

*Касмамытов Н.К., Хромушин И.В., Ермолаев Ю.В.*

**ЖОГОРКУ ЭНЕРГИЯЛУУ ЭЛЕКТРОНДОРДУН АГЫМЫНЫН  
ТААСИРИ АСТЫНДА ЦЕРАТ БАРИЙДИН НАНОСТРУКТУРАЛЫК  
КРИСТАЛЛАДАРЫНЫН ПАЙДА БОЛУШУ ЖАНА ӨСҮШҮ**

*Касмамытов Н.К., Хромушин И.В., Ермолаев Ю.В.*

**ОБРАЗОВАНИЕ И РОСТ НАНОСТРУКТУРНЫХ  
КРИСТАЛЛОВ ЦЕРАТА БАРИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ  
ПОТОКА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ**

*N.K. Kasmyatov, I.V. Khromushin, Yu.V. Ermolaev*

**THE FORMATION AND GROWTH OF NANOSTRUCTURAL  
CRYSTALS OF CERATH BARIA UNDER THE INFLUENCE  
OF THE FLOW OF HIGH-ENERGY ELECTRONS**

УДК: 621.762.4

Макалада энергиялары 1,3 МэВ болгон электрондордун нурлантуу дозаларын 1,5,7,10 жана 14 МГу өзгөртүү менен нурлантылган барийдин цератында ВаСеО<sub>3</sub> наножана микротүзүлүштөрдүн калыптанышынын жыйынтыктары келтирилген. Изилдөөлөр рентгенфазалык талдоо (РФТ), растрдык электрондук микроскопия (РЭМ), атомкүчтүк микроскопиясы (АКМ), дифференциалдык термалык талдоо (ДТТ) ыкмалары менен жүргүзүлдү. ВаСеО<sub>3</sub> ДТТсы орторомбдук торчонун Рт3т түзүлүшүндөгү кубтук торчого фазалык өтүшүн менен шартталган, ~ 950°С та жайланышкан эндотермалык чоку байкаларын көргөздү. Электрондор менен нурлантуунун дозасынын өсүшү, барийдин цератынын температурасынын, анын түзүлүшүнүн фазалык өтүүлөр аркылуу ырааттуу өзгөрүшүнө алып келген жогорулашына таасир кылат. Жогорку 1,3 МэВ энергиялуу электрондор менен нурлантууда жана нурлантуунун дозасы чоң болгондо барийдин цератында (ВаСеО<sub>3</sub> та) бири- бирине салыштырмалуу жарыш багытталышкан, өлчөмдөрү диаметринде 5÷10 нм, узундугу 20 дан 170 нм ге чейин болгон нанокристалдардын колониялары калыптанаары көргөзүлгөн.

**Негизги сөздөр:** барий цераты, электрон нурлануу, микро- жана нанотүзүлүштөр, касиеттер, рентгенография, электрондук микроскопия, атом күчтүк микроскопия, термодесорбциясы.

В статье представлены результаты формирования нано- и микроструктуры церата бария ВаСеО<sub>3</sub>, облученных электронами энергией 1,3 МэВ с вариацией доз облучения 1,5,7,10 и 14 МГу. Исследования проведены методами рентгенофазового анализа (РФА), растровой электронной микроскопии (РЭМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ), дифференциального термического анализа (ДТА). ДТА ВаСеО<sub>3</sub> показал, что наблюдается эндотермический пик ~ 950°С, который обусловлен фазовым переходом орторомбической решетки в кубическую решетку со структурой Рт3т. Возрастание доз облучения электронами на церат бария оказывает влияние на повышение её температуры,

приводящее к последовательной трансформации структуры церата бария путем фазовых переходов. Показано, что в процессе электронного облучения высоких энергий 1,3 МэВ и больших доз облучения в микроструктуре церата бария ВаСеО<sub>3</sub> формируется колонии нанокристаллов параллельно ориентированные относительно друг друга с размерами в диаметре 5÷10 нм и длиной от 20 до 170 нм.

**Ключевые слова:** церат бария, облучение электронами, микро- и наноструктура, свойства, рентгенография, электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, термодесорбция.

