

FEI -- 2253

ФЭИ-2253



ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Н. В. КУРЕНКОВ, В. П. ЛУНЕВ,  
В. С. МАСТЕРОВ, Ю. Н. ШУБИН

## Функции возбуждения реакций с образованием радионуклидов

$^{203}\text{Tl}$ ,  $^{203}\text{Pb}$  и  $^{203}\text{Bi}$

(Экспериментальные и расчетные данные)

ОЭИ-2253

АТОМНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Н.В. Куренков, В.П. Лунов,  
В.С. Мастеров, Д.Н. Шубин

ОУСЛОВИИ ВОЗБУЖДЕНИЯ РЕАКЦИЙ С ОБРАЗОВАНИЕМ РАДИОНУКЛИДОВ  
 $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{201}\text{Pb}$  И  $^{201}\text{Bi}$ .  
(ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ)

Обнинск - 1992

Н.В. Куренков\*, В.П. Дунев, В.С. Мастеров, В.Н. Шубин

Функции возбуждения реакций с образованием радионуклидов  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{201}\text{Pb}$  и  $^{201}\text{Bi}$ . (Экспериментальные и расчетные данные).

ФМ-2253. 1992. - 48 с.

Обсуждаются результаты расчетов функций возбуждения реакций с образованием нейтронодефицитных радионуклидов  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{201}\text{Pb}$ ,  $^{201}\text{Bi}$ , в том числе сопутствующих реакций, вызванных заряженными частицами. Сечения реакций  $^{202}\text{Hg}(p,xn)$ ,  $^{197}\text{Au}(a,xn)$ ,  $^{203,205}\text{Tl}(p,xn)$ ,  $^{203,205}\text{Tl}(d,xn)$ ,  $^{203,205}\text{Tl}(p,pxn)$ ,  $^{204}\text{Pb}(p,xn)$ ,  $^{204}\text{Pb}(p,p\beta n)$ ,  $^{206}\text{Pb}(p,\beta n)$ ,  $^{206}\text{Pb}(p,p\beta n)$ ,  $^{207}\text{Pb}(p,7n)$ ,  $^{207}\text{Pb}(p,p\beta n)$ ,  $^{208}\text{Pb}(p,xn)$  и  $^{208}\text{Pb}(p,p7n)$  рассчитывались на основе статистического подхода в области энергий до 80 МэВ. Для большинства реакций с образованием  $^{201}\text{Tl}$  приведены данные по расчетным и практическим выходам при оптимальных условиях, в том же порядке уровни основных примесей. Расчеты проводились по программе ALICE. Сравнение с обширным экспериментальным материалом по сечениям для 25 реакций показало, что используемый подход дает удовлетворительные результаты для большинства из рассмотренных реакций. Единственное исключение представляет реакция, приводящая к образованию изомерных состояний. Для расчета функций возбуждения реакций с образованием изомерных состояний использовалась программа STAPRE.

The results of calculations of charged particle induced reactions for the production of neutron deficient radioisotopes  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{201}\text{Pb}$ ,  $^{201}\text{Bi}$  and concomitant ones are discussed. The excitation functions for reactions  $^{202}\text{Hg}(p,xn)$ ,  $^{197}\text{Au}(a,xn)$ ,  $^{203,205}\text{Tl}(p,xn)$ ,  $^{203,205}\text{Tl}(d,xn)$ ,  $^{203,205}\text{Tl}(p,pxn)$ ,  $^{204}\text{Pb}(p,xn)$ ,  $^{204}\text{Pb}(p,p\beta n)$ ,  $^{206}\text{Pb}(p,\beta n)$ ,  $^{206}\text{Pb}(p,p\beta n)$ ,  $^{207}\text{Pb}(p,7n)$ ,  $^{207}\text{Pb}(p,p\beta n)$ ,  $^{208}\text{Pb}(p,xn)$  and  $^{208}\text{Pb}(p,p7n)$  are calculated on the base of statistical model in energy range up to 80 MeV. For the most reactions producing  $^{201}\text{Tl}$  the data on the calculated and practical yields under optimal conditions are given and the main admixture levels are pointed out. The calculations were performed with ALICE code. The comparison with vast experimental cross sections for about 25 reactions shows that the approach used gives the satisfactory results for the most reactions except  $(p,pxn)$  reaction on natural Thallium and  $(d,xn)$ ,  $(p,pxn)$  reactions with to isomer states  $^{202m}\text{Pb}$  and  $^{204m}\text{Pb}$  formation. The STAPRE code was used for the calculations of isomeric states excitation functions.

© - Физико-энергетический институт (ФЭИ), 1992 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Первые данные в области средних энергий необходимы для широкого круга приложений. Важное значение они имеют для решения проблемы трансмутации и выжигания радиоактивных отходов, защиты ускорителей, в космических исследованиях, для выбора наиболее оптимальных способов производства медицинских радиоизотопов. Ограниченность экспериментальных возможностей, а во многих случаях принципиальная невозможность получения экспериментальных данных, приводят к необходимости развития теоретических методов расчета и оценки требуемых данных. Эти методы должны тестироваться по имеющимся экспериментальным данным. В области средних энергий данные по нейтронам сечениям практически отсутствуют. Однако для заряженных частиц имеется обширная экспериментальная информация, сравнения с которой может облегчить выбор моделей расчета и их дальнейшее развитие. В данной работе проводятся расчеты и сравнение с имеющимися экспериментальными данными в области массовых чисел  $A \approx 200$  для более чем 30 реакций, вызванных протонами, дейтронами и альфа-частицами с энергией до 80 МэВ, приводящих к образованию нейтрондефицитных изотопов  $^{201}\text{Tl}$  и сопутствующих ему радионуклидов.

К радионуклидам, находящим в последнее десятилетие широкое распространение в диагностических исследованиях в ядерной медицине, можно с полным основанием отнести таллий-201 ( $T_{1/2} = 73$  ч). Теперь общеизвестно, что  $^{201}\text{Tl}$  является одним из лучших радионуклидов в числе потенциально пригодных для визуализации зон микроциркуляции кровоснабжения.

Таллий-201 является нейтрондефицитным радионуклидом, получаемым на ускорителях заряженных частиц в результате ядерных реакций с изотопами ртути, таллия, свинца и висмута. На сегодня исследовано большое количество различных ядерных реакций, приводящих к образованию таллия-201 или его радиоактивных предшественников - свинца-201 ( $T_{1/2} = 9,4$  ч) и висмута-201 ( $T_{1/2} = 1,8$  ч). При облучении ртутных мишеней протонами или дейтронами происходит прямое образование таллия-201 по реакциям типа  $(p, xn)$  и  $(d, xn)$ . При облучении таллиевых мишеней теми же частицами происходит как прямое его образование, так и через распад его радиоактивного предшественника - свинца-201. Использование же свинцовых и висмутовых мишеней предполагает цепочку последовательных ядерных превращений от полония-201 до таллия-201 через висмут-201 и свинец-201.

В связи с этим, как и в случае с Йодом-123 [1], авторам показалось логичным продолжить сопоставление накопленных данных по сечению ядерных реакций, приводящих к образованию таллия-201 и его радиоактивных предшественников с результатами расчетов этих же сечений реакций с использованием программы ALICE-87. Дополнительный интерес вызывало также и то обстоятельство, что и здесь сравнение проводилось для нейтронодефицитных ядер, но расположенных уже в области не средних, какими являлись радионуклиды Йод-123, Ксенон-123 и Цезий-123, а в области тяжелых ядер. Ряд расчетов был выполнен и для ядерных реакций, приводящих к образованию таллия-199 и сопутствующих ему радионуклидов. Применяемая методика расчетов была аналогичной использованной ранее [1].

#### 1. РЕАКЦИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТАЛЛИЯ-201.

Среди двух десятков изотопов таллия, «известных в настоящее время, в ядерной медицине распространения получили два  $^{199}\text{Tl}$  и  $^{201}\text{Tl}$ . Предложение об использовании таллия-199 было впервые сделано в 1970 г. [2], но уже в 1973 г. был предложен таллий-201 [3], который вот уже на протяжении почти 20 лет находит широкое применение в диагностике миокарда. Этот радионуклид, распадающийся путем электронного захвата с периодом полураспада 73 часа в стабильную ртуть-201, испускает интенсивное рентгеновское излучение в диапазоне энергий 69-80 кэВ (регистрация которого с помощью синцинтиляционной гамма-камеры позволяет получать изображение с высокой четкостью), а также  $\gamma$ -излучение, наиболее интенсивные линии которого имеют энергию 135 и 167 кэВ. Сравнение лучевых нагрузок, получаемых пациентами на различные органы и вся тело при проведении диагностических процедур на единицу активности радионуклидов таллия, показало, что дозовые нагрузки, создаваемые таллием-199, почти в 10 раз меньше по сравнению с аналогичными для таллия-201 [4]. Следует заметить, что период полураспада  $^{201}\text{Tl}$  позволяет использовать его в клинике в течение 10 суток, что безусловно удобно, однако, это обстоятельство препятствует его использованию для повторных исследований с динамическими нагрузками, где может находить свое применение более короткоживущий  $^{199}\text{Tl}$  ( $T_{1/2} \approx 7,4$  ч). На практике применение последнего из-за короткого периода полураспада возможно лишь при наличии ускорителя заряженных частиц, установка которого нецелесообразна в клинике или рядом с ней. Р. Шварцман

время имеются указания на применение таллия-201 для других органов, кроме сердца. Из радионуклидных примесей в препарате таллия-201 критическим является долгоживущий таллий-202 ( $T_{1/2}=12$  сут). Примеси других радионуклидов, в частности свинец-203 ( $T_{1/2}=52,1$  ч) и таллия-200 ( $T_{1/2}=26,1$  ч), менее критичны, поскольку их периоды полураспада меньше чем у таллия-201. Суточный объем производства таллия-201 в мире составил 2500 кири по данным на 1967 г. [5]. В нашей стране выпуск таллия-201 не превышает 5 кири в год.

#### I. ПРИМЕНЕ РЕАКЦИИ.

##### I.1. Реакция $^{202}\text{Hg}(p,2n)^{201}\text{Tl}$ .

При облучении ртути природного изотопного составе протонами или дейтронами образуется смесь радионуклидов таллия от 196 до 204, экспериментальные выходы для четырех из них, а именно:  $^{200,201,202,204}\text{Tl}$ , были измерены в работе [6]. Данные из этой работы свидетельствуют, что получаемая смесь изотопов таллия не пригодна для использования в ядерной медицине, так как содержит слишком большие количества  $^{200}\text{Tl}$  и  $^{202}\text{Tl}$ , для уменьшения доли которых в препарате таллия-201 авторы рекомендуют облучать обогащенный изотопы ртути и, в частности  $^{202}\text{Hg}$  [7-8]. Однако, если провести анализ реакций получения  $^{201}\text{Tl}$  на отдельных изотопах ртути, то поневоле приходишь к выводу, что при этом практически нельзя выполнить основное требование, предъявляемое сегодня к препаратам с таллием-201, а именно: совместить высокий выход целевого радионуклида с его высокой радионуклидной чистотой. Действительно, реакция  $^{201}\text{Hg}(p,n)^{201}\text{Tl}$  не пригодна вследствие низкого выхода при энергии протонов до 10 МэВ. Это условие продиктовано наличием конкурирующей реакции  $^{201}\text{Hg}(p,2n)^{200}\text{Tl}$ , энергетический порог которой равен 9,5 МэВ. Практическая реализация реакции  $^{202}\text{Hg}(p,2n)^{201}\text{Tl}$ , имеющая относительно высокий выход  $^{201}\text{Tl}$  [9], затруднена из-за большой примеси  $^{200,202}\text{Tl}$ , образующихся попутно в реакциях  $^{202}\text{Hg}(p,n)^{202}\text{Tl}$  и  $^{202}\text{Hg}(p,3n)^{200}\text{Tl}$  соответственно. Использование реакции  $^{204}\text{Hg}(p,4n)^{201}\text{Tl}$  также не дает таллия-201 удовлетворительного качества из-за образования больших количеств  $^{202}\text{Tl}$  по реакции  $^{204}\text{Hg}(p,3n)$ . Экспериментальные функции возбуждения для реакций типа  $\text{Hg}(p,2n)$  отсутствуют, но в работе [9] были измерены дифференциальные выходы  $^{201}\text{Tl}$ , а также  $^{199,200,202}\text{Tl}$  при облучении ртути с обогащением по  $^{202}\text{Hg}$  до 99,6 % протонами с энергией от 10 до 28 МэВ. В реакциях

настоящей работы значения выходов для  $^{201,200,202}\text{Tl}$ , образующихся по реакциям  $^{202}\text{Hg}(p,2n)$ ,  $^{202}\text{Hg}(p,3n)$  и  $^{202}\text{Hg}(p,n)$  соответственно, были пересчитаны в сечения для указанных выше реакций, значения которых сравнивались с расчетными, полученными с использованием программы ALICE-87. Расчеты по программе ALICE-87 опирались в основном на значения параметров, заложенные в программу из различных систематик и рекомендованные автором программы как оптимальные.

Расчетные и экспериментальные значения функций возбуждения представлены на рисунке 1 и находятся в разумном согласии между собой за исключением быть может реакции  $^{202}\text{Hg}(p,n)^{202}\text{Tl}$ , для расчетных значений которой наблюдается сдвиг в область низких энергий.

### 1.2 Реакция $^{197}\text{Au}(\alpha,2n)^{199}\text{Tl}$ .

Как уже было сказано, применение в ядерной медицине находят и таллий-199. Функции возбуждения реакций  $^{197}\text{Au}(\alpha,2n)^{199}\text{Tl}$  и  $^{197}\text{Au}(\alpha,n)^{200}\text{Tl}$  были экспериментально измерены в работах [10,11] для диапазона энергий  $\alpha$ -частиц от 10 до 40 МэВ. В работе [11] были определены также оптимальные условия получения таллия-199 и его выход, который составил 0,93 мКи/мКа·ч для начальной энергии  $\alpha$ -частиц 26 МэВ и толщины мишени из золота 61,4 мг/см<sup>2</sup>. Примесь  $^{200}\text{Tl}$  к концу облучения не превышала 0,56 %.

Расчет зависимостей сечений реакций  $^{197}\text{Au}(\alpha,n)^{200}\text{Tl}$ ,  $^{197}\text{Au}(\alpha,2n)^{199}\text{Tl}$ , и  $^{197}\text{Au}(\alpha,3n)^{198}\text{Tl}$  от энергии  $\alpha$ -частиц, произведенные по программе ALICE-87, демонстрируют (см. рисунок 2) хорошее согласие с экспериментальными данными [11].

## 2. НЕПРЯМЫЕ РЕАКЦИИ.

### 2.1. Реакции $^{203}\text{Tl}(p,3n)^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$ и $^{203}\text{Tl}(p,5n)^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$ .

При облучении протонами природного металлургического таллия, в нем состоит из двух изотопов  $^{203}\text{Tl}$  (29,5 %) и  $^{205}\text{Tl}$  (70,5 %), наряду с другими образуется радионуклид  $^{201}\text{Pb}$  ( $T_{1/2} = 14,4$  ч), который по окончании облучения отделяет от материала мишени с использованием техник радиохимии и в результате дальнейшего распада которого образуется  $^{201}\text{Tl}$ .

