УТВЕРЖДАЮ

Директор ЛЯР ОИЯИ

С.И. Сидорчук

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

15 октября 2025 г.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

**Научно-технического совета**

**Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ**

по диссертации **Шумейко Максима Владимировича** «Изучение свойств нейтронно-дефицитных ядер и сечений их образования в реакциях 238U + 40Ar, 232Th +48Ca и 239,240Pu + 48Ca», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Диссертационная работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований (ЛЯР ОИЯИ). В период подготовки диссертации Шумейко М.В. работал в должности младшего научного сотрудника ЛЯР ОИЯИ. Диссертационная работа была представлена Шумейко М.В. на Общелабораторном семинаре ЛЯР 18 сентября 2025 г., в котором приняли участие сотрудники различных подразделений ЛЯР и ОИЯИ. По результатам обсуждения было подготовлено **следующее заключение**:

**Актуальность работы.**

Исследование сверхтяжёлых ядер является одной из наиболее актуальных и интенсивно развивающихся областей современной ядерной физики. К настоящему времени наиболее тяжелым известным ядром является 294Og. Существование этого ядра, а также соседних сверхтяжелых нуклидов определяется влиянием сферических оболочек с *Z*=114-126 и *N*=184. Более легкие ядра, расположенные вблизи *Z*=108 и *N*=162, обладают повышенной стабильностью благодаря этим деформированным оболочкам. Промежуточная область между сферическими и деформированными сверхтяжелыми ядрами с замкнутыми оболочками, особенно ядер с четным *Z*, оставалась слабо изученной, в основном, из-за малых сечений образования таких ядер. Однако их свойства позволяют глубже понять масштаб влияния стабилизирующего эффекта оболочек.

Исследование нейтронно‑дефицитных сверхтяжелых ядер с 162 < *N* < 171 позволило впервые синтезировать и изучить ряд новых изотопов, обнаружить распады через разные уровни ядер, чего ранее не наблюдалось для других сверхтяжелых нуклидов, а также впервые наблюдать их распады в известные ядра, измерить сечения реакций на уровне пределов чувствительности эксперимента, достигнутого благодаря вводу в строй «Фабрики сверхтяжелых элементов» и нового сепаратора ядер DGFRS-2 ЛЯР ОИЯИ.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1) Впервые синтезирован изотоп 276Ds в 4*n* канале реакции 232Th+48Ca, впервые наблюдались изотопы 272Hs, 268Sg в качестве дочерних изотопов в цепочках α-распадов. Измерены периоды полураспада, энергии α-распада этих изотопов и вероятность распада ядра 276Ds по каналу спонтанного деления.

2) Впервые синтезирован изотоп 275Ds в 5*n* канале реакции 232Th+48Ca. Уточнение свойств известных изотопов 271Hs, 267Sg, 263Rf.

3) Обнаружение изомерных переходов между уровнями нечётных изотопов 271Hs, 267Sg, 263Rf.

4) Впервые измерена функция возбуждения 4-5*n* каналов реакции 232Th+48Ca. Показано, что в соответствии с падением расчетных барьеров деления ядер Ds сечение данной реакции оказалось в 20 и 2 раза ниже сечений образования изотопов элементов Hs и Cn соответственно.

5) Обнаружение изомерных переходов между уровнями нечётных изотопов 273Ds, 269Hs, 265Sg, 261Rf. Уточнены свойства этих ядер.

6) Впервые измерено сечение 5*n* канала реакции 238U+40Ar.

7) Впервые измерена энергия α-частиц 285Fl. Десятикратное увеличение числа синтезированных ядер позволило точнее определить радиоактивные свойства 285Fl и пяти его дочерних ядер вплоть до 265Rf.

8) Впервые наблюдалось спонтанное деление нового изотопа 284Fl.

9) Впервые измерены сечения 3-4*n* каналов реакции 239,240Pu+48Ca. Показано, что из-за падения барьеров деления ядер сечения снижаются соответственно в 50 и 4 раза в сравнении с сечениями реакций 242Pu+48Ca и 244Pu+48Ca.

