

УДК 539.17

## СИНТЕЗ И ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР $^{294}\text{Ts}$ И $^{294}\text{Og}$

© 2020 г. А. А. Воинов<sup>1</sup>, \*, В. К. Утенков<sup>1</sup>, Ю. Ц. Оганесян<sup>1</sup>, Ф. Ш. Абдуллин<sup>1</sup>,  
А. Н. Поляков<sup>1</sup>, Ю. С. Цыганов<sup>1</sup>, И. В. Широковский<sup>1</sup>, Р. Н. Сагайдак<sup>1</sup>,  
В. Г. Субботин<sup>1</sup>, С. Н. Дмитриев<sup>1</sup>, М. Г. Иткис<sup>1</sup>, М. В. Шумейко<sup>1</sup>,  
Н. Д. Коврижных<sup>1</sup>, А. В. Сабельников<sup>1</sup>, Г. К. Востокин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Международная межправительственная организация  
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

\*E-mail: [voinov@jinr.ru](mailto:voinov@jinr.ru)

Поступила в редакцию 30.10.2019 г.

После доработки 25.11.2019 г.

Принята к публикации 27.12.2019 г.

Представлен обзор экспериментальных работ, выполненных на установке Дубненский газонаполненный магнитный сепаратор ядер отдачи (ГНС) с целью изучения реакций образования нуклидов  $^{294}\text{Ts}$  и  $^{294}\text{Og}$  и свойств их радиоактивного распада. Обсуждается возможность синтеза новых элементов с  $Z = 119$  и  $Z = 120$  в ближайшем будущем, а также проведения экспериментов с целью изучения свойств более тяжелых изотопов уже известных сверхтяжелых ядер  $\text{Lv}$  ( $Z = 116$ ),  $\text{Ts}$  ( $Z = 117$ ) и  $\text{Og}$  ( $Z = 118$ ).

DOI: 10.31857/S0367676520040389

### ВВЕДЕНИЕ

В реакциях полного слияния  $^{48}\text{Ca}$  ( $Z = 20$ ) с трансактинидными ядрами-мишенями от  $\text{U}$  ( $Z = 92$ ) до  $\text{Cf}$  ( $Z = 98$ ) нами были синтезированы шесть новых сверхтяжелых элементов с порядковыми номерами 113 (Nh), 114 (Fl), 115 (Mc), 116 (Lv), 117 (Ts) и 118 (Og). Более 50 новых изотопов с  $Z = 104$ –118, принадлежащих предсказанному в теории “острову стабильности” сверхтяжелых элементов (СТЭ), были исследованы в этих экспериментах с использованием Дубненского газонаполненного сепаратора ядер отдачи (ГНС) в ЛЯР ОИЯИ. В этих опытах изучались реакции полного слияния ядер-мишеней  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{242,244}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{245,248}\text{Cm}$ ,  $^{249}\text{Bk}$  и  $^{249}\text{Cf}$  с налетающими частицами  $^{48}\text{Ca}$  [1]. Получено первое экспериментальное подтверждение существования гипотетической области стабильности сверхтяжелых ядер (СТЯ). Позднее реакции синтеза бомбардирующих частиц  $^{48}\text{Ca}$  с уникальными радиоактивными мишенями ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{242, 244}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{248}\text{Cm}$  и  $^{249}\text{Bk}$ ) были изучены с использованием как других магнитных сепараторов ядер (SHIP, Германия; BGS, США; GARIS, Япония и TASCA, Германия), так и химических экспериментальных установок (IVO, Швейцария + Россия). Полученные в этих работах экспериментальные данные о свойствах изотопов  $^{283}\text{Cn}$ ,  $^{285$ – $^{289}\text{Fl}$ ,  $^{287, 288}\text{Mc}$ ,  $^{290$ – $^{293}\text{Lv}$  и  $^{293, 294}\text{Ts}$  [2–7] полностью согласуются с результатами наших экспериментов на ГНС (изотоп

$^{294}\text{Og}$  ( $Z = 118$ ) был синтезирован только на установке ГНС в Дубне).

Изученные свойства распада самых тяжелых ядер с  $Z = 112$ –118 указывают на значительный стабилизирующий эффект при приближении к замкнутой сферической оболочке  $N = 184$ . Однако до сих пор даже самые тяжелые изотопы ядер  $^{294}\text{Ts}$  ( $Z = 117$ ) и  $^{294}\text{Og}$  ( $Z = 118$ ), имеющие 177 и 176 нейтронов соответственно, все еще отдалены от  $N = 184$  на 7 и 8 нейтронов.