In the article presents the results of the formation of the nano- and microstructure of ВаСеО<sub>3</sub> cerath baria, irradiated by electrons with 1.3 MeV energy with variation scan doses of radiation 1,5,7,10 and 14 MGy. The studies were carried out by x-ray analysis (RFA), rastra electron microscopy (REM), atomic-force microscopy (ASM), differential thermal analysis (DTA). DTA ВаСеО<sub>3</sub> has shown that there is an endothermic peak of 950°С, which can be caused by the phase transition of the ortocombical lattice into a cubic grid with the Рт3т structure. Increasing doses of electron exposure to cerath baria has an effect on the increase in its temperature, leading to a consistent transformation of the structure of cerath baria through phase transitions. It is shown that in the process of electronic irradiation of high energies 1.3 MeV and large doses of radiation in the microstructure of the cerath barium ВаСеО<sub>3</sub> formed colonies of nanocrystals in parallel oriented relative to each other with sizes in diameter of 5 to 10nm and long of 20 to 170 nm.

**Key words:** barium cerate, electron irradiation, micro- and nanostructure, properties, X-ray diffraction, electron microscopy, atomic force microscopy, thermal desorption.

**Введение.** В процессе эксплуатации атомных реакторов имеет место образование водорода за счет радиолитического распада воды и целого ряда других реакций, детально описанных в работах [1-4]. Общеизвестно, что образовавшийся водород при контакте с кислородом образует чрезвычайно взрывоопасную гремучую смесь.

Решение проблемы надежного контроля содержания водорода и кислорода в первом контуре реактора и производственных помещениях АЭС является важной задачей. Ряд наблюдавшихся аварийных ситуаций на атомных электростанциях, обусловленных накоплением водорода, свидетельствуют о несовершенстве систем обеспечения водородо-взрывобезопасности (СОВБ) на АЭС и требуют поиска новых эффективных решений [5-7]. Следует отметить, что актуальность проблем СОВБ на АЭС существенно возросла после аварии на Фукусиме, когда весь мир стал свидетелем взрывов гремучей смеси на всех блоках АЭС [8]. Вызовы времени интенсифицировали работы по поиску высокоэффективных средств и материалов для повышения СОВБ на АЭС.

В настоящее время электрохимические устройства, работающие на основе твердооксидных ионных проводников (ТОИП) с протонной проводимостью являются перспективными для СОВБ АЭС. Главным достоинством ТОИП является широкий диапазон рабочих температур, очень высокая чувствительность к наличию водорода в среде. ТОИП позволяет контролировать содержание водорода в помещении и осуществлять его откачку, т. е., предотвращать повышению концентрации водорода в газовых смесях выше предельно допустимого значения [9,10].

К недостаткам электрохимических устройств на основе оксидных керамик с протонной проводимостью относят высокую реакционную способность этих материалов к диоксиду углерода, а также недостаточностью величины протонной проводимости. Для повышения протонной проводимости и придания этим оксидным керамикам необходимых величин протонной проводимости вводят в их кристаллическую решетку локальное искажение вблизи катиона-допанта. В связи с этим материаловедами и физиками твердого тела ведутся интенсивные исследования по созданию новых перовскитных материалов с более высокой проводимостью и химической стабильностью. В настоящее время разработаны ионные проводники со структурой перовскита и флюорита, обладающие соответственно протонной и кислород - ионной проводимостью. Поскольку постольку возможности синтеза новых композитов ограничены, поэтому исследования ученых направлены на улучшение свойств протонной проводимости в уже зарекомендовавших себя перовскитных материалах путем их модифицирования.

Известно, что среди ионных проводников бариевые и стронциевые цераты обладают наиболее высокой протонной проводимостью, но они проявляют существенную нестабильность в атмосфере диоксида

углерода и помимо этого введение в их кристаллическую решетку искажений посредством примесного катиона допанта отрицательно влияет на протонную проводимость.

Представляло интерес исследовать возможность получения высокоэффективных протонных проводников с целью повышения СОВБ на АЭС путем радиационной модификации перовскитной структуры церата бария  $\text{BaCeO}_3$  и улучшения их протонной проводимости и химической инертности посредством электронного облучения с энергией 1.3 МэВ до доз облучения 14 МГу.

Выбор облучения высокоэнергетическими электронами в качестве модифицирующего фактора обусловлен особенностями образования радиационных дефектов в кристаллической решетке церата бария. Отметим, что высокая энергия 1.3 МэВ позволяет электронам проникать в церат бария глубиной более миллиметра. В связи с этим толщину опытных образцов церата бария изготавливали в виде пластин толщиной 1 мм, для того чтобы высокоэнергетические электроны облучали весь объем керамики, а не только ее приповерхностный слой, как это происходит в случае тяжелых ионов [11,12]. С другой стороны известно, что электрические свойства диэлектриков существенно зависят от изменения ширины запрещенной зоны, т.е. особенностей расположения валентной зоны и зоны проводимости. Основная идея заключалась в том, что формирование точечных дефектов под действием облучения могут оказать модифицирующее воздействие на электронную структуру церата бария и существенно улучшить его проводящие свойства. На основе результатов предварительных исследований, выполненных ранее [13,14] показано, что под действием облучения может иметь место частичное восстановление катиона от  $\text{V}^{4+}$  до  $\text{V}^{3+}$  в В-узлах перовскитной решетки  $\text{BaCeO}_3$ . Процесс восстановления является следствием образования радиационных дефектов, а именно, кислородных вакансий. Изменение валентности собственного катиона – «хозяина» исключает отрицательный вклад примесного иона-допанта в искажение решетки оксида, что в итоге может улучшить его проводящие свойства.

