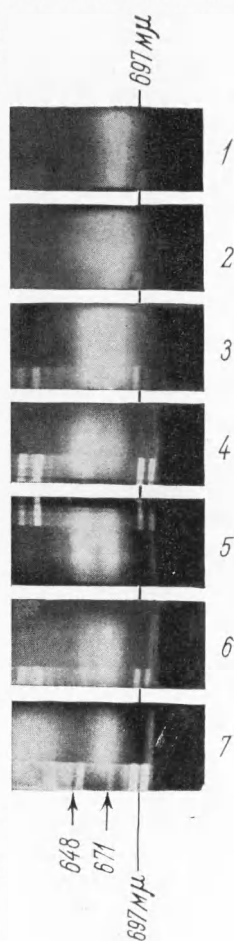


Рис. 3. Изменение главного максимума спектра флуоресценции адсорбированного хлорофилла (а + б). 1 — исходный адсорбат; 2 — адсорбат откачанный и обогащенный кислородом; 3 — адсорбат после пуска паров этанола; 4 — продукт первой стадии темнового процесса взаимодействия кислородного комплекса с парами воды (максимум 648 мμ); 5 и 6 — два кадра промежуточных превращений продукта первой стадии процесса в продукт второй стадии; 7 — продукт второй (замедленной) стадии этого процесса (максимум 671 мμ)

Кислород. Для этих опытов мишенью служил слой окиси вольфрама, напыленный на медную фольгу. Микрофотограмма одной из пластинок со спектром кислорода приведена на рис. 3. Кривая I содержит 3 дейтоновых пика: упругое отражение от  $W^{184}$ ,  $Cu^{64}$  и  $O^{16}$ . Эти пики отсутствуют на кривой II, с фильтром. Энергия первичных дейтонов принята средней из трех вычисленных по упругому отражению значений. Сильные пики  $O^{17}$  (0) и  $O^{17}$  (1) отчетливо видны и на кривой II, с фильтром. Слабый пик  $O^{17}$  (2) на кривой II не проявился, но из сопоставления с известными уровнями  $O^{17}$  пик этот является протонным. Табл. 2 дает полученные нами значения энергии уровней возбуждения ядра  $O^{17}$ . Они являются средними из промера 3 пластинок со спектром кислорода от окиси вольфрама и 4 от окисленного магния.

Наши данные сравниваются с результатами других авторов. Для группы протонов, соответствующей переходу ядра  $O^{17}$  в основное состояние, нами было получено значение  $Q_0 = 1,885$  Мэв. Наиболее достоверные значения  $Q_0$  для этого перехода из литературных данных: 1,98 Мэв (8) и 1,918 Мэв (магнитный анализ).

Магний. Магниеые мишени готовились путем испарения металлического магния натурального изотопного состава на медную фольгу. Они были

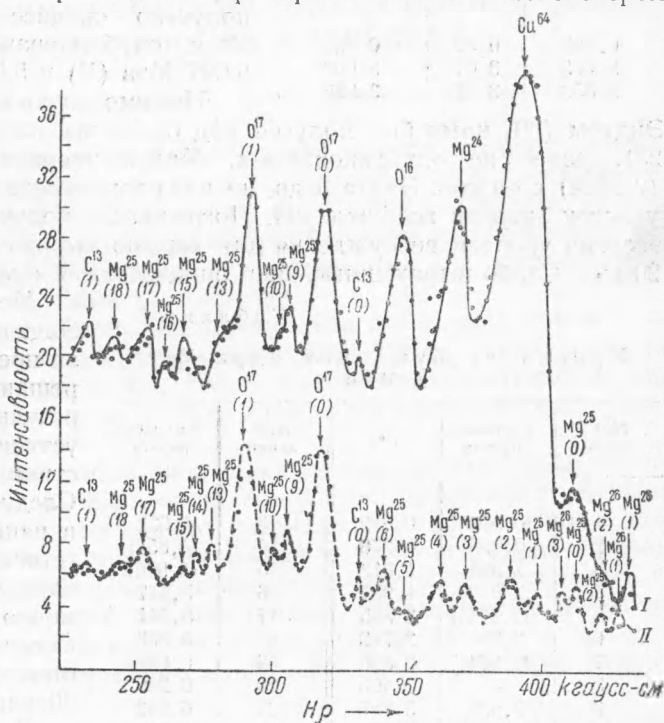


Рис. 4. Микрофотограмма спектра магния.  $E_d = 1,04$  Мэв

были довольно толстыми и заметно окисленными. Опыты с магнием были проведены при двух энергиях бомбардирующих дейтонов: порядка 3 и 4 Мэв. Рис. 4 показывает участок микрофотограмм одной из таких пластинок. Из него видно, что энергетический спектр магния значительно сложнее, чем спектр углерода и кислорода. Характерно, что кривая II (с фильтром) содержит ряд протонных пиков в той области, где на кривой I все занято сильными пиками дейтонов, отраженных упруго от  $Cu^{64}$ ,  $Mg^{24}$  и  $O^{16}$ . Таким образом, фильтр позволяет не только различать частицы по типу, но и увидеть слабую протонную структуру на фоне сильных дейтоновых групп.