Недавно было предпринято несколько попыток расширить область СТЯ путем синтеза элементов 119 и 120 с ядрами-мишенями в диапазоне от  $^{238}\text{U}$  до  $^{249}\text{Cf}$  и снарядами тяжелее, чем  $^{48}\text{Ca}$ . Были использованы пять реакций синтеза:  $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$  (SHIP [8]),  $^{58}\text{Fe} + ^{244}\text{Pu}$  (ГНС [9]),  $^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm}$  (SHIP [10]),  $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Bk}$  (TASCA [11]) и  $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Cf}$  (TASCA [11]); однако в этих экспериментах цепочки распада СТЯ не наблюдались. Верхние пределы поперечного сечения были установлены в диапазоне 0.07–1.1 пб в зависимости от реакции. Очевидно, что чувствительность перечисленных экспериментов недостаточна, и синтез новых ядер с порядковыми номерами  $Z$  выше 118 требует использования новых экспериментальных установок (таких, как Фабрика сверхтяжелых элементов в ОИЯИ).

Таким образом, до настоящего времени  $^{294}\text{Ts}$  ( $N = 177$ ) и  $^{294}\text{Og}$  ( $N = 176$ ) являются наиболее тя-

желыми ядрами вблизи нейтронной оболочки  $N = 184$ . Можно продолжать использовать  $^{48}\text{Ca}$  в качестве бомбардирующих частиц и пытаться получить новые изотопы  $^{294}\text{Lv}$  ( $N = 178$ ) и  $^{295}\text{Tс}$  ( $N = 178$ ) в реакциях  $^{248}\text{Cm}(^{48}\text{Ca}, 2n)^{294}\text{Lv}$  и  $^{249}\text{Bk}(^{48}\text{Ca}, 2n)^{295}\text{Tс}$ . Однако реакции полного слияния с испарением 2 нейтронов из составных ядер имеют гораздо меньшее сечение по сравнению с реакциями с испарением 3–4 нейтронов. Эксперимент с самым тяжелым из доступных сегодня материалов мишени,  $^{251}\text{Cf}$  ( $N = 153$ ), и ядрами  $^{48}\text{Ca}$  может привести к получению более тяжелых изотопов  $^{295}\text{Og}$ ,  $^{296}\text{Og}$  и  $^{297}\text{Og}$  ( $N = 177, 178$  и  $179$ ). Распад их дочерних продуктов будет происходить через ядра с уже известными свойствами [1]. Предсказанные в разных подходах значения сечений этой реакции выглядят достаточно оптимистично. Это позволило нам начать новую серию экспериментов, направленную на синтез новых изотопов  $^{293-296}\text{Og}$  в реакции взаимодействия ускоренных на циклотроне У-400 частиц  $^{48}\text{Ca}$  и мишени, состоящей из смеси изотопов Cf. В работе представлены результаты экспериментов, нацеленных на синтез ядер 117 и 118 элементов [1, 12–16].

#### ЭКСПЕРИМЕНТ $^{249}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$

Изотоп  $^{294}\text{Og}$  ( $Z = 118$ ) был впервые синтезирован и идентифицирован в наших экспериментах в 2002 г. с использованием реакции  $^{249}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$  [13]. Энергия пучка ионов  $^{48}\text{Ca}$  (245 МэВ) была выбрана выше кулоновского барьера для образования составного ядра  $^{297}\text{Og}$  с энергией возбуждения  $E^*$  около 29 МэВ. При накопленной дозе  $2.5 \cdot 10^{19}$  частиц  $^{48}\text{Ca}$  была обнаружена цепочка событий, соответствующая образованию ядра  $^{294}\text{Og}$ . Она включала в себя имплантацию ядра отдачи в детектор, последующие  $\alpha$ -распады, коррелированные по времени и позиции, и завершилась спонтанным делением. Сечение  $3n$ -канала реакции на основе одного наблюдаемого события образования ядра  $^{294}\text{Og}$  составило 0.3 пб.