Функции возбуждения реакций  $^{203}\text{Tl}(p,3n)^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$  и  $^{203}\text{Tl}(p,5n)^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$

кратно [9,12-'61], но экспериментальные данные носили несколько противоречивый характер. Так значения в максимуме функции возбуждения этой реакции колебались от 700 [13] и 850 мбарн [12] до 1040 мбарн [15]. В работе [14], где функции возбуждения измерялись для ряда радионуклидов свинца и таллия, образующихся на природном таллии под действием протонов с энергией от 6 до 45 МэВ, авторы попытались раздвинуть каналы, ведущие к образованию  $^{201}\text{Pb}$  по реакции  $^{203}\text{Tl}(p,3n)$  и  $^{205}\text{Tl}(p,5n)$  и поэтому привели значения функций возбуждения в расчете на атом природного таллия. Однако утверждают, что полученные ими данные для  $^{201}\text{Pb}$  согласуются с аналогичными данными из работ [12] и [15]. Еще две группы авторов, которые также измеряли функции возбуждения для реакции  $^{203}\text{Tl}(p,3n)^{201}\text{Pb}$  на природном таллии [9,16], констатируют совпадение своих экспериментальных результатов с данными работы [15]. В работе [17] показано, что для реакции  $^{203}\text{Tl}(p,3n)^{201}\text{Pb}$  на природном или обогащенном таллии-203 энергия протонов на входе в мишень должна составлять 28,6 МэВ, а на выходе 22 МэВ. При этих условиях примеси  $^{200}\text{Tl}$  и  $^{202}\text{Tl}$  в препарате не превышают соответственно 1 % и 0,2 % на момент переработки мишени (оптимально через 32 часа после отделения  $^{201}\text{Pb}$ ). Выход  $^{201}\text{Tl}$  при этих условиях составляет для природного таллия 0,7 мКи/мкА·ч. Применение мишеней, обогащенных по таллию-203 до 90-97 %, повышает выход  $^{201}\text{Tl}$  в 3 раза. Выход  $^{201}\text{Tl}$  по реакции  $^{205}\text{Tl}(p,5n)^{201}\text{Pb}$ ,  $^{201}\text{Tl}$  на мишенях из обогащенного таллия-205 (>99 %) для диапазона энергий протонов 46-38 МэВ оценивается равным 2,0 мКи/мкА·ч [17]. При этом примеси  $^{200}\text{Tl}$  и  $^{202}\text{Tl}$  составляют 1,5 % и 1,0 % соответственно.

Расчетные значения сечений для реакций  $^{203}\text{Tl}(p,3n)^{201}\text{Pb}$ ,  $^{203}\text{Tl}(p,4n)^{200}\text{Pb}$ ,  $^{203}\text{Tl}(p,2n)^{202}\text{Pb}$ , полученные с использованием программы ALICE, сравнивались с экспериментальными данными работы [14]. Сравнение показывает (см. рис. 3), что расчетные данные для реакции  $^{203}\text{Tl}(p,3n)^{201}\text{Pb}$  близки к экспериментальным, и разница в максимумах этих функций не превышает 6 %, однако расчетное максимальное значение сечения несколько больше, чем соответствующее экспериментальное. Эта разница для реакции  $^{203}\text{Tl}(p,4n)^{200}\text{Pb}$  составляет уже 30 %. Расчетные и экспериментальные данные для реакции  $^{203}\text{Tl}(p,2n)^{202}\text{Pb}$  сравнивать не представляется возможным из-за того, что в рамках модели ALICE невозможно корректно проинтегрировать учет лэмбда-отражений.

Приведем оптимизацию измеренных соотношений в реакциях  $^{203}\text{Tl}(p,3n)^{201}\text{Pb}$

нескольких частиц до сих пор остается нерешенной. Существующие систематики ограничены данными, в основном, для одноступенчатых реакций  $(n,p)$ ,  $(n,\alpha)$ ,  $(n,p')$  и области энергий около 14 МэВ [18]. В ряде случаев экспериментальные данные могут быть рассчитаны теоретически. Однако имеются сильные разногласия между теорией и экспериментом, особенно для малых ( $<0.1$ ) значений изомерных отклонений, связанные с неопределенностью схем дискретных уровней, вероятностей гамма-переходов и спиновой зависимости плотности уровней [19].

Оценить сечения образования изомерного и основного состояния ядра можно с помощью программы STAPRE [20]. Расчеты по программе STAPRE проводились с параметрами оптических потенциалов, взятыми из систематики M. Blatt [21], используемых в программе ALICE. Матричный элемент внутриядерного нуклон-нуклонного взаимодействия для расчетов предравновесных процессов выбирался таким образом, чтобы вклад предравновесных процессов в программе STAPRE совпадал с результатами ALICE. Поскольку модели предравновесного распада, используемые в двух программах, различны, вклады предравновесных процессов совпадают в пределах 20 %.

Схемы дискретных уровней возбуждения как основного так и изомерных состояний, и вероятности соответствующих электромагнитных переходов взяты из компиляции [22]. Следует отметить, что функция возбуждения изомерного состояния, вычисленная с помощью STAPRE, зависит от введенной схемы уровней, в отличие от их количества для основного и изомерного состояний соответственно. Кроме того, программа STAPRE требует задания плотности уровней и радиационных ширины для всех конкурирующих каналов, учитываемых в расчете.

Параметры плотности уровней силы подобраны по данным Дилга [23], извлеченным из экспериментальных данных в модели Фэрми-геза с обратным смешиванием. Поскольку в работе Дилга [23] данные были извлечены лишь для небольшого числа нуклидов, мы провели интерполяцию этих данных на область нуклидов с массовым параметром от 190 до 210. Для параметров плотности уровней  $\alpha$  и  $\Delta$  использовались интерполяционные формулы Дилга [23]. Интерполированные значения параметров вместо с данными из систематики Дилга приведены в Таблице I. В колонке помеченной (\*) приведены результаты интерполяции данных Дилга [23].

Таблица I.

Параметры  $\alpha$  и  $\Delta$  для расчетов плотности уровней

| A   | a     |       | Δ         |       |           |       |           |       |           |      |
|-----|-------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|------|
|     |       |       | Hg (Z=80) |       | Tl (Z=81) |       | Pb (Z=82) |       | Bi (Z=83) |      |
|     | (*)   | {23}  | (*)       | {23}  | (*)       | {23}  | (*)       | {23}  | (*)       | {23} |
| 194 | 22.00 | 19.56 | 0.79      |       | 0.82      |       | 0.79      |       | -0.82     |      |
| 195 | 21.09 |       | -0.49     |       | -0.49     |       | -0.49     |       | 0.49      |      |
| 194 | 20.16 | 17.99 | 0.82      |       | -0.83     |       | 0.82      |       | -0.83     |      |
| 195 | 19.27 |       | -0.56     |       | -0.56     |       | -0.56     |       | 0.56      |      |
| 196 | 18.35 | 17.95 | 0.74      |       | -0.85     |       | 0.74      |       | -0.85     |      |
| 197 | 17.44 |       | -0.54     |       | -0.64     |       | -0.64     |       | 0.64      |      |
| 198 | 16.53 | 16.26 | 0.61      |       | -0.85     |       | 0.61      |       | -0.85     |      |
| 199 | 15.61 | 15.92 | -0.67     | -0.67 | -0.67     |       | -0.67     |       | 0.67      |      |
| 200 | 14.70 | 14.86 | 0.52      | 0.52  | -0.87     |       | 0.52      |       | -0.87     |      |
| 201 | 13.79 | 13.00 | -0.62     | -0.62 | -0.62     |       | -0.62     |       | 0.62      |      |
| 202 | 12.87 | 14.68 | 0.50      | 0.81  | -0.88     |       | 0.50      |       | -0.88     |      |
| 203 | 11.96 |       | -0.45     |       | -0.45     |       | -0.45     |       | 0.45      |      |
| 204 | 11.05 | 11.26 | 0.63      |       | -0.89     | -0.50 | 0.63      |       | -0.89     |      |
| 205 | 10.14 | 12.09 | -0.12     |       | -1.12     |       | -0.12     | -0.12 | 0.12      |      |
| 206 | 9.22  | 10.21 | 0.95      |       | 0.96      | -0.90 | 0.95      |       | -0.96     |      |
| 207 | 8.31  | 8.94  | 0.40      |       | 0.40      |       | 0.40      | 0.40  | -0.40     |      |
| 208 | 7.40  | 8.53  | 1.52      |       | -0.91     |       | 1.52      | 1.52  | -0.91     |      |

На рис. 3 штриховыми кривыми показаны результаты расчетов функций возбуждения основных состояний ядер  $^{200,201,202}\text{Pb}$  и изомерного для  $^{202}\text{Pb}$  по программе STAPRE для реакций  $^{203}\text{Tl}(p, xn)^{200,201,202}\text{Pb}$ .

Следует отметить, что функции возбуждения для основных состояний в целом подобны рассчитанным по программе ALICE, однако имеют несколько меньшие значения в максимумах, а также несколько иной систематический сдвиг последних в сторону высоких энергий. Расчетные значения для изомерного состояния находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными для реакции  $^{203}\text{Tl}(p, 2n)^{202m}\text{Pb}$ .

Функция возбуждения для реакции  $^{205}\text{Tl}(p, 5n)^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$  была измерена в работах [15, 17], в которых также были измерены функции возбуждения реакции  $^{205}\text{Tl}(p, 2n)^{205}\text{Tl}$ ,  $^{205}\text{Tl}(p, 3n)^{205}\text{Tl}$  и  $^{205}\text{Tl}(p, 6n)^{201}\text{Tl}$ . Сравнение экспериментальных и расчетных данных, приведенное на рисунках 4а, 4б, показывает, что расчетные данные для реакции  $^{205}\text{Tl}(p, 5n)^{201}\text{Pb}$  хорошо согласуются с аналогичными экспериментальными из работы [15] и несколько хуже с более поздними данными тех же авторов [17]. Экспериментальные данные для реакции  $^{205}\text{Tl}(p, 2n)^{205}\text{Tl}$  и  $^{205}\text{Tl}(p, 3n)^{205}\text{Tl}$  различаются с расчетными данными

татами расчетов по программе STAPRE. Для этих реакций согласие с экспериментом несколько хуже, чем для реакции  $^{203}\text{Tl}(p,2n)$ . Это указывает, по-видимому, на необходимость более тщательного анализа исходных данных для всех конкурирующих каналов, учитываемых в расчетах. Для реакции  $^{203}\text{Tl}(p,3n)^{203}\text{Pb}$  лучшую согласованность расчетных и экспериментальных данных дает программа STAPRE, а для реакции  $^{203}\text{Tl}(p,5n)^{203}\text{Pb}$  - ALICE (см. рис.4б).

Известно, что в области масс ядер  $A=200$  реакции типа  $(p, xn)$  доминируют над реакциями типа  $(p, rxn)$  для средних энергий возбуждения, когда вероятность вылета нейтрона многократно превышает вероятность испускания протона или другой заряженной частицы вследствие высокого кулоновского барьера. Это подтверждают и экспериментальные данные, полученные для реакции  $^{203,205}\text{Tl}(p, rxn)$  в области энергий протонов до 45 МэВ на мишенях из природного таллия [14]. Соответствие экспериментальных данных с аналогичными расчетными в рамках ALICE с соответствующей корректировкой на изотопное содержание в природной смеси показывает (см. рисунок 5), что эти значения существенно различаются. Поскольку указанные реакции имеют различие значения сечений, то все сечения реакций, ведущие к образованию таллия-201, представленные на рисунке 5, увеличены в 10 раз. Действительно, для реакции  $^{203}\text{Tl}(p, 2p)$  расчетные значения в области энергий в целом существенно меньше соответствующих экспериментальных. Этот же факт можно констатировать и для реакции  $^{203}\text{Tl}(p, 3p)$ . Сдвиг расчетных функций возбуждения приблизительно на 10 МэВ в сторону низких энергий практически устраняет эту разницу, но для этого сдвига нет физического обоснования. Следует учесть также, что погрешность в эксперименте при измерении сечений этих реакций достигала 40 %.

В программе ALICE-87 предусмотрена, кроме изменения параметров оптических потенциалов, плотности уровней и начального числа состояний, возможность использовать несколько различных предравновесные модели - простую гибридную и гибридную модель, зависящую от геометрии (GDH). В модели GDH учитывается конечность глубины потенциальной ямы и диффузность поверхности ядра, которая приводит к увеличению длины свободного пробега нуклона в поверхностном слое (для больших орбитальных моментов). В работе [24] R. M. Jurek анализировал функции возбуждения реакций, вызванных протоном на средних энергиях из ядер группы железа, и пришел к выводу, что в первом приближении функция возбуждения в ядре с  $Z > 20$  может

речь идет о данных дает модель GDN, причем в области энергий протонах 100 МэВ. Для реакций с дейтронами и альфа-частицами такого однозначного ввода сделать пока нельзя. Необходимо привлечение более широкого круга экспериментальных данных в разных областях массовых чисел.

### 2.2. Реакции $^{203}\text{Tl}(d,4n)^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$ и $^{205}\text{Tl}(d,6n)^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$ .

Функции возбуждения реакций  $^{203}\text{Tl}(d,4n)$  и  $^{205}\text{Tl}(d,6n)$ , приводящие к образованию нуклидов  $^{201}\text{Pb}$ ,  $^{202m}\text{Pb}$ ,  $^{200}\text{Pb}$ , а также  $^{203}\text{Pb}$  и  $^{204m}\text{Pb}$  в области энергий дейтронов 18-50 МэВ, измерили с целью исследования возможности использования этих реакций для коммерческого производства таллия-201 на циклотронах [13]. В результате этих исследований порог реакции  $^{203}\text{Tl}(d,4n)^{201}\text{Pb}$  был установлен равным 23 МэВ, а максимальное сечение этой реакции было найдено равным 1150 мбарн для энергии дейтронов 32 МэВ. Экспериментальных данных для функции возбуждения реакции  $^{205}\text{Tl}(d,6n)^{201}\text{Pb}$  вторым, к сожалению, получить не удалось. Расчетные значения сечений для всех указанных выше реакций в рамках программы ALICE (см. рисунки 6 и 7) хорошо согласуются с экспериментальными данными для них за исключением реакций, приводящих к образованию изомеров, а именно:  $^{203}\text{Tl}(d,3n)^{202m}\text{Pb}$ ,  $^{205}\text{Tl}(d,3n)^{204m}\text{Pb}$  и  $^{205}\text{Tl}(d,5n)^{202m}\text{Pb}$ , для которых изомерные отношения не известны.

### 2.3. Реакции типа $\text{Pb}(p,4n)^{201}\text{Bi} \rightarrow ^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$ .