**Научная новизна работы.**

Изучены радиоактивные свойства пяти впервые синтезированных изотопов: 284Fl, 275Ds, 276Ds, 272Hs, 268Sg. Обнаружены изомерные переходы между возбуждёнными энергетическими уровнями чётно-нечётных изотопов 271Hs, 269Hs, 267Sg, 265Sg, 261Rf, что даёт богатый материал для построения схемы энергетических уровней и понимания особенности тонкой структуры ядер в этом регионе карты радионуклидов. Измерены сечения реакций полного слияния 239Pu+48Ca, 240Pu+48Ca, 232Th+48Ca и 238U+40Ar. Уточнены свойства дочерних изотопов.

**Личный вклад автора.** Автор принимал активное участие в подготовке и проведении экспериментов, в анализе и обсуждении результатов, подготовке статей к публикации, представлении результатов на конференциях. Им написан набор программ для автоматической калибровки детекторов в аналоговой и цифровой системах, визуализации поступающих данных, автоматического поиска цепочек распада в он-лайн режиме и после окончания экспериментов. Автором были отобраны и проанализированы результаты экспериментов по изучению нейтронно-дефицитных ядер, ранее проведенных в Дармштадте (ФРГ), Беркли (США), Вако (Япония). Используя совокупность известных и полученных в диссертации данных, автором определены свойства распада ядер и сечения их образования.

**Достоверность и обоснованность** результатов подтверждается хорошим согласием полученных экспериментальных результатов с теоретическими предсказаниями и систематиками свойств ядер, следующими из результатов опытов по синтезу более тяжёлых изотопов флеровия 286-289Fl и их дочерних ядер на установках DGFRS-1, DGFRS-2, TASCA, BGS, с результатами опытов по синтезу 285Fl на сепараторе BGS, 273Ds на сепараторах SHIP и GARIS и 271Hs на он-лайн химическом сепараторе в Дармштадте.

**Практическая значимость работы.**

Синтез и исследование изотопов сверхтяжёлых элементов является важным направлением современной ядерной физики, которое способствует расширению фундаментальных знаний о структуре и свойствах атомных ядер, оболочечных эффектах, определяющих границы стабильности ядерной материи. Измерение функции возбуждения реакций полного слияния позволяет изучить закономерность изменения высоты барьера деления по мере удаления от предсказанных магических чисел нуклонов. Кроме того, измеренные сечения указанных реакций и радиоактивные свойства новых нуклидов могут использоваться при планировании экспериментов по синтезу соседних сверхтяжелых ядер, а также исследований в области фундаментальной химии сверхтяжёлых элементов. Обнаружение изомерных переходов между возбуждёнными энергетическими уровнями изотопов даёт ценный материал для построения схемы энергетических уровней и понимания особенности тонкой структуры ядер в этом регионе карты радионуклидов.

**Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем:** соискатель является соавтором 35 научных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 6 – в изданиях, рекомендованных ВАК и включенных в системы цитирования Scopus и/или Web of Science и РИНЦ.

Основные результаты работы представлены в следующих публикациях:

1) V.K. Utyonkov, N.T. Brewer, Yu.Ts. Oganessian, K.P. Rykaczewski, F.Sh. Abdullin, S.N. Dmitriev, R.K. Grzywacz, M.G. Itkis, K. Miernik, A.N. Polyakov, J.B. Roberto, R.N. Sagaidak, I.V. Shirokovsky, M.V. Shumeiko, Yu.S. Tsyganov, A.A. Voinov, V.G. Subbotin, A.M. Sukhov, A.V. Sabel’nikov, G.K. Vostokin, J.H. Hamilton, M.A. Stoyer, and S.Y. Strauss, Experiments on the synthesis of superheavy nuclei 284Fl and 285Fl in the 239,240Pu + 48Ca reactions, Physical Review C 92, 034609 (2015).