Продукты реакций полного слияния отделялись в магнитном поле сепаратора от продуктов побочных реакций и частиц пучка, проходили через времяпролетную систему и имплантировались в кремниевый детектор в фокальной плоскости сепаратора. До 2011 г. мы использовали детектор размером 4 см (по вертикали)  $\times$  12 см (по горизонтали) из трех идентичных Si-детекторов (Canberra NV) с 4 вертикальными позиционно-чувствительными полосками каждый. Они окружены восемью боковыми детекторами  $4 \times 4 \text{ см}^2$  без позиционной чувствительности [13]. Система детектирования была откалибрована путем регистрации ядер отдачи и распадов ( $\alpha$  или SF) известных изотопов No и Th и их продуктов распада, по-

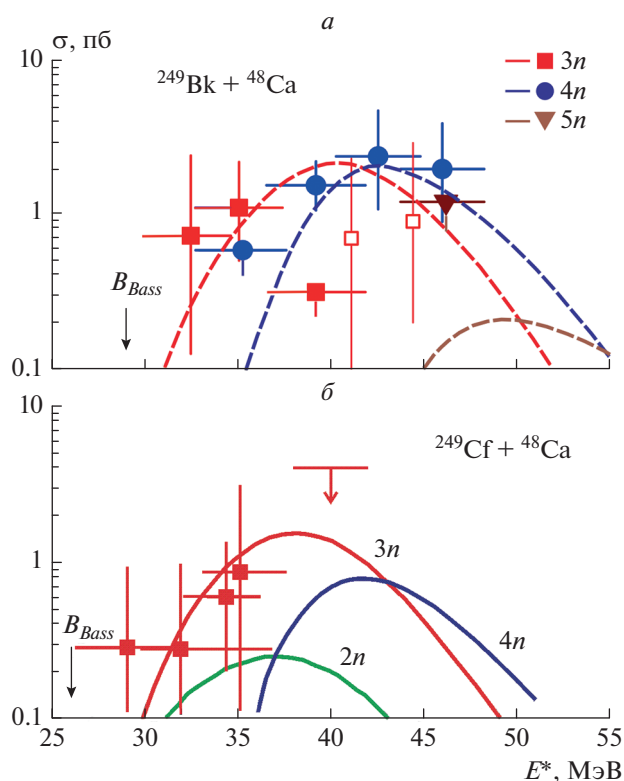
лученных в реакциях  $^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2n)$  и  $^{nat}\text{Yb}(^{48}\text{Ca}, 3-5n)$ , соответственно. В приведенных выше экспериментах энергетическое разрешение (полная ширина на половине высоты, ПШПВ) по  $\alpha$ -частицам, имплантированным в детекторы в фокальной плоскости, составляло 60–140 кэВ в зависимости от полосы детектора и координаты. Позиционное разрешение при регистрации коррелированных распадов ядер, имплантированных в детекторы, составляло 1.1–1.3 мм для пары ядро отдачи– $\alpha$ -частица и 0.4–0.8 мм для пары ядро отдачи – спонтанное деление.

Второй эксперимент с мишенью  $^{249}\text{Cf}$  и пучком  $^{48}\text{Ca}$  был проведен в 2005 г. при более высокой энергии пучка 251 МэВ, соответствующей диапазону энергий возбуждения составного ядра между 32 и 37 МэВ. Были обнаружены еще два события, согласующиеся с первой цепочкой распада. Свойства всех трех цепочек распада, отнесенных к распаду  $^{294}\text{Og}$ , представлены в [14]. Усредненный период полураспада  $^{294}\text{Og}$  на основе трех зарегистрированных  $\alpha$ -распадов со средней энергией  $11.65 \pm 0.06$  МэВ составляет 0.89 мс. Две идентичные короткие цепочки состояли из событий типа ядро отдачи– $\alpha$ – $\alpha$ –спонтанное деление, третья, более длинная цепочка распада заканчивалась спонтанным делением после трех последовательных  $\alpha$ -распадов. Эти наблюдения согласуются с независимо изученными свойствами распада  $^{290}\text{Lv}$ ,  $^{286}\text{Fl}$  и  $^{282}\text{Cn}$ , полученных в прямых реакциях  $^{245}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ ,  $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$  и  $^{238}\text{U} + ^{48}\text{Ca}$  соответственно [1]. Сечение образования  $^{294}\text{Og}$  при данной энергии пучка оценивается в 0.5 пб для энергии возбуждения  $E^*$  в диапазоне 32.1–36.6 МэВ [14].