В реакциях типа  $\text{Pb}(p,4n)^{201}\text{Bi} \rightarrow ^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$  имеются сравнительно немногочисленные данные (25-30). Эти реакции привлекательны тем, что образующийся по сопутствующей реакции  $\text{Pb}(p,4n)^{202}\text{Bi} \rightarrow ^{202}\text{Pb}$  свинец-202 ( $T_{1/2} = 3 \cdot 10^5$  лет) с практической точки зрения является стабильным и быстро не превращается в таллий-202, являющийся нежелательной примесью в препарате таллия-201, а возможное образование радиоактивного таллия-202 может протекать лишь через прямое образование свинца-202m ( $T_{1/2} = 3,62$  ч), являющегося радиоактивным предшественником таллия-202, по реакции  $\text{Pb}(p,4n)^{202m}\text{Pb} \rightarrow ^{202}\text{Tl}$ , что в итоге приводит к значительному снижению этой примеси в препарате таллия-201. Это связано с тем, что при расходе  $^{201}\text{Tl}$  лишь около 10 ядер из каждого 100 превращаются в изотоп-дети-пато 1-

$^{209}\text{Tl}$ , а остальные  $\approx 4\%$  переходят в свое основное состояние. Вклад от сопутствующих реакций типа  $\text{Fb}(p, \text{xn})^{200}\text{Bi} \rightarrow ^{200}\text{Pb}, ^{200}\text{Tl}$ , ведущих к образованию примеси таллия-200, может быть существенно снижен при использовании высокообогащенных мишеней из свинца и подбором режима их облучения. Экспериментальные функции возбуждения для указанных реакций отсутствуют. Это, по-видимому, связано с тем, что при облучении свинца природного изотопного состава, э он включает в себя четыре изотопа:  $^{204}\text{Pb}$  (1,4 %),  $^{206}\text{Pb}$  (24,1 %),  $^{207}\text{Pb}$  (22,1 %) и  $^{208}\text{Pb}$  (52,4 %), протонами с энергиями в диапазоне 25-90 МэВ оценить независимые активности изотопов висмута или свинца, образующихся практически одновременно на различных изотопах свинца, невозможно. Для этого требуется проведение отдельных исследований на обогащенных свинцовых мишенях. Частично они были проведены в работе [28], где бомбардировке протонами с начальной энергией 100 МэВ подвергали свинцовые ободки из  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}$  с обогащением 94, 89 и 97,5 % соответственно, но при этом были измерены лишь выходы  $^{200}\text{Tl}$ ,  $^{201}\text{Tl}$  и  $^{202}\text{Tl}$ . Для всесторонней же оценки практической пригодности этого метода получения чистого таллия-201 из обогащенных свинцовых мишеней прежде всего необходимы функции возбуждения реакций типа  $\text{Fb}(p, \text{xn})^{201}\text{Bi}$ , а также ряда сопутствующих реакций, приводящих к образованию таллия-200 и таллия-202. Функция возбуждения для реакции  $^{200}\text{Pb}(p, \text{pn})^{201}\text{Bi}$  впервые была измерена почти 40 лет назад [29], когда для диапазона энергий протонов 49- 64 МэВ на мишенях из обогащенного свинца-206 (89,2 %) было получено 4 экспериментальные точки, и новых попыток ее измерить с той поры не предпринималось. Расчеты функций возбуждения для реакций  $^{206,207,208}\text{Pb}(p, \text{xn})^{207-x,208-x,209-x}\text{Bi}$ , а также реакций  $^{206,207,208}\text{Pb}(p, \text{pxn})^{206-x,207-x,208-x}\text{Pb}$ , где  $x$  в зависимости от типа реакции принимает значения: 1 до 9, были проделаны недавно с помощью программы Overlaid ALICE в работе [30]. В их число входят и реакции, приводящие к образованию  $^{201}\text{Bi}$  и  $^{201}\text{Pb}$ , но отсутствуют данные о сечениях реакций аналогичного типа на  $^{204}\text{Pb}$  и не приводятся каких-либо новых экспериментальных данных для указанных реакций, сравнение расчетных данных для которых проводится лишь с давно известными [26].

Расчеты функций возбуждения для реакций  $^{204,206,207,208}\text{Pb}(p, \text{xn})^{201}\text{Bi}$  и  $^{204,206,207,208}\text{Pb}(p, \text{pxn})^{201}\text{Pb}$ , а также ряда сопутствующих реакций были выполнены в рамках программы ALICE-97, и результаты для реакций  $^{204}\text{Pb}(p, \text{4n})^{201}\text{Bi}$ ,  $^{206}\text{Pb}(p, \text{6n})^{201}\text{Bi}$ ,  $^{207}\text{Pb}(p, \text{7n})$

$^{201}\text{Bi}$  и  $^{208}\text{Pb}(p,8p)^{201}\text{Bi}$  представлены на рисунке 8. Как известно, вкладом именно этих реакций в основном определяются величина выхода теллур-201, так как в этой области энергий протонов вкладом реакций типа  $\text{Pb}(p,\alpha p)^{201}\text{Pb}$  и  $\text{Pb}(p,\alpha p)^{201}\text{Tl}$  с практической точки зрения можно пренебречь. Максимум функции возбуждения для реакции  $^{204}\text{Pb}(p,4p)^{201}\text{Bi}$ , как видно из рис. 9, составляет 1200 мбэрн при энергии протонов 40 МэВ. Максимум конкурирующей реакции  $^{204}\text{Pb}(p,5p)^{200}\text{Bi}$  лежит при энергии 51 МэВ, а вклад реакции  $^{204}\text{Pb}(p,3p)^{201}\text{Pb}$  в общую активность свинца-201 можно, как и следовало ожидать, считать незначительным. Выход свинца-201, если исходить из кривой функции возбуждения реакции  $^{204}\text{Pb}(p,4p)$  в диапазоне энергий протонов 45-52 МэВ, составит не менее 44 мКи/мкс.ч, что в пересчете на теллур-201 с учетом оптимальных выдержек и мгновенного облучения составит 4,2 мКи/мкс.ч.

Реакция  $^{206}\text{Pb}(p,6p)^{201}\text{Bi}$  для своей эффективной реализации требует начальной энергии протонов не менее 56 МэВ, так как, если верить расчетам, максимум ее функции возбуждения лежит в области 61 МэВ и равен 600 мбэрн. Выход свинца-201, рассчитанный путем интегрирования этой функции в пределах энергии протонов от 66 до 52 МэВ, оказался равным 32 мКи/мкс.ч, что в пересчете на теллур-201 дает значение 3,0 мКи/мкс.ч. Эта оценка хорошо согласуется с экспериментальными данными [27] и отчасти с данными работы [25].

Следует особо отметить, что все расчеты для реакций, ведущих к образованию  $^{201}\text{Bi}$ , а он как известно включает в себя два нуклида  $^{201m}\text{Bi}$  ( $T_{1/2}=69,1$  мин) и  $^{201}\text{Bi}$  ( $T_{1/2}=1,8$  ч), проводились в предположении, что доминирует процесс образования  $^{201m}\text{Bi}$  [26], за счет распада которого и образуется основное количество свинца-201, поэтому разделения каналов образования изомера и основного состояния не проводилось.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В рамках представленной работы проанализированы функции возбуждения более 30 ядерных реакций, приводящих к образованию теллур-201 и сопутствующих нуклидов. Для расчетов использовалась программа АНУС-87. Сравнения с имеющимися экспериментальными данными проводились для 20 реакций. Для подтверждения достоверности расчетов проведено сравнение с данными работы [25] для реакции  $^{204}\text{Pb}(p,4p)^{201}\text{Bi}$  и с данными работы [27] для реакции  $^{206}\text{Pb}(p,6p)^{201}\text{Bi}$ . Расчеты показали, что для получения теллура-201 с оптимальными выдержками и мгновенным облучением наиболее эффективными являются реакции  $^{204}\text{Pb}(p,4p)^{201}\text{Bi}$  и  $^{206}\text{Pb}(p,6p)^{201}\text{Bi}$ .

новых примесей.

Сопоставление рассчитанных в рамках статистической модели функций возбуждения ядерных реакций, вызванных протонами, дейтронами и альфа-частицами средних энергий, с обширными экспериментальными материалами показывает, что используемый подход дает удовлетворительные оценки для большинства реакций. Исключение составляет реакция  $(p, \rho xp)$  на природном таллии, а также реакции типа  $(d, xp)$  и  $(p, xp)$  с образованием изомерных состояний  $^{202m}\text{Pb}$  и  $^{204m}\text{Pb}$ . Для расчета функций возбуждения реакций с образованием изомеров использовалась программа STAPRE, приводящая к удовлетворительному описанию экспериментальных данных в случае реакции  $^{203}\text{Tl}(p, 2n)^{202m}\text{Pb}$ .

Можно считать, что результаты расчетов с использованием программы ALICE могут служить разумной оценкой для функций возбуждения и выходов соответствующих реакций, кроме реакций, приводящих к образованию изомерных состояний. Для расчетов сечений реакций с образованием изомерных состояний необходимо привлечь другие расчетные программы, использующие более детальную информацию о структурных особенностях ядер в исходных данных. Поэтому для 7 реакций экспериментальные и расчетные результаты были сопоставлены с данными расчетов по программе STAPRE.

Расчет функций возбуждения для ряда реакций, а также выходов сцинтилляции-201 и таллия-201 произведен впервые, в частности, для реакции  $^{204}\text{Pb}(p, 4n)^{201}\text{Bi}$ .

Экспериментальные и рассчитанные данные по функциям возбуждения реакций, анализируемых в данной работе, приведены в Приложении.

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. А.Г.Довоенко, Н.В.Курачков, В.П.Луцев, А.Б.Малинин, В.С.Мастеров, Ю.Н.Шубин. Функции возбуждения реакций с образованием радионуклидов  $^{123}\text{I}$ ,  $^{123}\text{Xe}$  и  $^{123}\text{Cs}$ . (Экспериментальные и расчетные данные). Препринт ФЭИ-2182, Обнинск, 1991, 43 с.
2. Kawana M., Krizek H., Porter J., Lathrop K.A., Charleston D., Harper F.V. Use of  $^{199}\text{Tl}$  as a Potassium Analog. In Scanning. J. Nucl. Med., 1970, v.11, №6, p. 333.

3. Lebowitz E., Greene M.W., Bradley-Moore F., Atkins H., Ansari A., Richards P., Belgrave E.  $^{201}\text{Tl}$  for Medical Use. *J.Nucl. Med.*, 1973, v.14, №6, p.421-472.
4. Тултаев А.В., Тарасенко Ю.И., Попов В.И., Корсунский В.Н. Фармакокинетические и дозиметрические характеристики некоторых изотопов таллия. В сб. "Методы получения радионуклидов таллия и их применение в ядерной медицине", Москва, 1989, с.174-186.
5. Ruth T.J., Pate B.D., Robertson R., Porter J.K. Radionuclide Production for the Biosciences. *Nucl.Med. and Biolog.*, 1989, v.16, №4, p.325-336.
6. Дмитриев П.П., Молин Г.А., Дмитриева Э.П., Санарин М.В. Синтез  $\text{Tl-200}$ ,  $\text{Tl-201}$ ,  $\text{Tl-202}$ ,  $\text{Tl-204}$  при облучении ртути протонами и дейтронами. *Атомная энергия*, 1979, т.41, вып.6, с.431-433.
7. Дмитриев П.П. Получение  $^{201}\text{Tl}$  для ядерной медицины по реакции  $^{202}\text{Hg}(p,2n)^{201}\text{Tl}$ . В сб. Методы получения радионуклидов таллия и их применение в ядерной медицине. Москва, 1989, с.16-21.
8. Дмитриев П.П. Возможность получения  $^{123}\text{I}$  и  $^{201}\text{Tl}$  для ядерной медицины в реакциях  $^{123}\text{Te}(p,n)^{123}\text{I}$  и  $^{202}\text{Hg}(p,2n)^{201}\text{Tl}$ . *Атомная энергия*, 1988, т.64, вып.2, с.118-121.
9. Bittarati C., Bonardi M., Salomone A.  $\text{Tl-201}$  Production by  $^{203}\text{Tl}(p,3n)^{201}\text{Pb}$  and  $^{202}\text{Hg}(p,2n)$  Nuclear Reactions. in: *Abstr. 4 Int.Sym.Radiopharm., Chem.*, 1982, KFA, Julich, p.60-62.
10. Calboreanu A., Pencesu C., Salagean O. The effect of gamma de-excitation competition on the  $(\alpha,n)$  and  $(\alpha,2n)$  reactions on gold and antimony. *Nucl.Phys.*, 1982, v.A283, №2, p.251-263.
11. Bhardway R.D., Prasad R. Excitation Function for  $\text{Au-197}(\alpha,n)$  Reactions in the 10-40 MeV Energy Range. *Nucl.Instr.Meth.Phys. Res.*, 1986, v.A242, №2, p.286-290.
12. Lebowitz E., Greene M.W., Fairchild R., Bradley-Moore P.R., Atkins H.L., Ansari A.N., Richards P., Belgrave E. Thallium-201 for Medical Use. 1. *J.Nucl.Med.*, 1975, v.16, №12, p.151-155.
13. Blue J.W., Liu C.D., Smathers J.B. Thallium-201 Production with the Idle Beam from Neutron Therapy. *Med.Phys.*, 1978, v.5, №6, p.532-535.
14. Galm S.M., Weinreich R., Ollig H. Production of  $^{201}\text{Tl}$  and  $^{203}\text{Pb}$  via Proton Induced Nuclear Reactions on Natural Thallium. *Int.J.Appl.Rad.Isot.*, 1979, v.30, №7, p.86-88.

15. Lagunas-Solar M.C., Jungerman J.A., Peek N.F., Theus R. Thallium-201 Yields and Excitation Functions for the Lead Radioactivities Produced by Irradiation of Thallium with 15-60 MeV Protons. *Int.J.Appl.Rad.Isotop.*, 1978, v.29, №3, p.159-165.
16. Куренков Н.В., Маланин А.Б. Выходы таллия-201 по реакциям с протонами до энергии 100 МэВ в об. Методы получения радиоизотопов таллия и их применение в ядерной медицине. Москва, 1989, с.22-25.
17. Lagunas-Solar M.C., Jungerman J.A., Paulson D.W. Thallium-201 Yields and Excitation Functions for the Lead Radioactivities Produced by Irradiation of Thallium-205 with 34-60 MeV Protons. *Int.J.Appl.Rad.Isot.*, 1980, v.31, №3, p.117-121.
18. Kopecky J., Gruppelaar H. Systematics of Neutron induced isomeric cross-section Ratios at 14.5 MeV. Report EON-200, 1987.
19. Grudzevich O.T., Ignatyuk A.V., Kornilov N.V. Pashchenko A.B., Zelenetsky A.V., Zolotarev K.I. Evaluation of isomeric excitation functions in neutron induced reactions. Report IAEA CRP Meeting, Vienna, 1991.
20. Uhl V., Strohmaier B. STAPRE-code. Preprint IRK-76/01, 1976, Vienna.
21. Blann M. and Vonach H.K. Global test of modified precompound decay models. *Phys.Rev.* v.C28, 1983, p.1475-1492.
22. Table of Isotopes. Seventh edition. ed. by C.M. Lederer. Wiley Interscience, New York, 1978.
23. W. Dilg, W. Schantl, H. Vonach, M. Uhl. Level Density Parameters for the Back-Shifted Fermi Gas Model in the Mass Range 40 <math>A < 250</math>. *Nuclear Physics*, v.A217, 1973, p 269-298.
24. Michel R., Peiffer F., Stuck R. Measurement and hybrid model analysis of integral excitation functions for proton induced reactions on vanadium, manganese and cobalt up to 200 MeV. *Nuclear Physics*, 1985, v. A441, p.p. 617-639.
25. Lagunas-Solar M.C., Little F.E., Jungerman J.A. Proton Induced Reactions on Natural Pb Targets. A Potential New Cyclotron Method for  $^{201}\text{Tl}$  Production. *Int.J.Appl.Rad.Isot.*, 1981, v.32, №11, p.817.
26. Lagunas-Solar M.C., Little F.E., Waters S.L., Jungerman J.A. Cyclotron Production of Carrier-Free Thallium-201 via the  $\text{Pb-207}(p,n)$  Reaction. *J.Labelled Compd. Radiopharm.*, 1981, v. 12, № 1-2, p. 272-274.