**Экспериментальная часть.** Для исследования формирования микроструктуры и проводящих свойств опытной керамики были изготовлены пять партий образцов из недопированного церата бария  $\text{BaCeO}_3$ , которые подвергались облучению электронами с энергией 1.3 МэВ. Каждая партия образцов соответственно облучалась до различных доз 1,5,7,10 и 14 МГу. Образцы изготавливались в виде тонких дисков толщиной ~ 1 мм. Поверхность образцов церата бария

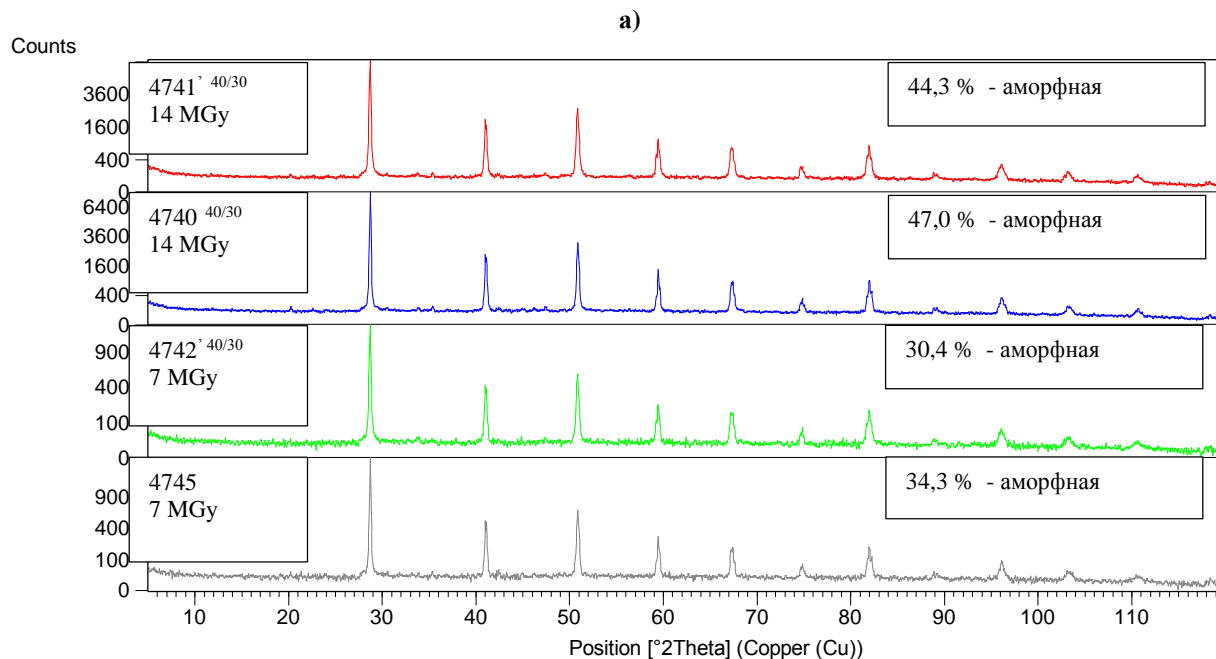
предварительно отшлифовывали и после этого отжидали при температуре 650°C в течение 7 часов. После отжига опытные образцы не сразу подвергались облучению, а спустя 30 суток. В течение этого времени образцы находились на воздухе. Для изучения термической стабильности церата бария использовали образцы с массой около 30 мг. Исходные образцы церата бария перед облучением отжигались на воздухе при температуре 650°C в течение 7 часов.