#### ЭКСПЕРИМЕНТ $^{249}\text{Bk} + ^{48}\text{Ca}$

Об открытии элемента 117 в реакции  $^{249}\text{Bk}(^{48}\text{Ca}, 4-3n)^{293,294}\text{Tс}$  было сообщено в 2010 г. [15]. Два наиболее тяжелых изотопа с нечетным  $Z$ ,  $^{294}\text{Tс}$  (одно событие образования составного ядра в этом опыте) и  $^{293}\text{Tс}$  (5 событий), наблюдались в наших экспериментах при энергии пучка  $^{48}\text{Ca}$  247 и 252 МэВ, что соответствует энергиям возбуждения 35 и 39 МэВ. Материал мишени  $^{249}\text{Bk}$  был накоплен в Ок-Риджской национальной лаборатории (штат Теннесси, США) на высокопоточном изотопном реакторе HFIR. Ядра с нечетным  $Z$  имеют, как правило, более длинные цепочки распада, что связано с сильным запретом деления ядра, обусловленным неспаренными нуклонами.

В 2012 г. мы провели новую серию экспериментов, чтобы получить более подробную информацию о свойствах распадающихся ядер с нечетным  $Z$ , измерить функцию возбуждения реакции  $^{249}\text{Bk} + ^{48}\text{Ca}$  в более широком диапазоне энергий и дополнительно подкрепить методом перекрестных



**Рис. 1.** Измеренные (символы) и расчетные (штриховые [19] и сплошные [20] линии) сечения реакций  $^{249}\text{Bk} + ^{48}\text{Ca}$  (а) и  $^{249}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$  (б). Стрелкой указан (б) верхний предел сечения для  $3n$  канала реакции при  $E^* = 40$  МэВ.

реакций заявленные открытия элементов 113, 115 и 117 [1]. Действительно, в реакции  $^{249}\text{Bk} + ^{48}\text{Ca}$  при более высоких энергиях возбуждения  $E^* = 37.0\text{--}48.3$  МэВ наблюдались 16 цепочек распада материнского ядра  $^{293}\text{117}$ . Свойства радиоактивного распада изотопа  $^{293}\text{117}$  и всех дочерних продуктов его распада, обнаруженных в 2010 г. [15], были подтверждены регистрацией 11 новых цепочек распада в этой новой серии экспериментов [16]. Самый тяжелый изотоп  $^{294}\text{117}$ , продукт реакции  $^{249}\text{Bk}(^{48}\text{Ca}, 3n)$ , был синтезирован при более низких энергиях возбуждения 30.4–37.5 МэВ. Максимальные сечения для испарительных каналов  $3n$  и  $4n$  были измерены на уровне  $\sigma_{3n} = 1.1$  пб и  $\sigma_{4n} = 2.4$  пб при энергиях возбуждения  $E^* = 35$  и  $43$  МэВ соответственно (рис. 1). Для этого эксперимента система регистрации была модифицирована с целью увеличения позиционного разрешения детекторов, что уменьшает вероятность наблюдения последовательностей случайных событий, которые могут имитировать цепочки распада искомым ядрам. Новые детекторы в фокальной плоскости состояли из двух детекторов  $6 \times 6$  см<sup>2</sup>, каждый из которых имел 16 вертикальных позиционно-чув-

ствительных полосок; они окружены шестью боковыми детекторами  $6 \times 6$  см<sup>2</sup> (Canberra NV) без позиционной чувствительности. Соответствующая новая многоканальная система сбора данных была разработана исследовательской группой сепаратора ГНС на основе спектроскопических модулей ООО «ТехИнвест» (Дубна). Это позволило получить разрешение (ПШПВ) по энергии альфа-частиц 34–73 кэВ для детектора в фокальной плоскости и 83–117 кэВ для частиц, зарегистрированных фокальным и боковым детекторами с суммированием сигналов. Позиционное разрешение способности детектора составляло 1.1–1.8 мм для пары ядро отдачи– $\alpha$  и 0.5–1.2 мм для пары ядро отдачи–SF [16]. Другие условия эксперимента были такими же, как в [1] и [13–15].

Свойства ядер Ts ( $Z = 117$ ) недавно изучались на газонаполненном сепараторе TASCA (ГСИ, Германия) в реакции полного слияния  $^{249}\text{Bk} + ^{48}\text{Ca}$ . Четыре цепочки распада изотопов  $^{293}, ^{294}\text{Ts}$  и их дочерних продуктов, наблюдавшиеся в этих экспериментах, представлены в [7]. Сечения образования изотопов  $^{293}\text{Ts}$  и  $^{294}\text{Ts}$  подтверждают ранее опубликованные нами данные [15, 16].