27. Зайцева Н.Г., Новикова А.С., Кнотек О., Халкин В.А., Агеев В.А., Ключников А.А., Лынев А.Ф. Получение  $^{211}\text{Pb}$  из солнца, облученного протонами с энергией 65 МэВ. Препринт ОИЯИ, Р6-85-254, Дубна, 1985. Радиохимия, 1987, т.29, вып.2, с.247-254.
28. Зайцева Н.Г., Кнотек О., Ким Сен Хан, Микеш П., Халкин В.А., Конов В.А., Постышева Л.М. Определение выходов таллия-200, 201, 202 при облучении мишеней обогащенного свинца протонами с энергией 100 МэВ. Препринт ОИЯИ, Р-6-85-804, Дубна, 1985.
29. Bell R.E., Skarsgard H.M. Cross sections of  $(p, xn)$  reactions in the isotopes of lead and bismuth. Can.J.Phys., 1956, v.34, №3, p.745-766.
30. Zaitseva N.G., Deptula O., Knotek O., Kim Sen Khan et al. Cross Sections for the 100 MeV Proton-Induced Nuclear Reactions and Yields of some Radionuclides Used in Nuclear Medicine. Radiochimica Acta, 1991, v.54, №1, p.57-72.

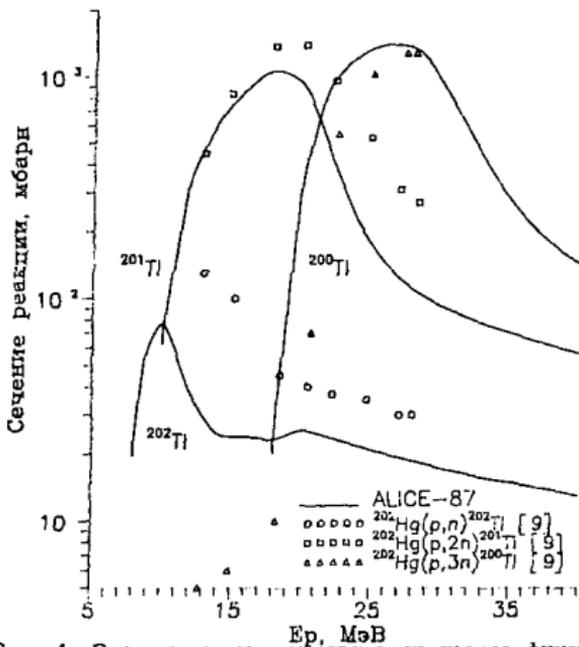


Рис. 1. Расчетные и экспериментальные функции возбуждения реакции  $^{202}\text{Hg}(p, x)$ .

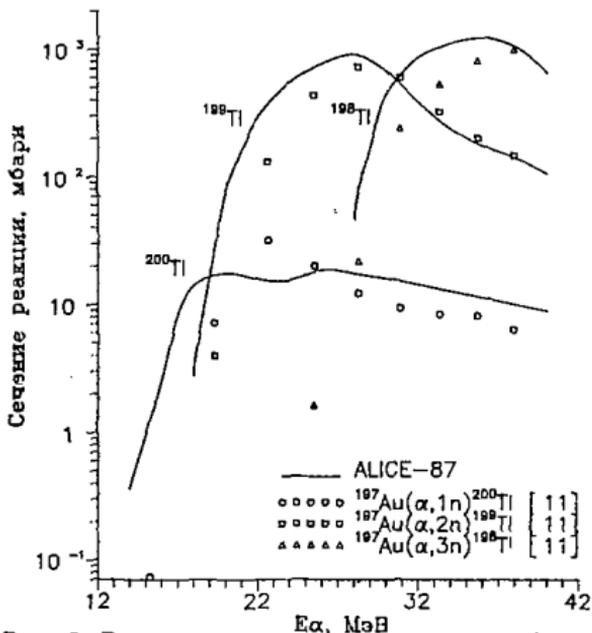


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные функции возбуждения реакции  $^{197}\text{Au}(\alpha, xn)$ .

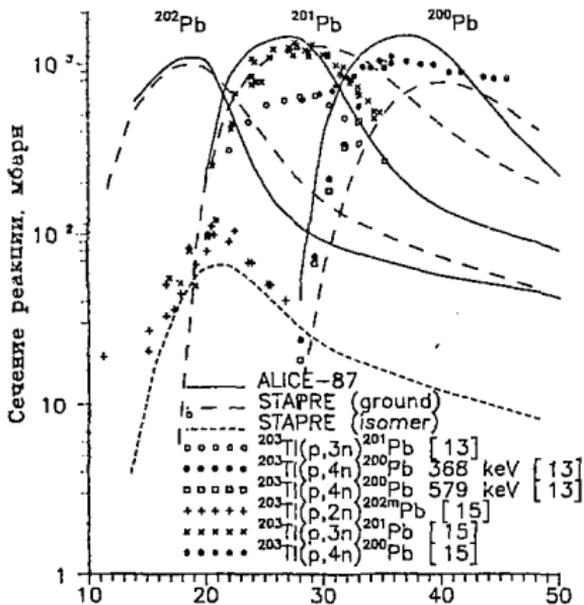


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные функции возбуждения реакции  $^{203}\text{Tl}(p, xn)$

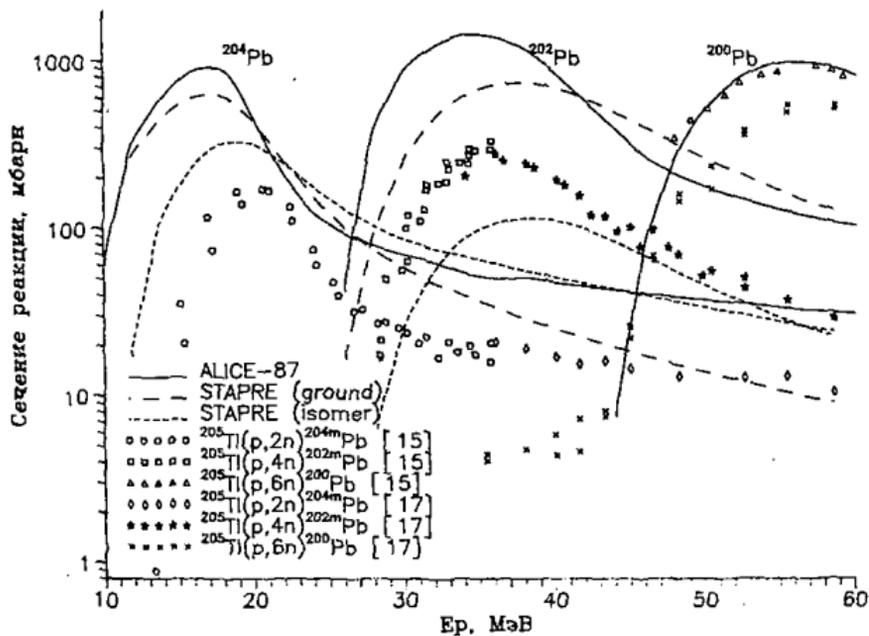


Рис. 4а. Функции возбуждения реакции  $^{205}\text{Tl}(p,xn)^{204,202,200}\text{Pb}$

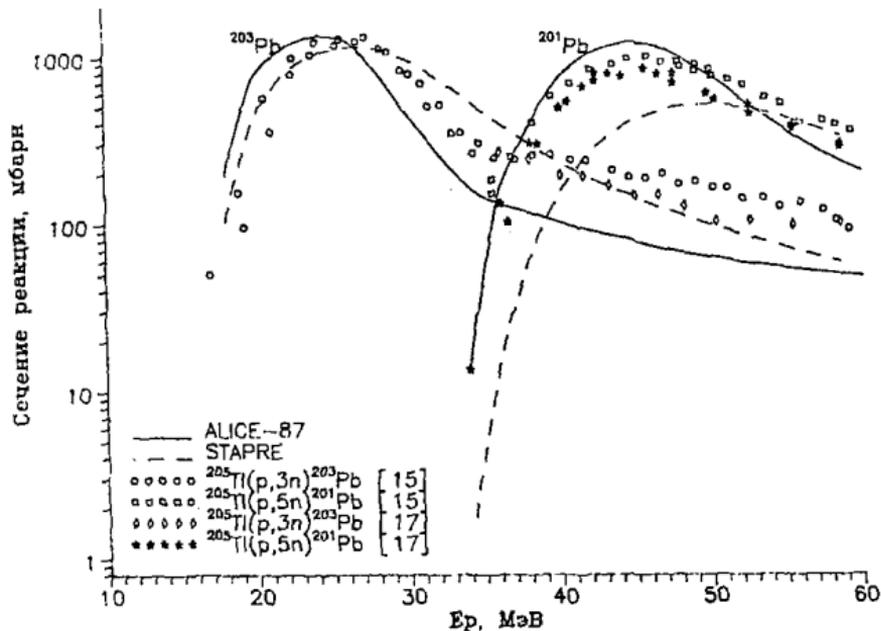


Рис. 46. Функции возбуждения реакции  $^{205}\text{Tl}(p,xn)$

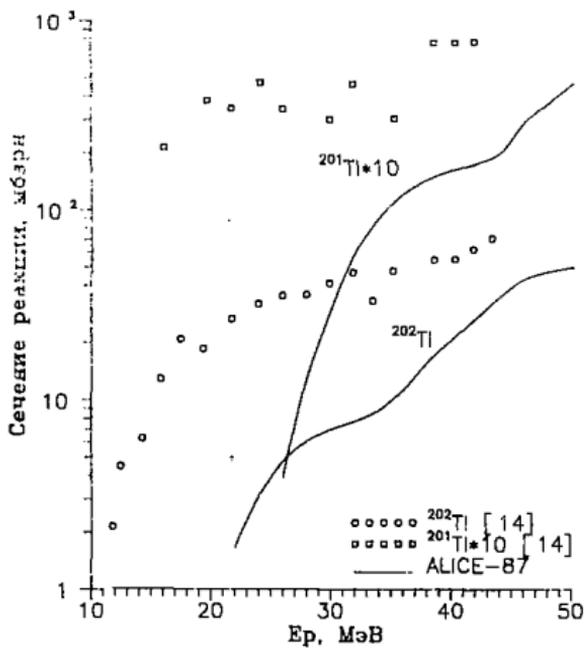


Рис. 5. Функции возбуждения реакции  $^{238}\text{U}(p,xn)$ .

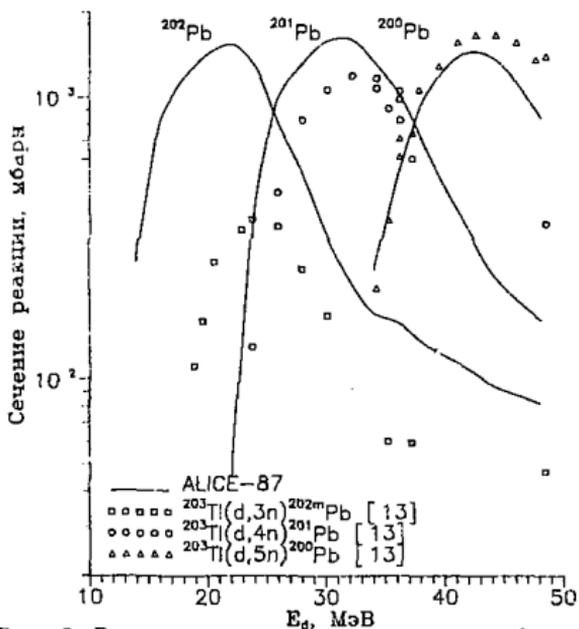


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные функции возбуждения реакции  $^{203}\text{Pb}(d,xn)$ .

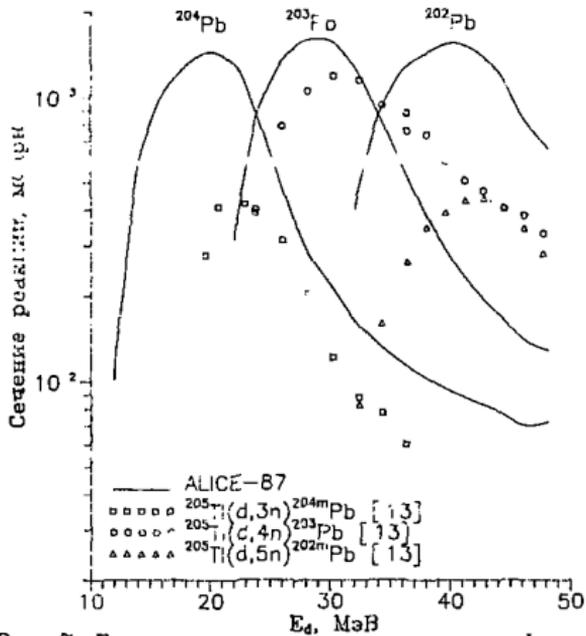


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные функции возбуждения реакции  $^{206}\text{Tl}(d,xn)$ .