Исследование особенностей формирования микроструктуры и свойств церата бария облученных электронами выполнены с использованием ряда современных, взаимодополняющих методов исследования. Рентгенофазовый анализ структуры осуществляли с помощью дифрактометра X'PERT PRO. Электронно-микроскопические исследования поверхности опытных образцов осуществляли с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) японского производства JEOL JSM-6490 LA с микрорентгеноспектральным анализатором. Исследование рельефа поверхности церата бария проводили с использованием атомно-силового микроскопа NT-MDT. Изучение состояния протонов и углеродных примесей проводили методом инфракрасной спектроскопии (Инфракрасный Фурье спектрометр IA-Prestige-21). Термогравиметрический анализ и дифференциальный термический анализ образцов церата бария проводили с использованием термо-анализатора марки EXSTAR-6000. Термодесорбционные спектроскопические ис-

следования проводили с использованием радиочастотного масс-спектрометра MX-7304;

**Рентгеноструктурные исследования.** Рентгеноструктурные исследования были выполнены на медном катоде в излучении  $\text{CuK}_\alpha$  – при двух различных напряжениях на рентгеновской трубке 40 и 30 кВ и токах 30 и 10 мА соответственно. Рентгенографический анализ позволил количественно оценить аморфную и кристаллическую составляющую в церате бария  $\text{BaCeO}_3$  с помощью программного обеспечения X'PertProScore.

Рентгенограммы церата бария, полученные в режимах рентгеновской съёмки (40/30) и (30/10) представлены на рисунках 1 а, б. Анализ рентгенограмм показывает, что расположение дифракционных пиков-рефлексов практически не отличаются друг от друга в зависимости от режимов съёмки и соответствуют перовскитной структуре  $\text{BaCeO}_3$ . Отличаются рентгенограммы только степенью аморфизации керамики в зависимости от дозы облучения электронами и проникновения рентгеновских лучей от поверхности в глубину образца. Например, при дозе облучения 14 MGy со стороны поверхности облучения фиксируется 44,3% аморфной составляющей в керамике, а при дозе облучения 7 MGy с той же поверхности составляет 30,4%. На рентгенограммах, снятых с противоположной стороны облученной поверхности образца при соответствующих дозах облучения аморфизация структуры принимает значения 47,0 и 34,3%.





С увеличением дозы облучения до 10 MGy на поверхности церата бария существенно увеличивается (на ~20%) концентрация кислорода и в свою очередь уменьшается процентная концентрации атомов бария и церия в сумме тоже приблизительно на 20%. На рисунке 2а представлен вид спектра соответствующий электронно-микроскопическому снимку поверхности церата бария (рис. 2б). Из таблицы 1 видно, что облучение церата бария электронами до высоких доз облу-

чения приводит к существенному увеличению концентрации кислорода и уменьшению концентрации бария и церия на поверхности церата бария.

**Микроскопические исследования.** Поверхность церата бария наблюдаемая на РЭМ при невысоких увеличениях x300, x500, x2000 показала, что после различных доз облучения поверхность церата бария имеет вид плотно упакованных чешуек с явной неоднородностью.