Материал мишени  $^{249}\text{Bk}$   $\beta$ -активен и с периодом полураспада 330 дней распадается в  $^{249}\text{Cf}$ . В ходе длительного эксперимента Cf накапливается в мишени, что создает возможность наблюдения изотопов с  $Z = 118$ , получаемых в реакции  $^{249}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$ . Действительно, еще одно событие, связанное с  $^{294}\text{Og}$ , наблюдалось в данном опыте на ГНС в результате накопления  $^{249}\text{Cf}$  в материале мишени  $^{249}\text{Bk}$  [16]. Оценка сечения для этого отдельного события (0.3 пб) для диапазона энергий возбуждения 26.6–37.5 МэВ для  $^{297}\text{Og}$  также хорошо согласуется с ранее полученными данными. Усредненные по четырем событиям распадов  $^{294}\text{Og}$  дают величины  $T_{1/2} = 0.69$  мс и  $E_{\alpha} = 11.66 \pm 0.06$  МэВ (рис. 2а).

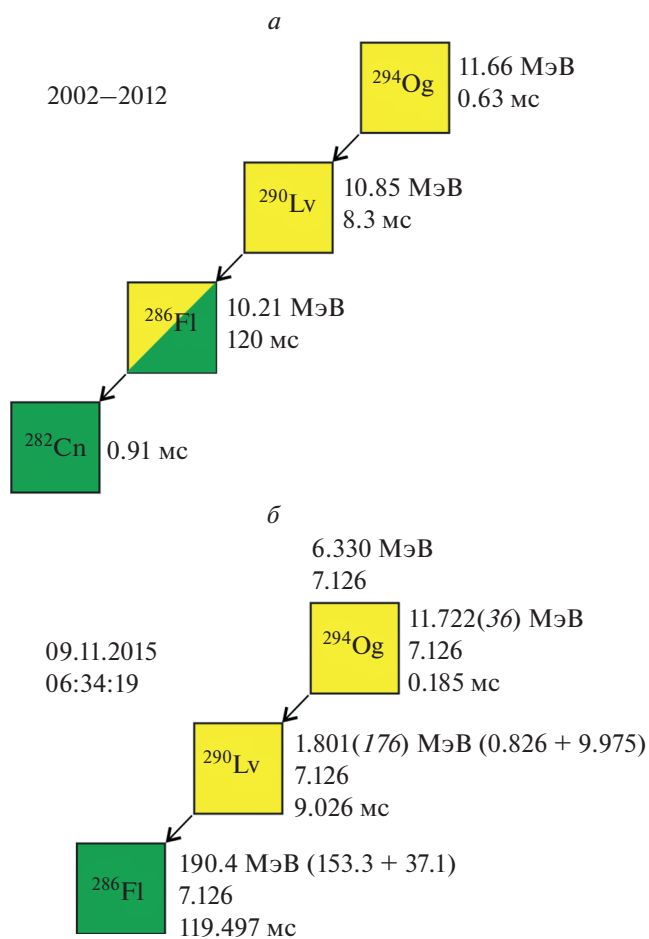
#### ЭКСПЕРИМЕНТ $^{249}, ^{250}, ^{251}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$

Новая серия экспериментов была проведена на ГНС в течение октября 2015 г. – апреля 2016 г. Мишень, состоящая из смеси изотопов Cf, (50.7%  $^{249}\text{Cf}$ , 12.9%  $^{250}\text{Cf}$ , 36.4%  $^{251}\text{Cf}$ ) была предоставлена Ок-Риджской национальной лабораторией (США). В ходе облучения пучком  $^{48}\text{Ca}$  состояние мишени регулярно контролировалось путем регистрации  $\alpha$ -частиц изотопов Cf [12].

Сборку детекторов в фокальной плоскости ГНС заменили, чтобы улучшить позиционное разрешение при регистрации событий и тем самым уменьшить вероятность наблюдения последовательностей случайных событий, которые могут имитировать цепочки распада имплантированных ядер. Новая система детектирования включа-