Наличие у магния трех изотопов сильно усложняет идентификацию уровней. Так как сечение (d, p)-реакций не дает резких аномалий при переходе от одного ядра к соседнему, наиболее логично приписать наблюдаемые уровни основному изотопу  $Mg^{24}$ . Однако, так как относительные интенсивности различных линий сильно меняются с энергией, этот критерий может иногда привести к ошибочным заключениям. Примером этого могут служить наблюдаемые нами группы протонов более быстрых, чем те, которые соответствуют переходу ядра  $Mg^{25}$  в основное состояние. Их можно отождествлять лишь с уровнями  $Mg^{26}$ , для которого соответ-

ствующее значение  $Q_0$  лежит значительно выше (8,88 Мэв<sup>(11)</sup>). В табл. 3 сведены полученные нами средние значения энергии уровней возбуждения Mg<sup>25</sup>. Они получены из 6 микрофотограмм. Наши данные сопоставлены с результатами работы Эндта и др. (10). В скобках даны

Таблица 2  
Уровни возбуждения ядра O<sup>17</sup> в Мэв

Настоящая работа	(°)	Ват он и Бюхнер (°)
0,893	0,87	0,883
3,005	3,07	3,069
3,853	3,87	3,856

те значения, для которых соответствующие протонные пики не очень резко выражены. Уровни, не вполне достоверные ввиду неполной воспроизводимости соответствующих пиков по всем пластинкам, даны в двойных скобках. Для перехода ядра Mg<sup>25</sup> в основное состояние нами получено среднее значение  $Q_0 = 5,022$  Мэв; опубликованные ранее значения: 5,097 Мэв<sup>(12)</sup> и 5,03 Мэв<sup>(13)</sup>. Помимо уровней Mg<sup>25</sup>, указанных Эндтом (10), нами был получен ряд более высоких уровней (линии 13--23), ранее не опубликованных. Малая энергия первичных дейтронов (2 Мэв) в опытах Эндта и др. не дала им возможности исследовать этот участок энергии возбуждения. Погрешность полученных нами значений энергии уровней возбуждения для хорошо выраженных пиков -- порядка 20 кэв. Слабо выраженные пики определяются с меньшей точностью.

Таблица 3  
Уровни возбуждения ядра Mg<sup>25</sup> в Мэв

№ линии	Настоящ. работа	(°)	№ линии	Настоящ. работа
1	0,503	0,582	13	4,622
2	0,998	0,976	14	(4,857)
3	1,581	1,612	15	(4,960)
4	2,022	1,957	16	5,147
5	((2,471))	2,565	17	5,341
6	2,695	2,742	18	5,536
7	((2,871))	2,806	19	6,087
8	—	3,405	20	6,249
9	3,924	3,899	21	6,542
10	(4,030)	3,972	22	6,948
11	—	(4,265)	23	((7,074))
12	—	(4,421)		

Методика, примененная Эндтом и др. (10), в 2--3 раза превосходит нашу по разрешающей способности. Их результаты, однако, намного уступают нашим по статистической достоверности. Следует отметить также, что в наших опытах весь энергетический спектор данного элемента получался одновременно и на одной пластинке. Соответствующая кривая в опытах Эндта и др. снята из 20 разных пластинок.

Приношу искреннюю благодарность акад. П. И. Лукирскому и доктору физ-

мат. наук Ю. А. Немилу за многократное плодотворное обсуждение работы.

Поступило  
21 VIII 1953

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Ю. А. Немилу, Изв. АН СССР, сер. физ., **14**, 319 (1950). <sup>2</sup> E. D. Klema, G. C. Phillips, Phys. Rev., **86**, 951 (1952). <sup>3</sup> E. N. Strait, D. M. Van-Patter et al., *ibid.*, **81**, 747 (1951). <sup>4</sup> K. Ogata, H. Matsuda, *ibid.*, **89**, 27 (1953). <sup>5</sup> D. M. Van-Patter, A. Sperduto, W. W. Buechner, *ibid.*, **82**, 248 (1951). <sup>6</sup> T. Rotblatt, Nature, **167**, 1027 (1951). <sup>7</sup> D. V. Cowie, N. P. Heydenburg, G. C. Phillips, Phys. Rev., **87**, 304 (1952). <sup>8</sup> H. B. Burrows, C. F. Powell, Proc. Roy. Soc., **209**, 479 (1951). <sup>9</sup> F. Ajzenberg, T. Lauritsen, Rev. Mod. Phys., **24**, 321 (1952). <sup>10</sup> P. M. Endt, H. A. Enge, T. Haffner, W. W. Buechner, Phys. Rev., **87**, 27 (1952). <sup>11</sup> P. M. Endt, T. Haffner, D. M. Van-Patter, *ibid.*, **86**, 518 (1952). <sup>12</sup> D. M. Van-Patter, A. Sperduto et al., *ibid.*, **5**, 142 (1952). <sup>13</sup> H. R. Allan, C. A. Wilkinson, Proc. Roy. Soc. London, **A 192**, 131 (1948).