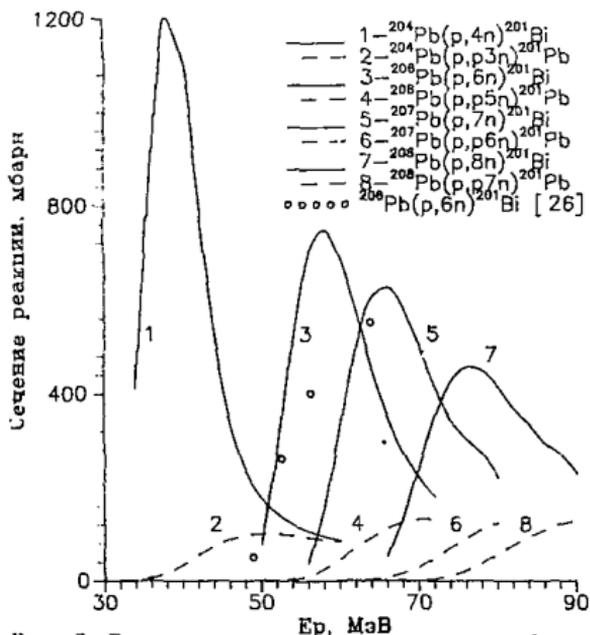


Рис. 8. Расчетные и экспериментальные функции возбуждения реакций  $(p,xn)$  и  $(p,pxn)$  на свинце

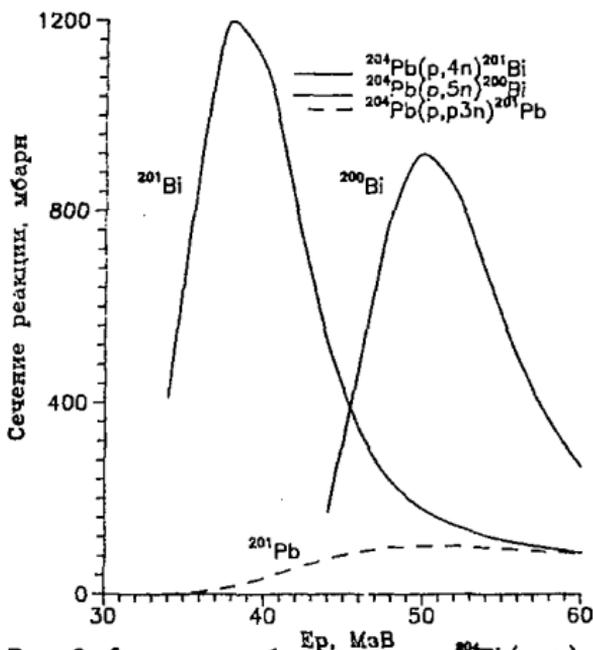


Рис. 9. Функции возбуждения для  $^{204}\text{Pb}(p,\alpha n)$  и  $^{204}\text{Pb}(p,p3n)$  реакций.

ПРИЛОЖЕНИЕ.

Экспериментальные и расчетные данные по функциям возбуждения реакций с образованием изотопа таллий-201 и сопутствующих нуклидов.

Энергия падающей частицы приведена в мегаэлектрон-вольтах, сечения реакций - в миллибарнах.

Таблица 1а.

Функции возбуждения реакции  $^{202}\text{Hg}(p, \pi)$ , рассчитанные по программе ALICE-87.

| $E_p, \text{MeV}$ | $^{202}\text{Tl}$ | $^{201}\text{Tl}$ | $^{200}\text{Tl}$ |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 9.0               | 6.05E+01          |                   |                   |
| 10.0              | 9.15E+01          | 5.75E+01          |                   |
| 11.0              | 7.34E+01          | 1.79E+02          |                   |
| 12.0              | 6.43E+01          | 3.20E+02          |                   |
| 14.0              | 7.05E+01          | 5.90E+02          |                   |
| 16.0              | 8.38E+01          | 8.27E+02          |                   |
| 18.0              | 9.17E+01          | 1.00E+03          |                   |
| 20.0              | 9.77E+01          | 8.87E+02          | 2.87E+02          |
| 22.0              | 9.84E+01          | 4.96E+02          | 7.98E+02          |
| 24.0              | 9.75E+01          | 3.00E+02          | 1.09E+03          |
| 26.0              | 9.67E+01          | 2.31E+02          | 7.24E+03          |
| 28.0              | 9.51E+01          | 1.99E+02          | 1.21E+03          |
| 30.0              | 9.28E+01          | 1.79E+02          | 8.90E+02          |
| 32.0              | 9.10E+01          | 1.65E+02          | 5.79E+02          |
| 34.0              | 9.00E+01          | 1.55E+02          | 3.98E+02          |
| 36.0              | 8.85E+01          | 1.47E+02          | 3.00E+02          |
| 38.0              | 8.64E+01          | 1.38E+02          | 2.44E+02          |
| 40.0              | 8.48E+01          | 1.31E+02          | 2.10E+02          |

Таблица 1б.

Экспериментальные функции возбуждения реакции  $^{202}\text{Hg}(p, \pi)$  (98,6 % обогащения) (91).

| $E_p, \text{MeV}$ | $^{202}\text{Tl}$ | $^{201}\text{Tl}$ | $^{200}\text{Tl}$ |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 12.8              |                   |                   | 5.00E+00          |
| 13.0              | 1.30E+02          | 4.50E+02          |                   |
| 14.8              |                   | 8.40E+02          |                   |
| 15.0              |                   |                   | 6.00E+00          |
| 15.2              | 1.00E+02          |                   |                   |
| 17.9              |                   | 1.38E+03          |                   |
| 18.2              |                   |                   | 1.00E+01          |
| 18.5              | 4.50E+01          |                   |                   |
| 20.1              |                   | 1.39E+03          |                   |
| 20.5              | 4.00E+01          |                   |                   |
| 20.7              |                   |                   | 7.00E+01          |
| 22.2              | 3.70E 01          |                   |                   |
| 22.3              |                   | 9.60E+02          |                   |
| 22.5              |                   |                   | 5.50E+02          |
| 24.7              | 3.50E 01          |                   |                   |
| 24.9              |                   | 5.30E+02          |                   |
| 25.0              |                   |                   | 1.03E+03          |
| 26.9              |                   |                   |                   |
| 27.1              | 3.00E 01          | 3.10E+02          |                   |
| 27.3              |                   |                   | 1.29E+03          |
| 28.0              | 3.00E 01          |                   | 1.29E+03          |
| 28.4              |                   | 2.70E+02          |                   |

9. Birratari G., Bonardi M., Salomone A. Tl-201 Production by  $^{203}\text{Tl}(p, \pi)^{201}\text{Tl}$  and  $^{202}\text{Hg}(p, \pi)^{201}\text{Tl}$  Nuclear Reactions. In: Abstr. 4 Int. Sym. Radiophys. Chem., 1982, IFA, Jülich, p.40-41.

Таблица 2а.

Функции возбуждения реакции  $^{197}\text{Au}(\alpha, \text{xn})$ , рассчитанные по программе ALICE-87.

| $E_{\alpha}$ , МэВ | $^{200}\text{Tl}$ | $^{199}\text{Tl}$ | $^{198}\text{Tl}$ |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 14.0               | 3.61E-01          |                   |                   |
| 16.0               | 2.52E+00          |                   |                   |
| 18.0               | 1.40E+01          | 2.76E+00          |                   |
| 20.0               | 1.76E+01          | 7.65E+01          |                   |
| 22.0               | 1.57E+01          | 2.86E+02          |                   |
| 24.0               | 1.53E+01          | 5.39E+02          |                   |
| 26.0               | 1.85E+01          | 7.55E+02          |                   |
| 28.0               | 1.72E+01          | 8.94E+02          | 4.55E+01          |
| 30.0               | 1.57E+01          | 6.57E+02          | 4.35E+02          |
| 32.0               | 1.41E+01          | 3.73E+02          | 8.47E+02          |
| 34.0               | 1.25E+01          | 2.31E+02          | 1.09E+03          |
| 36.0               | 1.11E+01          | 1.69E+02          | 1.19E+03          |
| 38.0               | 9.83E+00          | 1.36E+02          | 1.01E+03          |
| 40.0               | 8.72E+00          | 1.03E+02          | 6.28E+02          |

Таблица 2б.

Экспериментальные функции возбуждения реакции  $^{197}\text{Au}(\alpha, \text{xn})$ .

| $E_{\alpha}$ , МэВ | $^{200}\text{Tl}$ | $^{199}\text{Tl}$ | $^{198}\text{Tl}$ |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 15.3               | 7.30E-02          |                   |                   |
| 19.3               | 7.18E+00          | 3.97E+00          |                   |
| 22.6               | 3.16E+01          | 1.29E+02          |                   |
| 25.5               | 1.97E+01          | 4.26E+02          | 1.60E+00          |
| 28.3               | 1.21E+01          | 7.10E+02          | 2.15E+01          |
| 30.9               | 9.27E+00          | 5.86E+02          | 2.35E+02          |
| 33.3               | 8.25E+00          | 3.14E+02          | 5.18E+02          |
| 35.7               | 8.06E+00          | 1.96E+02          | 7.86E+02          |
| 37.9               | 6.24E+00          | 1.42E+02          | 9.55E+02          |

1). Bhardway H.D., Prasad R. Excitation Function for Au-197( $\alpha, \text{xn}$ ) Reactions in the 10-40 MeV Energy Range. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., 1986, v. A242, №. p.286-290.

Таблица 3а.

Функции возбуждения реакции  $^{203}\text{Tl}(p, \text{xp})$ , рассчитанные по программе ALICE-87.

| $E_p, \text{МэВ}$ | $^{202}\text{Pb}$ | $^{201}\text{Pb}$ | $^{200}\text{Pb}$ |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 14.0              | 6.03E+02          |                   |                   |
| 16.0              | 8.64E+02          |                   |                   |
| 18.0              | 1.07E+03          |                   |                   |
| 20.0              | 1.04E+03          | 1.99E+02          |                   |
| 22.0              | 5.42E+02          | 8.15E+02          |                   |
| 24.0              | 2.50E+02          | 1.21E+03          |                   |
| 26.0              | 1.48E+02          | 1.39E+03          |                   |
| 28.0              | 1.10E+02          | 1.39E+03          | 4.07E+01          |
| 30.0              | 9.11E+01          | 1.01E+03          | 3.82E+02          |
| 32.0              | 8.01E+01          | 5.94E+02          | 8.76E+02          |
| 34.0              | 7.24E+01          | 3.48E+02          | 1.23E+03          |
| 36.0              | 6.60E+01          | 2.27E+02          | 1.41E+03          |
| 38.0              | 6.05E+01          | 1.69E+02          | 1.40E+03          |
| 40.0              | 5.61E+01          | 1.38E+02          | 1.17E+03          |
| 42.0              | 5.28E+01          | 1.19E+02          | 8.42E+02          |
| 44.0              | 4.99E+01          | 1.01E+02          | 5.72E+02          |
| 46.0              | 4.73E+01          | 9.59E+01          | 3.90E+02          |
| 48.0              | 4.50E+01          | 8.79E+01          | 2.90E+02          |
| 50.0              | 4.13E+01          | 7.66E+01          | 2.15E+02          |
| 52.0              | 3.97E+01          | 7.35E+01          | 1.81E+02          |
| 54.0              | 3.81E+01          | 6.90E+01          | 1.58E+02          |
| 56.0              | 3.67E+01          | 6.56E+01          | 1.40E+02          |
| 58.0              | 3.55E+01          | 6.24E+01          | 1.27E+02          |
| 60.0              | 3.44E+01          | 5.97E+01          | 1.17E+02          |

Таблица 30.

Функции возбуждения основного и изомерного состояний свинца в реакции  $^{203}\text{Tl}(p, \text{xn})$ , рассчитанные по программе STARPE.

| $E, \text{МэВ}$ | $^{203}\text{Pb}$ | $^{202\text{m}}\text{Pb}$ | $^{201}\text{Pb}$ | $^{200}\text{Pb}$ |
|-----------------|-------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|
| 11.65           | 1.85E+02          | 1.26E-01                  |                   |                   |
| 13.63           | 4.85E+02          | 3.92E+00                  |                   |                   |
| 15.71           | 7.65E+02          | 1.69E+01                  |                   |                   |
| 17.74           | 9.65E+02          | 3.87E+01                  | 5.86E+00          |                   |
| 19.77           | 9.55E+02          | 6.10E+01                  | 1.63E+02          |                   |
| 21.81           | 7.13E+02          | 6.54E+01                  | 5.17E+02          |                   |
| 23.83           | 4.69E+02          | 5.30E+01                  | 8.55E+02          |                   |
| 25.86           | 3.02E+02          | 3.86E+01                  | 1.10E+03          | 3.11E-01          |
| 27.89           | 2.07E+02          | 2.65E+01                  | 1.22E+03          | 9.33E+00          |
| 29.92           | 1.53E+02          | 2.25E+01                  | 1.24E+03          | 5.57E+01          |
| 31.95           | 1.26E+02          | 1.90E+01                  | 1.16E+03          | 1.73E+02          |
| 33.98           | 1.07E+02          | 1.67E+01                  | 9.69E+02          | 3.75E+02          |
| 36.01           | 9.29E+01          | 1.48E+01                  | 7.47E+02          | 5.87E+02          |
| 38.04           | 8.03E+01          | 1.31E+01                  | 5.51E+02          | 7.23E+02          |
| 40.07           | 7.12E+01          | 1.19E+01                  | 4.19E+02          | 7.61E+02          |
| 42.10           | 6.39E+01          | 1.03E+01                  | 3.31E+02          | 7.11E+02          |
| 44.13           | 5.74E+01          | 9.77E+00                  | 2.70E+02          | 6.06E+02          |
| 46.16           | 5.15E+01          | 8.87E+00                  | 2.25E+02          | 4.94E+02          |
| 48.19           | 4.69E+01          | 8.09E+00                  | 1.93E+02          | 3.98E+02          |
| 50.22           | 4.27E+01          | 7.40E+00                  | 1.68E+02          | 3.23E+02          |
| 52.25           | 3.89E+01          | 6.78E+00                  | 1.48E+02          | 2.66E+02          |
| 54.28           | 3.55E+01          | 6.22E+00                  | 1.31E+02          | 2.23E+02          |
| 56.31           | 3.27E+01          | 5.72E+00                  | 1.17E+02          | 1.90E+02          |
| 58.34           | 3.01E+01          | 5.29E+00                  | 1.06E+02          | 1.64E+02          |
| 60.37           | 2.79E+01          | 4.89E+00                  | 9.58E+01          | 1.44E+02          |
| 62.41           | 2.57E+01          | 4.52E+00                  | 8.70E+01          | 1.27E+02          |
| 64.43           | 2.37E+01          | 4.18E+00                  | 7.93E+01          | 1.13E+02          |
| 66.46           | 2.20E+01          | 3.89E+00                  | 7.27E+01          | 1.02E+02          |
| 68.49           | 2.05E+01          | 3.62E+00                  | 6.69E+01          | 9.18E+01          |
| 70.52           | 1.91E+01          | 3.38E+00                  | 6.17E+01          | 8.34E+01          |

Таблица 3в.

Экспериментальные функции возбуждения реакции  $^{203}\text{Tl}(p,\alpha)$  (131).

| $E_p$ , МэВ | $^{201}\text{Pb}$ | $^{200}\text{Pb}$ |         |
|-------------|-------------------|-------------------|---------|
|             |                   | 368 keV           | 579 keV |
| 18.5        | 9.0E+00           |                   |         |
| 20.3        | 1.0E+02           |                   |         |
| 22.0        | 3.1E+02           |                   |         |
| 23.6        | 4.9E+02           |                   |         |
| 25.2        | 6.1E+02           |                   |         |
| 26.7        | 6.5E+02           |                   |         |
| 28.0        | 7.0E+02           | 2.3E+01           | 1.0E+01 |
| 29.3        | 7.0E+02           | 7.3E+01           | 6.7E+01 |
| 30.5        | 6.1E+02           | 2.1E+02           | 1.8E+02 |
| 31.8        | 4.7E+02           | 3.3E+02           | 3.2E+02 |
| 33.0        | 3.4E+02           | 5.5E+02           | 4.7E+02 |
| 35.2        | 2.6E+02           | 9.4E+02           | 1.0E+03 |

13. Blue J.W., Liu D.C., Smathers J.B. Thallium-201 Production with the Idle Beam from Neutron Therapy. Med.Phys., 1978, v.5, №6, p.532-535.