ет двухсторонний кремниевый стриповый детектор (DSSD) площадью  $48 \times 128 \text{ мм}^2$  и толщиной 0.3 мм, (Micron Semiconductor Ltd). Этот большой DSSD детектор имеет 48 горизонтальных полосок шириной 1 мм на передней стороне и 128 вертикальных полосок на задней. Таким образом, на одной кремниевой пластине имеются более 6000 отдельных пикселей площадью  $1 \text{ мм}^2$  каждый. Такая высокая сегментация поверхности детектора позволяет достичь превосходного разрешения по координате при регистрации последовательных распадов дочерних продуктов ядра отдачи, имплантированного в детектор, снижая вероятность регистрации случайных событий. Эта новая матрица Si-детекторов разработана, собрана, введена в эксплуатацию и предоставлена Ок-Риджской лабораторией. Сигналы от всех детекторов обрабатывались с использованием линейных предусилителей MESYTEC Ltd. Кроме того, эти аналоговые сигналы разделялись на две независимые ветви с помощью специальных многоканальных спектрометрических разветвителей-усилителей РА32-64, разработанных группой установки ГНС. Таким образом, сигналы со всех детекторов обрабатывались одновременно аналоговой электроникой, аналогичной той, которая использовалась в предыдущих экспериментах на ГНС [1, 9, 13–15], и системой цифровой электроники на основе модулей Pixie-16 XIA [12]. Эта новая сборка DSSD и две независимые системы регистрации были успешно применены в недавних экспериментах по изучению реакций  $^{239}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$  и  $^{240}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$  [17, 18]. Энергетическое разрешение детектора при регистрации альфа-частиц составляло от 34 до 78 кэВ в зависимости от полоски, в то время как суммарные сигналы от частиц, зарегистрированных боковым и фокальным детектором, имели энергетическое разрешение от 147 до 263 кэВ. Другие экспериментальные условия и методы калибровки детекторов были такими же, как в предыдущих экспериментах на ГНС (см. [1] и ссылки в ней).

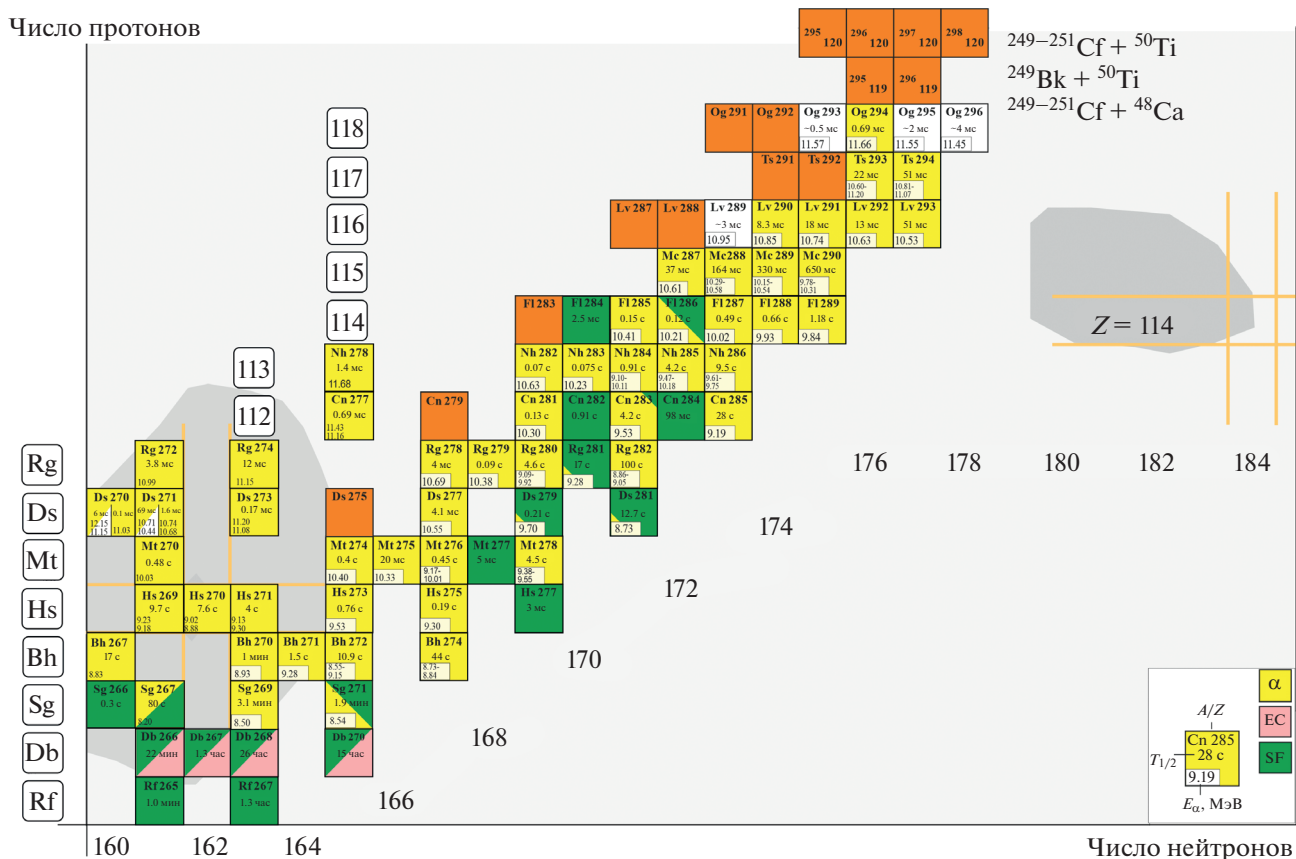
Эксперимент с мишенью из смеси изотопов  $^{249}\text{Cf}$ ,  $^{250}\text{Cf}$  и  $^{251}\text{Cf}$  был проведен при двух энергиях пучка  $^{48}\text{Ca}$ . При энергии пучка  $E = 252 \text{ МэВ}$  и накопленной дозе пучка  $1.6 \cdot 10^{19}$  частиц наблюдалась одна коррелированная цепочка распада (рис. 2б), которую мы относим к  $^{294}\text{Og}$ , продукту испарительного канала реакции  $^{249}\text{Cf} (^{48}\text{Ca}, 3n)$ , изученной на ГНС ранее. В этой цепочке картина распадов полностью воспроизводит те, что наблюдались ранее [13–15]: новая цепочка состоит из имплантированных ядер отдачи, двух последовательных  $\alpha$ -частиц и оканчивается спонтанным делением изотопа  $^{286}\text{Fl}$ . Сечение реакции  $^{249}\text{Cf} (^{48}\text{Ca}, 3n) ^{294}\text{Og}$  для энергии пучка ионов 252 МэВ (рис. 1) составило около 0.9 пб. Для реакции  $^{251}\text{Cf}$