2) V.K. Utyonkov, N.T. Brewer, Yu.Ts. Oganessian, K.P. Rykaczewski, F.Sh. Abdullin, S.N. Dmitriev, R.K. Grzywacz, M.G. Itkis, K. Miernik, A.N. Polyakov, J.B. Roberto, R.N. Sagaidak, I.V. Shirokovsky, M.V. Shumeiko, Yu.S. Tsyganov, A.A. Voinov, V.G. Subbotin, A.M. Sukhov, A.V. Karpov, A.G. Popeko, A.V. Sabel'nikov, A.I. Svirikhin, G.K. Vostokin, J.H. Hamilton, N.D. Kovrizhnykh, L. Schlattauer, M.A. Stoyer, Z. Gan, W.X. Huang, L. Ma, Neutron-deficient superheavy nuclei obtained in the 240Pu+48Ca reaction, Physical Review C 97, 014320 (2018).

3) Yu. Ts. Oganessian, V. K. Utyonkov, M. V. Shumeiko, F. Sh. Abdullin, S. N. Dmitriev, D. Ibadullayev, M. G. Itkis, N. D. Kovrizhnykh, D. A. Kuznetsov, O. V. Petrushkin, A. V. Podshibiakin, A. N. Polyakov, A. G. Popeko, I. S. Rogov, R. N. Sagaidak, L. Schlattauer, V. D. Shubin, D. I. Solovyev, Yu. S. Tsyganov, A. A. Voinov, V. G. Subbotin, N. S. Bublikova, M. G. Voronyuk, A. V. Sabelnikov, A. Yu. Bodrov, Z. G. Gan, Z. Y. Zhang, M. H. Huang, and H. B. Yang, New isotope 276Ds and its decay products 272Hs and 268Sg from the 232Th+ 48Ca reaction, Physical Review C 108, 024611 (2023).

4) Yu. Ts. Oganessian, V. K. Utyonkov, M. V. Shumeiko, F. Sh. Abdullin, G. G. Adamian, S. N. Dmitriev, D. Ibadullayev, M. G. Itkis, N. D. Kovrizhnykh, D. A. Kuznetsov, O. V. Petrushkin, A. V. Podshibiakin, A. N. Polyakov, A. G. Popeko, I. S. Rogov, R. N. Sagaidak, L. Schlattauer, V. D. Shubin, D. I. Solovyev, Yu. S. Tsyganov, A. A. Voinov, V. G. Subbotin, N. S. Bublikova, M. G. Voronyuk, A. V. Sabelnikov, A. Yu. Bodrov, N. V. Aksenov, A. V. Khalkin, Z. G. Gan, Z. Y. Zhang, M. H. Huang, and H. B. Yang, Synthesis and decay properties of isotopes of element 110: 273Ds and 275Ds, Physical Review C 109, 054307 (2024).

5) M.V. Shumeiko, Yu.Ts. Oganessian, V.K. Utyonkov, K.P. Rykaczewski, F.Sh. Abdullin, N.T. Brewer, S.N. Dmitriev, R.K. Grzywacz, J.H. Hamilton, R.A. Henderson, M.G. Itkis, K. Miernik, A.N. Polyakov, J.B. Roberto, A.V. Sabelnikov, R.N. Sagaidak, I.V. Shirokovsky, M.A. Stoyer, V.G. Subbotin, A.M. Sukhov, Yu.S. Tsyganov, A.A. Voinov, G.K. Vostokin, Recent experiment on synthesizing flerovium isotopes in the reaction 239Pu + 48Ca, In Proc. of the International Symposium on Exotic Nuclei “EXON-2014”, Kaliningrad, Russia, 8-13 September 2014, p.257-261, Editors Yu.E. Penionzhkevich and Yu.G. Sobolev, World Scientific, Singapore, 2015.