Таблица 3г.

Экспериментальные функции возбуждения основного и изомерного состояний изотопов свинца в реакции  $^{203}\text{Tl}(p,\text{xn})$  (15).

| $E_p, \text{МэВ}$ | $^{202}\text{Pb}$ | $^{201}\text{Pb}$ | $^{200}\text{Pb}$ |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 11.3              | 1.90E+01          |                   |                   |
| 15.2              | 2.00E+01          |                   |                   |
| 15.2              | 2.70E+01          |                   |                   |
| 15.5              | 3.30E+01          |                   |                   |
| 15.6              | 5.00E+01          |                   |                   |
| 17.0              |                   | 5.50E+01          |                   |
| 17.3              | 3.60E+01          |                   |                   |
| 17.9              | 4.50E+01          | 5.10E+01          |                   |
| 18.7              | 8.30E+01          | 7.90E+01          |                   |
| 19.1              |                   | 4.90E+01          |                   |
| 19.3              | 6.60E+01          |                   |                   |
| 20.2              | 7.90E+01          | 9.60E+01          |                   |
| 20.5              | 1.10E+02          | 2.50E+02          |                   |
| 20.7              | 9.90E+01          |                   |                   |
| 20.9              |                   | 1.20E+02          |                   |
| 22.1              | 8.90E+01          |                   |                   |
| 22.2              |                   | 4.10E+02          |                   |
| 22.2              |                   | 4.40E+02          |                   |
| 22.5              | 1.03E+02          | 6.60E+02          |                   |
| 23.7              | 6.70E+01          |                   |                   |
| 23.9              |                   | 7.40E+02          |                   |
| 23.9              |                   | 8.30E+02          |                   |
| 23.9              |                   | 1.05E+03          |                   |
| 24.0              | 6.70E+01          |                   |                   |
| 24.2              |                   | 1.01E+03          |                   |
| 24.3              |                   | 7.70E+02          |                   |
| 24.8              |                   | 7.70E+02          |                   |
| 25.3              | 5.00E+01          |                   |                   |
| 25.4              |                   | 1.06E+03          |                   |
| 25.5              | 5.00E+01          |                   |                   |
| 25.7              |                   | 1.20E+03          |                   |
| 26.8              | 4.00E+01          |                   |                   |
| 27.0              |                   | 1.22E+03          |                   |
| 27.1              |                   | 1.17E+03          |                   |
| 27.4              |                   | 1.11E+03          |                   |
| 27.5              |                   | 1.31E+03          |                   |
| 27.7              |                   | 1.28E+03          |                   |
| 28.2              |                   |                   | 6.10E+02          |
| 28.5              |                   | 1.19E+03          |                   |
| 28.7              |                   | 1.09E+03          |                   |
| 28.7              |                   | 1.16E+03          |                   |
| 29.0              |                   | 1.28E+03          |                   |
| 29.9              |                   | 1.12E+03          |                   |
| 29.7              |                   |                   | 6.50E+02          |
| 30.3              |                   | 1.13E+03          |                   |
| 30.3              |                   | 1.09E+03          |                   |
| 30.8              |                   |                   | 6.80E+02          |
| 31.1              |                   | 9.70E+02          | 7.40E+02          |
| 31.4              |                   | 8.60E+02          |                   |

Продолжение таблицы 3г.

| $E_p, \text{MeV}$ | $^{202}\text{Pb}$ | $^{201}\text{Pb}$ | $^{200}\text{Pb}$ |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 31.6              |                   | 8.40E+02          |                   |
| 31.7              |                   | 9.40E+02          |                   |
| 32.0              |                   |                   | 8.20E+02          |
| 32.2              |                   | 7.60E+02          |                   |
| 32.4              |                   | 7.90E+02          |                   |
| 32.7              |                   |                   | 8.40E+02          |
| 32.9              |                   | 6.70E+02          |                   |
| 32.9              |                   | 7.20E+02          |                   |
| 33.0              |                   | 6.40E+02          |                   |
| 33.3              |                   |                   | 9.30E+02          |
| 33.8              |                   | 5.90E+02          |                   |
| 34.1              |                   |                   | 9.30E+02          |
| 34.3              |                   | 4.70E+02          |                   |
| 34.3              |                   | 5.10E+02          |                   |
| 34.8              |                   | 5.10E+02          |                   |
| 35.7              |                   |                   | 1.02E+03          |
| 35.7              |                   |                   | 1.02E+03          |
| 37.0              |                   |                   | 9.90E+02          |
| 37.0              |                   |                   | 1.01E+03          |
| 38.2              |                   |                   | 9.70E+02          |
| 39.3              |                   |                   | 9.60E+02          |
| 40.6              |                   |                   | 8.60E+02          |
| 41.7              |                   |                   | 8.70E+02          |
| 43.6              |                   |                   | 8.10E+02          |
| 44.4              |                   |                   | 7.90E+02          |
| 45.5              |                   |                   | 7.90E+02          |

15. Lagunas-Solar M.S., Jungeman J.A., Peek N.P. and Theus R.M.. Thallium-201 Yields and Excitation Functions for Lead Radioactivities Produced by Irradiation of Natural Thallium with 15-60 MeV Protons. Int.J. Appl.Rad. Isot., 1978, v.29, №3, p.159-165.

Таблица 4а.

Функции возбуждения реакции  $^{205}\text{Tl}(p, \text{xn})$ , рассчитанные по программе АЛГО-97.

| E <sub>p</sub> , МэВ | $^{204}\text{Pb}$ | $^{203}\text{Pb}$ | $^{202}\text{Pb}$ | $^{201}\text{Pb}$ | $^{200}\text{Pb}$ |
|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 9.0                  | 4.00E-03          |                   |                   |                   |                   |
| 10.0                 | 5.50E+01          |                   |                   |                   |                   |
| 12.0                 | 3.31E+02          |                   |                   |                   |                   |
| 14.0                 | 6.23E+02          |                   |                   |                   |                   |
| 16.0                 | 8.79E+02          |                   |                   |                   |                   |
| 18.0                 | 8.05E+02          | 1.99E+02          |                   |                   |                   |
| 20.0                 | 4.53E+02          | 7.95E+02          |                   |                   |                   |
| 22.0                 | 2.06E+02          | 1.17E+03          |                   |                   |                   |
| 24.0                 | 1.25E+02          | 1.35E+03          |                   |                   |                   |
| 26.0                 | 9.39E+01          | 1.26E+03          | 4.31E+01          |                   |                   |
| 28.0                 | 7.90E+01          | 8.20E+02          | 4.00E+02          |                   |                   |
| 30.0                 | 6.94E+01          | 4.54E+02          | 8.98E+02          |                   |                   |
| 32.0                 | 6.20E+01          | 2.69E+02          | 1.24E+03          |                   |                   |
| 34.0                 | 5.42E+01          | 1.60E+02          | 1.45E+03          | 1.40E+01          |                   |
| 36.0                 | 5.07E+01          | 1.34E+02          | 1.39E+03          | 1.62E+02          |                   |
| 38.0                 | 5.59E+01          | 1.19E+02          | 1.18E+03          | 4.01E+02          |                   |
| 40.0                 | 4.70E+01          | 1.04E+02          | 8.39E+02          | 7.73E+02          |                   |
| 42.0                 | 4.52E+01          | 9.31E+01          | 5.70E+02          | 1.07E+03          | 7.08E-02          |
| 44.0                 | 4.29E+01          | 8.47E+01          | 3.94E+02          | 1.23E+03          | 7.64E+00          |
| 46.0                 | 4.03E+01          | 7.50E+01          | 2.67E+02          | 1.22E+03          | 8.52E+01          |
| 48.0                 | 3.92E+01          | 6.90E+01          | 2.12E+02          | 1.02E+03          | 2.76E+02          |
| 50.0                 | 3.76E+01          | 6.46E+01          | 1.78E+02          | 7.88E+02          | 5.37E+02          |
| 52.0                 | 3.61E+01          | 6.08E+01          | 1.55E+02          | 5.82E+02          | 7.86E+02          |
| 54.0                 | 3.47E+01          | 5.76E+01          | 1.38E+02          | 4.30E+02          | 9.61E+02          |
| 56.0                 | 3.34E+01          | 5.48E+01          | 1.25E+02          | 3.28E+02          | 1.02E+03          |
| 58.0                 | 3.24E+01          | 5.26E+01          | 1.14E+02          | 2.62E+02          | 9.71E+02          |
| 60.0                 | 3.14E+01          | 5.05E+01          | 1.06E+02          | 2.17E+02          | 8.42E+02          |

Таблица 4б.

Функции возбуждения основного состояния изотопов свинца в реакции  $^{205}\text{Tl}(\text{p}, \text{xn})$ , рассчитанные по программе STARPE

| $E, \text{МэВ}$ | $^{204}\text{Pb}$ | $^{203}\text{Pb}$ | $^{202}\text{Pb}$ | $^{201}\text{Pb}$ |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 11.87           | 2.67E+02          |                   |                   |                   |
| 13.90           | 4.55E+02          |                   |                   |                   |
| 15.93           | 6.08E+02          |                   |                   |                   |
| 17.96           | 6.19E+02          | 1.06E+02          |                   |                   |
| 19.99           | 4.33E+02          | 4.57E+02          |                   |                   |
| 22.01           | 2.53E+02          | 8.19E+02          |                   |                   |
| 24.04           | 1.52E+02          | 1.05E+03          | 5.00E-01          |                   |
| 26.07           | 1.00E+02          | 1.17E+03          | 1.69E+01          |                   |
| 28.10           | 7.30E+01          | 1.13E+03          | 1.02E+02          |                   |
| 30.13           | 5.69E+01          | 9.56E+02          | 2.75E+02          |                   |
| 32.16           | 4.64E+01          | 7.35E+02          | 4.76E+02          | 2.32E-02          |
| 34.19           | 3.90E+01          | 5.40E+02          | 6.44E+02          | 1.79E+00          |
| 36.22           | 3.32E+01          | 3.94E+02          | 7.37E+02          | 1.87E+01          |
| 38.25           | 2.84E+01          | 2.95E+02          | 7.42E+02          | 7.46E+01          |
| 40.28           | 2.47E+01          | 2.30E+02          | 6.81E+02          | 1.74E+02          |
| 42.31           | 2.17E+01          | 1.87E+02          | 5.84E+02          | 2.93E+02          |
| 44.34           | 1.92E+01          | 1.55E+02          | 4.78E+02          | 4.01E+02          |
| 46.37           | 1.70E+01          | 1.31E+02          | 3.85E+02          | 4.80E+02          |
| 48.40           | 1.52E+01          | 1.13E+02          | 3.11E+02          | 5.25E+02          |
| 50.43           | 1.36E+01          | 9.84E+01          | 2.54E+02          | 5.33E+02          |
| 52.46           | 1.22E+01          | 8.65E+01          | 2.11E+02          | 5.07E+02          |
| 54.49           | 1.11E+01          | 7.66E+01          | 1.77E+02          | 4.60E+02          |
| 56.52           | 1.00E+01          | 6.85E+01          | 1.51E+02          | 4.05E+02          |
| 58.55           | 9.16E+00          | 6.16E+01          | 1.31E+02          | 3.50E+02          |
| 60.58           | 8.37E+00          | 5.56E+01          | 1.15E+02          | 2.99E+02          |
| 62.61           | 7.66E+00          | 5.03E+01          | 1.01E+02          | 2.56E+02          |
| 64.64           | 7.03E+00          | 4.57E+01          | 8.97E+01          | 2.19E+02          |
| 66.67           | 6.48E+00          | 4.17E+01          | 8.03E+01          | 1.90E+02          |
| 68.70           | 5.99E+00          | 3.83E+01          | 7.25E+01          | 1.66E+02          |
| 70.73           | 5.55E+00          | 3.52E+01          | 6.57E+01          | 1.46E+02          |

Таблица 4в.  
 функции возбуждения изомеров септета в реакции  $^{205}\text{Tl}(p, \text{nl})$ ,  
 рассчитанные по программе STAPRE.

| $E_p$ , МэВ | $204\text{mpb}$ | $202\text{mpb}$ |
|-------------|-----------------|-----------------|
| 11.87       | 1.74E+01        |                 |
| 13.90       | 1.18E+02        |                 |
| 15.93       | 2.34E+02        |                 |
| 17.96       | 3.26E+02        |                 |
| 19.99       | 3.19E+02        |                 |
| 22.01       | 2.42E+02        |                 |
| 24.04       | 1.74E+02        |                 |
| 26.07       | 1.30E+02        | 2.27E-01        |
| 28.10       | 1.02E+02        | 6.34E+00        |
| 30.13       | 8.54E+01        | 2.82E+01        |
| 32.16       | 7.51E+01        | 6.02E+01        |
| 34.19       | 6.76E+01        | 9.01E+01        |
| 36.22       | 6.10E+01        | 1.10E+02        |
| 38.25       | 5.52E+01        | 1.16E+02        |
| 40.28       | 5.06E+01        | 1.10E+02        |
| 42.31       | 4.65E+01        | 9.70E+01        |
| 44.34       | 4.27E+01        | 8.07E+01        |
| 46.37       | 3.92E+01        | 6.57E+01        |
| 48.40       | 3.62E+01        | 5.34E+01        |
| 50.43       | 3.34E+01        | 4.39E+01        |
| 52.46       | 3.09E+01        | 3.65E+01        |
| 54.49       | 2.85E+01        | 3.08E+01        |
| 56.52       | 2.65E+01        | 2.64E+01        |
| 58.55       | 2.47E+01        | 2.30E+01        |
| 60.58       | 2.30E+01        | 2.01E+01        |
| 62.61       | 2.14E+01        | 1.78E+01        |
| 64.64       | 1.99E+01        | 1.58E+01        |
| 66.67       | 1.86E+01        | 1.42E+01        |
| 68.70       | 1.74E+01        | 1.28E+01        |
| 70.73       | 1.63E+01        | 1.16E+01        |

Таблица 4с.