**Рис. 2.** а – Усредненные свойства распада ( $E_\alpha$  и  $T_{1/2}$ ) изотопов  $^{294}\text{Og}$ – $^{282}\text{Cn}$ , полученные в реакциях  $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Cf}$ ,  $^{245}\text{Cm}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$  [1]. б – Свойства распада  $^{294}\text{Og}$ – $^{286}\text{Fl}$ , измеренные в этой работе. Справа сверху вниз приведены энергии, номера полосок DSSD для событий распада, временные интервалы между событиями. Энергии суммарных сигналов фронтального и бокового детекторов даны в скобках.

( $^{48}\text{Ca}, 3n$ )  $^{296}\text{Og}$  верхний предел сечения установлен на уровне 3.4 пб.

При энергии пучка 258 МэВ целью эксперимента было получение изотопов  $^{295}\text{Og}$  или  $^{296}\text{Og}$ , продуктов реакции  $^{251}\text{Cf} (^{48}\text{Ca}, xn) ^{299-x}\text{Og}$  с испарением 4 и 3 нейтронов. Доза пучка  $1.1 \cdot 10^{19}$  частиц была накоплена в течение 56 дней. При этой энергии события, которые можно было бы отнести к образованию и распаду СТЯ, не наблюдались. Верхние оценки для сечения составляют 4.1 пб для ядра  $^{295}\text{Og}$  и 5.7 пб для  $^{296}\text{Og}$  [12]. Эксперимент был завершен досрочно из-за загрязнения поверхности мишени расплавившимся клеем, который наносится для монтажа секторов мишени на диск, загрязнение делало дальнейшее облучение бессмысленным. Вещество мишени было отправлено обратно



**Рис. 3.** Верхняя часть карты нуклидов. Темно-серые (оранжевые в “on-line” версии) квадраты – новые изотопы 119 и 120 элементов, наблюдение которых возможно в реакциях  $^{249}\text{Bk} + ^{50}\text{Ti}$  и  $^{249-251}\text{Cf} + ^{50}\text{Ti}$  с испарением 3–4 нейтронов, и их цепочки превращений в более легкие дочерние продукты распада, изотопы Ds–Og. Белые квадраты – новые изотопы  $^{293, 295, 296}\text{Og}$ , синтез которых возможен в реакции  $^{249-251}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$  [12].