6) A.A. Voinov, V.K. Utyonkov, N.T. Brewer, Yu.Ts. Oganessian, K.P. Rykaczewski, F.Sh. Abdullin, S.N. Dmitriev, R.K. Grzywacz, M.G. Itkis, K. Miernik, A.N. Polyakov, J.B. Roberto, R.N. Sagaidak, I.V. Shirokovsky, M.V. Shumeiko, Yu.S. Tsyganov, V.G. Subbotin, A.M. Sukhov, A.V. Sabelnikov, G.K. Vostokin, J.H. Hamilton, M.A. Stoyer, S.Y. Strauss, Study of neutron-deficient isotopes of Fl in the 239Pu, 240Pu + 48Ca reactions, Journal of Physics: Conference Series 724, 012059 (2016).

7) M.V. Shumeiko, V.K. Utyonkov, N.T. Brewer,Yu.Ts. Oganessian, K.P. Rykaczewski, F.Sh. Abdullin, S.N. Dmitriev, R.K. Grzywacz, M.G. Itkis, K. Miernik, A.N. Polyakov, J.B. Roberto, R.N. Sagaidak, I.V. Shirokovsky, Yu.S. Tsyganov, A.A. Voinov, V.G. Subbotin, A.M. Sukhov, A.V. Sabel’nikov, G.K. Vostokin, J.H. Hamilton, M.A. Stoyer, and S.Y. Strauss, Experiments on synthesis of superheavy nuclei 284Fl and 285Fl in the 239,240Pu + 48Ca reactions, In Proc. of the International Symposium on Exotic Nuclei “EXON-2016”, Kazan, Russia, 4-10 September 2016, p.205-209, Editors Yu.E. Penionzhkevich and Yu.G. Sobolev, World Scientific, Singapore, 2017.

8) M.V. Shumeiko, V.K. Utyonkov, N.T. Brewer, Yu.Ts. Oganessian, K.P. Rykaczewski, F.Sh. Abdullin, S.N. Dmitriev, R.K. Grzywacz, M.G. Itkis, K. Miernik, A.N. Polyakov, J.B. Roberto, R.N. Sagaidak, I.V. Shirokovsky, Yu.S. Tsyganov, A.A. Voinov, V.G. Subbotin, A.M. Sukhov, A.V. Karpov, A.G. Popeko, A.V. Sabel'nikov, A.I. Svirikhin, G.K. Vostokin, J.H. Hamilton, N.D. Kovrizhnykh, L. Schlattauer, M.A. Stoyer, Z. Gan, W.X. Huang, L. Ma, Study of Neutron-Deficient nuclei in the 239,240Pu+48Ca Reactions, In Proc. of the International Symposium on Exotic Nuclei “EXON-2018”, Petrozavodsk, Russia, 10-15 September 2018, p.250-255, Editors Yu.E. Penionzhkevich and Yu.G. Sobolev, World Scientific, Singapore, 2020.

9) Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, F.Sh. Abdullin, S.N. Dmitriev, D. Ibadullayev, M.G. Itkis, A.V. Karpov, N.D. Kovrizhnykh, D.A. Kuznetsov, O.V. Petrushkin, A.V. Podshibiakin, A.N. Polyakov, A.G. Popeko, R.N. Sagaidak, V.V. Saiko, L. Schlattauer, V.D. Shubin, M.V. Shumeiko, D.I.Solovyev, Yu.S. Tsyganov, A.A.Voinov, V.G. Subbotin, A.V. Sabelnikov, D. Abdusamadzoda, A.Yu. Bodrov, M.G. Voronyuk, G.A.Bozhikov, N.V. Aksenov, A.V. Khalkin, Z.G. Gan, Z.Y. Zhang, M.H.Huang, H.B. Yang, J.G. Wang, M.M. Zhang, and X.Y.Huang, Investigation of reactions with 50Ti and 54Cr for the synthesis of new elements**.** Physical Review C 112, 014603 (2025).

Диссертация «Изучение свойств нейтронно-дефицитных ядер и сечений их образования в реакциях 238U + 40Ar, 232Th +48Ca и 239,240Pu + 48Ca» Шумейко Максима Владимировича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

г. Дубна, 15 октября 2025 г.

В.К. Утенков

председатель НТС ЛЯР