Экспериментальные функции возбуждения основного и изомерного состояний изотопов свинца в реакции  $^{205}\text{Tl}(p, \text{nl})$  (15).

| $E_p, \text{MeV}$ | $^{204\text{m}}\text{Pb}$ | $^{203}\text{Pb}$ | $^{202\text{m}}\text{Pb}$ | $^{201}\text{Pb}$ | $^{200}\text{Pb}$ |
|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|
| 13.3              | 8.90E-01                  |                   |                           |                   |                   |
| 15.1              | 3.50E+01                  |                   |                           |                   |                   |
| 15.4              | 2.10E+01                  |                   |                           |                   |                   |
| 15.9              | 1.15E+02                  | 5.10E+01          |                           |                   |                   |
| 17.3              | 7.40E+01                  |                   |                           |                   |                   |
| 18.9              | 1.70E+02                  | 1.56E+02          |                           |                   |                   |
| 19.2              | 1.40E+02                  | 9.70E+01          |                           |                   |                   |
| 20.6              | 1.70E+02                  | 5.70E+02          |                           |                   |                   |
| 21.0              | 1.70E+02                  | 3.60E+02          |                           |                   |                   |
| 22.4              | 1.30E+02                  | 8.00E+02          |                           |                   |                   |
| 22.5              | 1.11E+02                  | 1.00E+03          |                           |                   |                   |
| 23.7              |                           | 1.04E+03          |                           |                   |                   |
| 24.0              | 7.50E+01                  | 1.24E+03          |                           |                   |                   |
| 24.1              | 6.00E+01                  |                   |                           |                   |                   |
| 25.3              | 4.80E+01                  | 1.19E+03          |                           |                   |                   |
| 25.6              | 4.00E+01                  | 1.30E+03          |                           |                   |                   |
| 26.7              | 3.20E+01                  | 1.25E+03          |                           |                   |                   |
| 27.2              | 3.30E+01                  | 1.32E+03          |                           |                   |                   |
| 28.2              | 2.70E+01                  | 1.14E+03          |                           |                   |                   |
| 28.3              |                           |                   | 1.75E+01                  |                   |                   |
| 28.4              |                           |                   | 2.20E+01                  |                   |                   |
| 28.7              | 2.80E+01                  | 1.10E+03          | 5.00E+01                  |                   |                   |
| 29.6              | 2.60E+01                  | 8.40E+02          |                           |                   |                   |
| 29.8              |                           |                   | 5.60E+01                  |                   |                   |
| 30.1              | 2.40E+01                  | 8.00E+02          | 1.01E+02                  |                   |                   |
| 30.1              |                           |                   | 6.40E+01                  |                   |                   |
| 30.2              |                           |                   | 1.20E+02                  |                   |                   |
| 30.9              | 2.10E+01                  | 7.00E+02          |                           |                   |                   |
| 31.0              |                           |                   | 1.11E+02                  |                   |                   |
| 31.3              |                           |                   | 1.30E+02                  |                   |                   |
| 31.4              | 2.30E+01                  | 5.10E+02          | 1.71E+02                  |                   |                   |
| 31.4              |                           |                   | 1.83E+02                  |                   |                   |
| 32.2              | 1.70E+01                  | 5.30E+02          | 1.87E+02                  |                   |                   |
| 32.7              |                           |                   | 1.91E+02                  |                   |                   |
| 32.8              |                           |                   | 2.50E+02                  |                   |                   |
| 32.9              | 2.10E+01                  | 3.50E+02          | 2.30E+02                  |                   |                   |
| 33.5              | 1.80E+01                  | 3.60E+02          |                           |                   |                   |
| 33.7              |                           |                   | 2.50E+02                  |                   |                   |
| 34.2              |                           |                   | 2.50E+02                  |                   |                   |
| 34.3              | 2.00E+01                  | 2.70E+02          | 2.80E+02                  |                   |                   |
| 34.3              |                           |                   | 3.00E+02                  |                   |                   |
| 34.7              | 1.77E+01                  | 3.10E+02          |                           |                   |                   |
| 34.7              |                           |                   | 2.90E+02                  |                   |                   |
| 35.7              | 1.60E+01                  |                   |                           |                   |                   |
| 35.5              |                           |                   |                           | 1.88E+02          |                   |
| 35.5              |                           |                   |                           | 1.55E+02          |                   |
| 35.7              | 2.10E+01                  | 2.50E+02          | 3.00E+02                  |                   |                   |
| 35.7              |                           |                   | 3.30E+02                  |                   |                   |
| 36.9              |                           |                   |                           | 2.60E+02          |                   |

Продолжение таблицы 4Г.

| $E_p, \text{MeV}$ | $^{204}\text{Pb}$ | $^{203}\text{Pb}$ | $^{202}\text{Pb}$ | $^{201}\text{Pb}$ | $^{200}\text{Pb}$ |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 37.1              |                   | 2.50E+02          |                   |                   |                   |
| 38.2              |                   |                   |                   | 4.10E+02          |                   |
| 39.3              |                   | 2.70E+02          |                   |                   |                   |
| 39.5              |                   | 2.70E+02          |                   | 6.00E+02          |                   |
| 40.7              |                   | 2.50E+02          |                   | 7.10E+02          |                   |
| 41.0              |                   | 2.40E+02          |                   |                   |                   |
| 42.1              |                   |                   |                   | 8.60E+02          |                   |
| 43.0              |                   | 2.20E+02          |                   |                   |                   |
| 43.6              |                   |                   |                   | 9.50E+02          |                   |
| 44.0              |                   | 1.64E+02          |                   | 9.90E+02          |                   |
| 45.7              |                   | 1.94E+02          |                   |                   |                   |
| 45.9              |                   |                   |                   | 1.04E+03          |                   |
| 46.8              |                   | 2.10E+02          |                   | 9.60E+02          |                   |
| 47.9              |                   | 1.77E+02          |                   | 9.60E+02          | 3.50E+02          |
| 48.0              |                   |                   |                   | 9.00E+02          |                   |
| 49.0              |                   | 1.85E+02          |                   | 9.50E+02          | 4.50E+02          |
| 49.1              |                   |                   |                   | 9.30E+02          |                   |
| 50.0              |                   | 1.63E+02          |                   | 8.70E+02          | 5.30E+02          |
| 51.1              |                   | 1.66E+02          |                   | 7.80E+02          |                   |
| 51.2              |                   |                   |                   | 7.50E+02          | 6.40E+02          |
| 52.1              |                   | 1.47E+02          |                   |                   |                   |
| 52.2              |                   |                   |                   | 7.10E+02          | 7.60E+02          |
| 53.5              |                   | 1.47E+02          |                   |                   |                   |
| 53.7              |                   |                   |                   | 5.90E+02          | 8.50E+02          |
| 54.6              |                   | 1.31E+02          |                   |                   |                   |
| 54.7              |                   |                   |                   | 5.50E+02          | 8.90E+02          |
| 55.9              |                   | 1.39E+02          |                   | 4.20E+02          |                   |
| 57.3              |                   |                   |                   |                   | 9.70E+02          |
| 57.4              |                   | 1.26E+02          |                   | 4.30E+02          |                   |
| 58.3              |                   | 1.10E+02          |                   | 4.10E+02          |                   |
| 59.3              |                   |                   |                   |                   | 9.20E+02          |
| 59.4              |                   | 9.70E+01          |                   |                   | 8.40E+02          |
| 59.3              |                   |                   |                   | 3.80E+02          |                   |

15. Lagunas-Solar M.C., Jungertan J.A., Peck H.P. and Theus R.M.. Thallium-201 Yields and Excitation Functions for Lead Radioactivities Produced by Irradiation of Natural Thallium with 15-60 MeV Protons. Int.J. Appl. Rad. Isot., 1978, v.29, №3, p.159-165.

Таблица 4д.

Экспериментальные функции реакции  $^{205}\text{Tl}(p, \text{xn})$  [17].

| $E_p$ , МэВ | $^{204}\text{Pb}$ | $^{203}\text{Pb}$ | $^{202}\text{Pb}$ | $^{201}\text{Pb}$ | $^{200}\text{Pb}$ |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 34.0        |                   |                   | 2.10E+02          | 1.49E+01          |                   |
| 35.4        |                   |                   |                   |                   | 4.5CF+00          |
| 36.0        | 2.10E+01          | 2.70E+02          | 2.80E+02          | 1.40E+02          | 4.10E+00          |
| 36.6        |                   |                   | 2.60E+02          | 1.40E+02          |                   |
| 38.0        | 1.90E+01          | 2.50E+02          | 2.50E+02          | 3.20E+02          | 4.80E+00          |
| 38.5        |                   |                   | 2.30E+02          | 3.10E+02          |                   |
| 40.0        | 1.70E+01          | 2.00E+02          | 2.00E+02          | 5.00E+02          | 4.40E+00          |
| 40.0        |                   |                   |                   |                   | 5.90E+00          |
| 40.6        |                   |                   | 1.80E+02          | 5.50E+02          |                   |
| 41.6        | 1.60E+01          | 2.00E+02          | 1.60E+02          | 6.80E+02          | 4.60E+00          |
| 41.6        |                   |                   |                   |                   | 7.30E+00          |
| 42.3        |                   |                   | 1.20E+02          | 7.40E+02          |                   |
| 42.3        |                   |                   |                   | 8.20E+02          |                   |
| 43.3        | 1.60E+01          | 1.70E+02          | 1.20E+02          | 8.10E+02          | 8.20E+00          |
| 43.3        |                   |                   |                   |                   | 7.60E+00          |
| 44.1        |                   |                   | 9.70E+01          | 7.90E+02          |                   |
| 45.0        | 1.50E+01          | 1.50E+02          | 1.00E+02          |                   | 2.60E+01          |
| 45.0        |                   |                   |                   |                   | 2.30E+01          |
| 45.6        |                   |                   | 7.80E+01          | 8.70E+02          |                   |
| 46.5        |                   | 1.50E+02          | 9.90E+01          | 5.10E+02          | 6.60E+01          |
| 46.5        |                   |                   |                   |                   | 7.00E+01          |
| 47.5        |                   |                   | 7.80E+01          | 8.10E+02          |                   |
| 47.5        |                   |                   |                   | 7.20E+02          |                   |
| 48.2        | 1.30E+01          | 1.30E+02          | 7.10E+01          |                   | 1.60E+02          |
| 48.2        |                   |                   |                   |                   | 1.50E+02          |
| 49.7        |                   |                   | 5.30E+01          | 6.30E+02          |                   |
| 50.3        |                   | 1.10E+02          | 5.70E+01          | 5.70E+02          | 1.80E+02          |
| 51.3        |                   |                   |                   |                   | 2.40E+02          |
| 52.6        | 1.30E+01          | 1.10E+02          | 4.50E+01          | 5.40E+02          | 3.70E+02          |
| 52.6        |                   |                   | 5.10E+01          | 4.80E+02          | 3.90E+02          |
| 55.4        | 1.30E+01          | 1.00E+02          | 3.80E+01          | 4.70E+02          | 3.70E+02          |
| 55.4        |                   |                   |                   | 3.90E+02          | 5.60E+02          |
| 58.6        | 1.10E+01          | 1.10E+02          | 3.00E+01          | 3.20E+02          | 5.40E+02          |
| 58.6        |                   |                   |                   | 3.00E+02          | 5.70E+02          |

17. Legunas-Solar H.C., Jungerman J.A., Paulson D.W.. Thallium-201 Yields and Excitation Functions for the Lead Radioactivities Produced by Irradiation of Thallium-205 with 34-60 MeV Protons. Int. J. Appl. Rad. Isot., 1980, v.31, №3, p.117-121.

Таблица 5а.

Функции возбуждения реакций  $^{203}\text{Tl}(p, \text{pxn})^{202,201}\text{Tl}$  и  $^{205}\text{Tl}(p, \text{pxn})^{202,201}\text{Tl}$ , рассчитанные по программе ALICE-87.

| $E_p, \text{MeV}$ | $^{203}\text{Tl}(p, \text{pxn})$ |                   | $^{205}\text{Tl}(p, \text{pxn})$ |                   |
|-------------------|----------------------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------|
|                   | $^{202}\text{Tl}$                | $^{201}\text{Tl}$ | $^{202}\text{Tl}$                | $^{201}\text{Tl}$ |
| 14.0              | 1.37E-02                         |                   |                                  |                   |
| 16.0              | 1.05E-01                         |                   |                                  |                   |
| 18.0              | 5.09E-01                         |                   |                                  |                   |
| 20.0              | 2.22E+00                         |                   |                                  |                   |
| 22.0              | 5.61E+00                         | 7.38E-03          |                                  |                   |
| 24.0              | 1.05E+01                         | 2.07E-01          |                                  |                   |
| 26.0              | 1.59E+01                         | 1.31E+00          |                                  |                   |
| 28.0              | 2.05E+01                         | 4.43E+00          |                                  |                   |
| 30.0              | 2.36E+01                         | 1.01E+01          | 1.19E-02                         |                   |
| 32.0              | 2.55E+01                         | 2.02E+01          | 2.21E-01                         |                   |
| 34.0              | 2.62E+01                         | 3.07E+01          | 1.49E+00                         |                   |
| 36.0              | 2.61E+01                         | 4.06E+01          | 5.03E+00                         | 4.21E-04          |
| 38.0              | 2.55E+01                         | 4.81E+01          | 1.16E+01                         | 2.51E-02          |
| 40.0              | 2.51E+01                         | 5.31E+01          | 1.86E+01                         | 1.80E-01          |
| 42.0              | 2.47E+01                         | 5.61E+01          | 2.73E+01                         | 8.44E-01          |
| 44.0              | 2.42E+01                         | 5.76E+01          | 3.87E+01                         | 3.47E+00          |
| 46.0              | 2.22E+01                         | 5.95E+01          | 5.10E+01                         | 1.50E+01          |
| 48.0              | 2.20E+01                         | 5.77E+01          | 5.69E+01                         | 2.66E+01          |
| 50.0              | 2.15E+01                         | 5.60E+01          | 6.04E+01                         | 4.06E+01          |
| 52.0              | 2.11E+01                         | 5.42E+01          | 6.19E+01                         | 5.51E+01          |
| 54.0              | 2.06E+01                         | 5.24E+01          | 6.21E+01                         | 6.84E+01          |
| 56.0              | 2.02E+01                         | 5.07E+01          | 6.11E+01                         | 7.89E+01          |
| 58.0              | 1.99E+01                         | 4.96E+01          | 5.96E+01                         | 8.64E+01          |
| 60.0              | 1.96E+01                         | 4.80E+01          | 6.01E+01                         | 8.97E+01          |

Экспериментальные функции возбуждения реакции  $^{202}\text{Tl}(p, \text{pxn})$   
 $^{202}\text{Tl}$  [14].

Таблица 50.

| $E_p, \text{МэВ}$ | $^{202}\text{Tl}$ | $^{201}\text{Tl}$ |
|-------------------|-------------------|-------------------|
| 11.8              | 2.10E+01          |                   |
| 12.4              | 4.40E+01          |                   |
| 14.3              | 6.20E+01          |                   |
| 15.8              | 1.30E+01          |                   |
| 16.1              |                   | 2.10E+01          |
| 17.4              | 2.10E+01          |                   |
| 19.3              | 1.80E+01          |                   |
| 19.7              |                   | 3.70E+01          |
| 21.7              |                   | 3.40E+01          |
| 21.7              | 2.60E+01          |                   |
| 23.9              | 3.20E+01          |                   |
| 24.1              |                   | 4.60E+01          |
| 25.9              | 3.50E+01          |                   |
| 26.0              |                   | 3.40E+01          |
| 27.9              | 3.50E+01          |                   |
| 29.8              | 4.10E+01          |                   |
| 29.9              |                   | 2.90E+01          |
| 31.7              | 4.60E+01          |                   |
| 31.7              |                   | 4.50E+01          |
| 33.4              | 3.30E+01          |                   |
| 35.0              | 4.70E+01          |                   |
| 35.2              |                   | 3.00E+01          |
| 38.5              | 5.40E+01          |                   |
| 38.5              |                   | 7.40E+01          |
| 40.2              | 5.40E+01          |                   |
| 40.3              |                   | 7.40E+01          |
| 41.7              | 6.10E+01          |                   |
| 41.9              |                   | 7.50E+01          |
| 43.3              | 6.90E+01          |                   |

14. Gaim S.M., Weinreich R. and Ollig H.. Production of  $^{201}\text{Tl}$  and  $^{203}\text{Pb}$  via Proton Induced Nuclear Reactions on Natural Thallium., Int.J.Appl.Rad.Isot., 1979, v.30, №2, p.85-95.