в Ок-Ридж (США) для регенерации. Мы планируем продолжить данный эксперимент по синтезу новых изотопов 118 элемента, как только будет изготовлена новая мишень.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новые эксперименты, нацеленные на исследование “острова стабильности” были предприняты ЛЯР ОИЯИ (г. Дубна, Россия) с использованием пучка  $^{48}\text{Ca}$ . Была произведена уникальная радиоактивная мишень  $^{249-251}\text{Cf}$  для поиска новых самых тяжелых изотопов  $^{295}\text{Og}$  и  $^{296}\text{Og}$ . Наблюдали еще одно событие образования и распада изотопа  $^{294}\text{Og}$ ; его свойства были дополнительно изучены с помощью двух независимых измерительных систем на основе нового детектирующего модуля. Дальнейшие исследования реакции  $^{249-251}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$  запланированы на ближайшее время.

Эти исследования СТЯ стимулировали развитие новых ускорительных и сепараторных установок, которые могут сделать возможным более де-

тальное изучение свойств уже известных ядер как физическими (спектроскопическими), так и химическими методами, а также использовать пучки более тяжелых ионов высокой интенсивности. Например, использование реакций  $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Bk}$  и  $^{50}\text{Ti} + ^{249-251}\text{Cf}$  может привести к открытию двух новых элементов таблицы Д.И. Менделеева с порядковыми номерами 119 и 120 (рис. 3). Продукты этих реакций, новые изотопы  $^{295-298}120$ ,  $^{295, 296}119$  и их дочерние ядра  $^{291-293}\text{Og}$ ,  $^{291, 292}\text{Ts}$  и  $^{287-289}\text{Lv}$ , дадут более богатую информацию о границах “острова стабильности” и о влиянии сферической оболочки  $Z = 114$  на стабильность ядер при удалении от центра области стабильности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-52-55002).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K.* // Nucl. Phys. A. 2015. V. 944. P. 62.

2. *Eichler R., Aksenov N.V., Belozerov A.V. et al.* // Nature. 2007. V. 477. P. 72.
3. *Hofmann S., Heinz S., Mann R. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2012. V. 48. P. 62.
4. *Rudolph D., Forsberg U., Golubev P. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111. Art. № 112502.
5. *Gates J.M., Gregorich K.E., Gethe O.R. et al.* // Phys. Rev. C. 2015. V. 92. Art. № 021301.
6. *Kaji D., Morita K., Morimoto K. et al.* // J. Phys. Soc. Japan. 2017. V. 86. Art. № 034201.
7. *Khuyagbaatar J., Yakushev A., Düllmann Ch. E. et al.* // Phys. Rev. C. 2019. V. 99. Art. № 054306.
8. *Hofmann S., Heinz S., Mann R. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2016. V. 52. P. 180.
9. *Oganessian Yu.Ts., Utyonkov V.K., Lobanov Yu.V. et al.* // Phys. Rev. C. 2009. V. 79. Art. № 024603.
10. *Hofmann S., Heinz S., Ackermann D. et al.* // GSI Sci. Rep. 2012. P. 205.
11. *Düllmann Ch.E.* // EPJ Web Conf. 2016. V. 131. Art. № 08004.
12. *Brewer N.T., Utyonkov V.K., Rykaczewski K.P. et al.* // Phys. Rev. C. 2018. V. 98. Art. № 024317.
13. *Oganessian Yu.Ts., Utyonkov V.K., Lobanov Yu.V. et al.* // Nucl. Phys. A. 2004. V. 734. P. 109.
14. *Oganessian Yu.Ts., Utyonkov V.K., Lobanov Yu.V. et al.* // Phys. Rev. C. 2006. V. 74. Art. № 044602.
15. *Oganessian Yu.Ts., Abdullin F.Sh., Bailey P.D. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 104. Art. № 142502.
16. *Oganessian Yu.Ts., Abdullin F.Sh., Alexander C. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 109. Art. № 162501.
17. *Utyonkov V.K., Brewer N.T., Oganessian Yu.Ts. et al.* // Phys. Rev. C. 2015. V. 92. Art. № 034609.
18. *Utyonkov V.K., Brewer N.T., Oganessian Yu.Ts. et al.* // Phys. Rev. C. 2018. V. 97. Art. № 014320.
19. *Siwek-Wilczyńska K., Cap T., Kowal M. et al.* // Phys. Rev. C. 2012. V. 86. Art. № 014611.
20. *Zagrebaev V., Greiner W.* // Phys. Rev. C. 2008. V. 78. Art. № 034610.