Таблица 6а.

Функции возбуждения реакции  $^{203}\text{Tl}(d, xn)$ , рассчитанные по программе ALICE-87.

| $E_d, \text{МэВ}$ | $^{202}\text{Pb}$ | $^{201}\text{Pb}$ | $^{200}\text{Pb}$ |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 14.0              | 2.59E+02          |                   |                   |
| 16.0              | 8.22E+02          |                   |                   |
| 18.2              | 1.17E+03          |                   |                   |
| 20.4              | 1.42E+03          |                   |                   |
| 22.6              | 1.52E+03          | 4.50E+01          |                   |
| 24.8              | 1.27E+03          | 4.32E+02          |                   |
| 27.0              | 7.83E+02          | 9.99E+02          |                   |
| 29.2              | 5.22E+02          | 1.32E+03          |                   |
| 31.4              | 3.19E+02          | 1.57E+03          | 1.61E-01          |
| 33.6              | 2.20E+02          | 1.59E+03          | 3.14E+01          |
| 35.8              | 1.69E+02          | 1.31E+03          | 2.42E+02          |
| 38.0              | 1.27E+02          | 1.03E+03          | 5.24E+02          |
| 40.2              | 1.34E+02          | 6.86E+02          | 5.43E+02          |
| 42.4              | 1.19E+02          | 4.60E+02          | 1.26E+03          |
| 44.6              | 1.07E+02          | 3.25E+02          | 1.43E+03          |
| 46.8              | 9.40E+01          | 2.31E+02          | 1.35E+03          |
| 49.0              | 8.71E+01          | 1.89E+02          | 1.10E+03          |
| 51.2              | 8.14E+01          | 1.60E+02          | 8.25E+02          |

Таблица 66.  
 Экспериментальные функции возбуждения реакции  $^{203}\text{Tl}(d, \text{xn}) (^{131}\text{I})$ .

| $E_d, \text{МэВ}$ | $^{203}\text{Tl}$ | $^{201}\text{Pb}$ | $^{200}\text{Pb}$ |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 15.0              | 1.10E+02          |                   |                   |
| 19.6              | 1.60E+02          |                   |                   |
| 20.6              | 2.60E+02          |                   |                   |
| 22.6              | 3.40E+02          |                   |                   |
| 24.0              | 3.50E+02          | 1.30E+02          |                   |
| 25.9              | 3.40E+02          | 4.50E+02          |                   |
| 28.0              | 2.40E+02          | 6.20E+02          |                   |
| 30.1              | 1.70E+02          | 7.05E+02          |                   |
| 32.1              |                   | 1.15E+03          |                   |
| 34.2              |                   | 1.05E+03          |                   |
| 34.2              |                   | 1.15E+03          | 2.10E+02          |
| 35.2              | 6.00E+01          | 9.00E+02          | 3.60E+02          |
| 39.1              |                   | 8.20E+02          |                   |
| 36.1              |                   | 9.70E+02          | 6.10E+02          |
| 36.1              |                   | 1.04E+03          | 7.00E+02          |
| 37.2              | 5.90E+01          | 5.90E+02          | 7.30E+02          |
| 37.6              |                   |                   | 1.05E+03          |
| 39.4              |                   |                   | 1.27E+03          |
| 41.0              |                   |                   | 1.54E+03          |
| 42.5              |                   |                   | 1.60E+03          |
| 41.2              |                   |                   | 1.60E+03          |
| 45.9              |                   |                   | 1.54E+03          |
| 47.6              |                   |                   | 1.33E+03          |
| 48.4              | 4.70E+01          | 3.49E+02          | 1.37E+03          |

13. Blue J.W., Liu D.C. Smathers J.B. Thallium-201 Production with the Idle Beam from Neutron Therapy. Med.Phys., 1978, 5, №6, p. 532-535.

Таблица 7а.

Функции возбуждения реакции  $^{205}\text{Tl}(d, \text{xn})$ , рассчитанные по программе ALICE-87.

| $E_d, \text{MeV}$ | $^{204}\text{Pb}$ | $^{203}\text{Pb}$ | $^{202}\text{Pb}$ | $^{201}\text{Pb}$ |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 10.0              |                   |                   |                   |                   |
| 12.0              | 1.02E+02          |                   |                   |                   |
| 14.0              | 5.94E+02          |                   |                   |                   |
| 16.0              | 1.02E+03          |                   |                   |                   |
| 18.0              | 1.29E+03          |                   |                   |                   |
| 20.0              | 1.44E+03          | 2.52E+00          |                   |                   |
| 22.0              | 1.29E+03          | 3.13E+02          |                   |                   |
| 24.0              | 8.31E+02          | 8.88E+02          |                   |                   |
| 26.0              | 4.71E+02          | 1.34E+03          |                   |                   |
| 28.0              | 2.84E+02          | 1.57E+03          | 1.54E+00          |                   |
| 30.0              | 2.15E+02          | 1.56E+03          | 3.82E+01          |                   |
| 32.0              | 1.63E+02          | 1.25E+03          | 4.00E+02          |                   |
| 34.0              | 1.34E+02          | 8.58E+02          | 8.55E+02          |                   |
| 36.0              | 1.15E+02          | 5.57E+02          | 1.24E+03          | 1.11E-02          |
| 38.0              | 1.02E+02          | 3.71E+02          | 1.41E+03          | 4.68E+00          |
| 40.0              | 9.19E+01          | 2.66E+02          | 1.53E+03          | 6.42E+01          |
| 42.0              | 8.41E+01          | 2.06E+02          | 1.43E+03          | 2.61E+02          |
| 44.0              | 7.76E+01          | 1.70E+02          | 1.18E+03          | 5.74E+02          |
| 46.0              | 6.99E+01          | 1.39E+02          | 8.22E+02          | 9.73E+02          |
| 48.0              | 7.17E+01          | 1.28E+02          | 6.50E+02          | 1.14E+03          |

Таблица 7б.

Экспериментальные функции возбуждения реакции  $^{205}\text{Tl}(d, \text{xn})$  [13].

| $E_d, \text{MeV}$ | $^{204}\text{Pb}$ | $^{203}\text{Pb}$ | $^{202}\text{Pb}$ |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 19.6              | 2.80E+02          |                   |                   |
| 20.7              | 4.10E+02          |                   |                   |
| 23.0              | 4.20E+02          |                   |                   |
| 23.7              | 3.90E+02          | 4.00E+02          |                   |
| 26.0              | 3.10E+02          | 7.80E+02          |                   |
| 28.1              | 2.00E+02          | 1.04E+03          |                   |
| 31.0              | 1.20E+02          | 1.20E+03          |                   |
| 32.3              | 8.80E+01          | 1.14E+03          | 8.20E+01          |
| 34.3              | 7.70E+01          | 9.30E+02          | 1.60E+02          |
| 36.3              | 6.00E+01          | 7.50E+02          |                   |
| 36.3              |                   | 8.70E+02          | 2.60E+02          |
| 37.9              |                   | 7.30E+02          | 3.40E+02          |
| 39.5              |                   | 5.80E+02          | 3.90E+02          |
| 41.1              |                   | 5.00E+02          | 4.30E+02          |
| 42.0              |                   | 4.60E+02          | 4.70E+02          |
| 44.3              |                   | 4.00E+02          | 4.00E+02          |
| 46.0              |                   | 3.80E+02          | 3.40E+02          |
| 47.6              |                   | 3.30E+02          | 2.80E+02          |

13. Blue J.W., Liu D.C. Soathers J.B. Thallium-201 Production with the Idle Beam from Neutron Therapy. Med.Phys., 1978, v.5, №, p. 537-538.

Функции возбуждения реакции  $^{200}\text{Tl}(\text{p}, \text{xn})^{201}\text{Bi}$  и  $^{201}\text{Tl}(\text{p}, \text{xn})^{201}\text{Pb}$ , рассчитанные по программе ALICE-87.

| Eр, МэВ | $^{204}\text{Pb}(\text{p}, 4\text{n}), (\text{p}, \text{p}3\text{n})$ |                   | $^{206}\text{Pb}(\text{p}, 6\text{n}), (\text{p}, \text{p}6\text{n})$ |                   |
|---------|---|-------------------|---|-------------------|
|         | $^{201}\text{Bi}$   | $^{201}\text{Pb}$ | $^{201}\text{Bi}$   | $^{201}\text{Pb}$ |
| 32.0    | 2.09E+02  | 1.54E-02          |   |                   |
| 34.0    | 4.11E+02  | 6.37E-01          |   |                   |
| 36.0    | 8.99E+02  | 4.77E+00          |   |                   |
| 38.0    | 1.20E+03  | 1.56E+01          |   |                   |
| 40.0    | 1.11E+03  | 3.32E+01          |   |                   |
| 42.0    | 8.07E+02  | 5.49E+01          |   |                   |
| 44.0    | 5.24E+02  | 7.39E+01          |   |                   |
| 46.0    | 3.40E+02  | 8.96E+01          |   |                   |
| 48.0    | 2.35E+02  | 9.85E+01          |   |                   |
| 50.0    | 1.77E+02  | 1.01E+02          | 7.92E+01  | 2.81E-02          |
| 52.0    | 1.43E+02  | 1.70E+02          | 2.71E+02  | 4.82E-01          |
| 54.0    | 1.21E+02  | 9.72E+01          | 5.15E+02  | 3.00E+00          |
| 56.0    | 1.06E+02  | 9.28E+01          | 6.93E+02  | 1.05E+01          |
| 58.0    | 9.45E+01  | 8.79E+01          | 7.46E+02  | 2.49E+01          |
| 60.0    | 8.60E+01  | 8.40E+01          | 6.88E+02  | 4.53E+01          |
| 62.0    |   |                   | 5.74E+02  | 6.38E+01          |
| 64.0    |   |                   | 4.52E+02  | 9.36E+01          |
| 66.0    |   |                   | 3.50E+02  | 1.12E+02          |
| 68.0    |   |                   | 2.72E+02  | 1.25E+02          |
| 70.0    |   |                   | 2.18E+02  | 1.32E+02          |
| 72.0    |   |                   | 1.79E+02  | 1.34E+02          |
| Eр, МэВ | $^{207}\text{Pb}(\text{p}, 7\text{n}), (\text{p}, \text{p}7\text{n})$ |                   | $^{208}\text{Pb}(\text{p}, 8\text{n}), (\text{p}, \text{p}7\text{n})$ |                   |
|         | $^{201}\text{Bi}$   | $^{201}\text{Pb}$ | $^{201}\text{Bi}$   | $^{201}\text{Pb}$ |
| 56.0    | 3.89E+01  | 6.91E-03          |   |                   |
| 58.0    | 1.52E+02  | 5.12E-02          |   |                   |
| 60.0    | 3.25E+02  | 2.14E-01          |   |                   |
| 62.0    | 4.96E+02  | 7.17E-01          |   |                   |
| 64.0    | 6.03E+02  | 2.24E+00          |   | 4.14E-02          |
| 66.0    | 6.24E+02  | 6.49E+00          | 5.19E+01  | 5.00E-02          |
| 68.0    | 5.78E+02  | 1.53E+01          | 1.34E+02  | 3.26E-01          |
| 70.0    | 4.97E+02  | 3.01E+01          | 2.43E+02  | 1.41E+00          |
| 72.0    | 4.12E+02  | 4.94E+01          | 3.50E+02  | 4.39E+00          |
| 74.0    | 3.43E+02  | 7.11E+01          | 4.24E+02  | 1.08E+01          |
| 76.0    | 3.02E+02  | 9.21E+01          | 4.55E+02  | 2.18E+01          |
| 78.0    | 2.70E+02  | 1.10E+02          | 4.48E+02  | 3.73E+01          |
| 80.0    | 2.20E+02  | 1.24E+02          | 4.13E+02  | 5.68E+01          |
| 82.0    |   |                   | 3.66E+02  | 7.65E+01          |
| 84.0    |   |                   | 3.33E+02  | 9.50E+01          |
| 86.0    |   |                   | 2.93E+02  | 1.10E+02          |
| 88.0    |   |                   | 2.67E+02  | 1.21E+02          |
| 90.0    |   |                   | 2.27E+02  | 1.29E+02          |

Таблица 8.  
Экспериментальная функция возбуждения реакции  $^{206}\text{Pb}(p,6n)^{201}\text{Bi}$  (261).

| $E_p$ , МэВ | (p,6n)   |
|-------------|----------|
| 49.0        | 5.00E+01 |
| 52.5        | 2.60E+02 |
| 56.3        | 4.00E+02 |
| 63.8        | 5.50E+02 |

26. Bell R.E., Skarsgard H.M. Cross sections of (p,xn) reactions in the isotopes of lead and bismuth. Can.J.Phys., 1956, v.34, №8, p.745-766.

Таблица 9.  
Функция возбуждения реакции  $^{204}\text{Pb}(p,xn)^{205-x}\text{Bi}$  и  $^{204}\text{Pb}(p,4n)^{201}\text{Pb}$ , рассчитанные по программе ALICE-87.

| $E_p$ , МэВ | $^{201}\text{Bi}$ | $^{200}\text{Bi}$ | $^{201}\text{Pb}$ |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 32.00       | 2.09E+02          |                   | 1.64E-02          |
| 34.00       | 4.11E+02          |                   | 6.37E-01          |
| 36.00       | 8.99E+02          |                   | 4.77E+00          |
| 38.00       | 1.20E+03          |                   | 1.56E+01          |
| 40.00       | 1.11E+03          |                   | 3.32E+01          |
| 42.00       | 8.07E+02          |                   | 5.49E+01          |
| 44.00       | 5.24E+02          | 1.72E+02          | 7.39E+01          |
| 46.00       | 3.40E+02          | 4.88E+02          | 8.96E+01          |
| 48.00       | 2.35E+02          | 7.93E+02          | 9.86E+01          |
| 50.00       | 1.77E+02          | 9.21E+02          | 1.01E+02          |
| 52.00       | 1.43E+02          | 8.45E+02          | 1.00E+02          |
| 54.00       | 1.21E+02          | 6.70E+02          | 9.72E+01          |
| 56.00       | 1.06E+02          | 4.93E+02          | 9.28E+01          |
| 58.00       | 9.45E+01          | 3.59E+02          | 8.79E+01          |
| 60.00       | 8.60E+01          | 2.66E+02          | 8.40E+01          |

Технический редактор П. П. Герасимова

Подписано к печати 27.05.1992 г. Бумага писчая № 1  
Формат 60 × 90 мм Усл. п. л. 3 Уч.-изд. л. 2 Тираж 70 экз.  
Цена 2 р. 52 к. Индекс 3649 ФЭИВ-2253

Отпечатано на ротаврифте.  
249020, г. Обнинск Калужской обл., ФЭИ

Функции возбуждения реакций с образованием радионуклидов  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{201}\text{Pb}$  и  $^{201}\text{Bi}$ .  
(Экспериментальные и расчетные данные).  
ФЭИ-2253. 1992. 1-48.