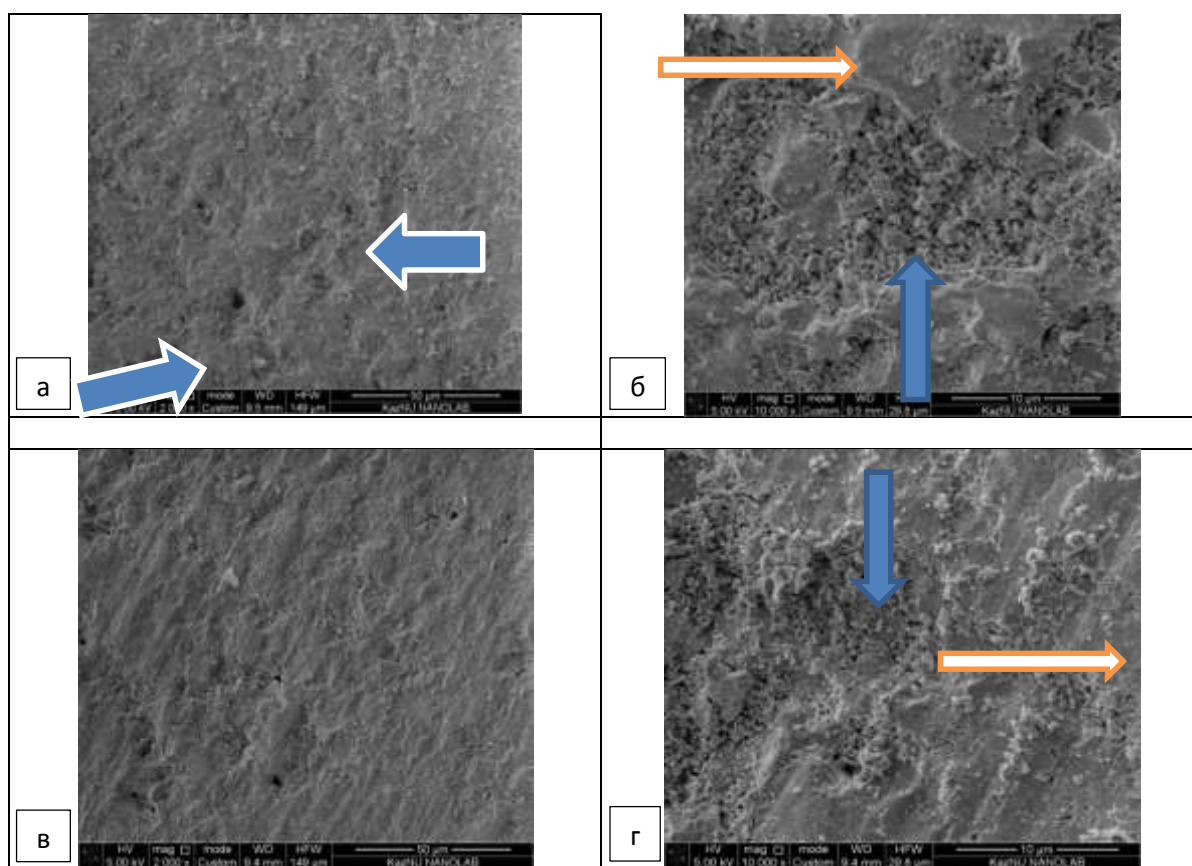


Рис. 3 а-г. Микроструктура поверхности церата бария облученные электронами: а,б) доза облучения 7MGy; в,г) 14MGy.

На рисунках 3 и 4 стрелками выделены отдельные участки фрагментов микроструктуры на поверхности церата бария, с помощью которых можно качественно охарактеризовать изменение микроструктуры поверхности в зависимости от роста дозы облучения.

Плотная поверхностная пленка церата бария после облучения электронами частично разрушается и становится на отдельных поверхностных участках разрывистой, т.е. разрушается с образованием кратерных впадин с шероховатой поверхностью (рис. 3 а-г).

По периметру кратерных впадин с иррегулярной формой остаются участки с относительно гладкой и плотной поверхностью на рисунке 3 б, г отмеченные белыми стрелками с оранжевой окантовкой. Из рисунка 3а-г видно, что в тонком слое поверхности образцов церата бария после увеличения доз облучения на отшлифованной поверхности образца церата бария постепенно с ростом доз облучения формируется микрошероховатость. Причем, чем выше доза облучения, тем ярче наблюдается формирование микрошероховатости с постепенным образованием микропористости.

Такое изменение поверхности церата бария следует связывать с частичной неравномерной эрозией поверхности образца под воздействием рассматриваемых режимов воздействия высокоэнергетических

электронов. Поверхность становится дефектной в отдельных участках наблюдаются ямочные дефекты различных размеров как по глубине, так и диаметру (рис. 3 а-г).

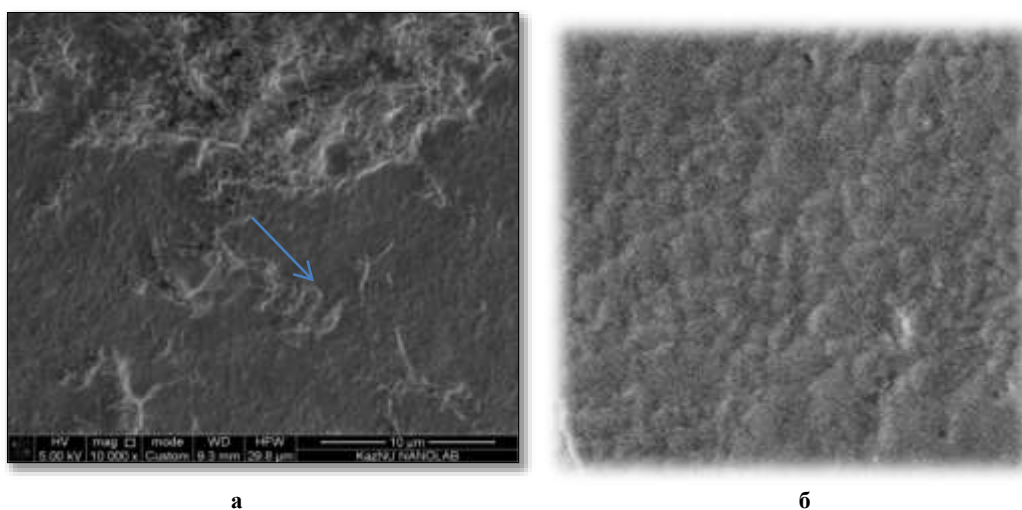
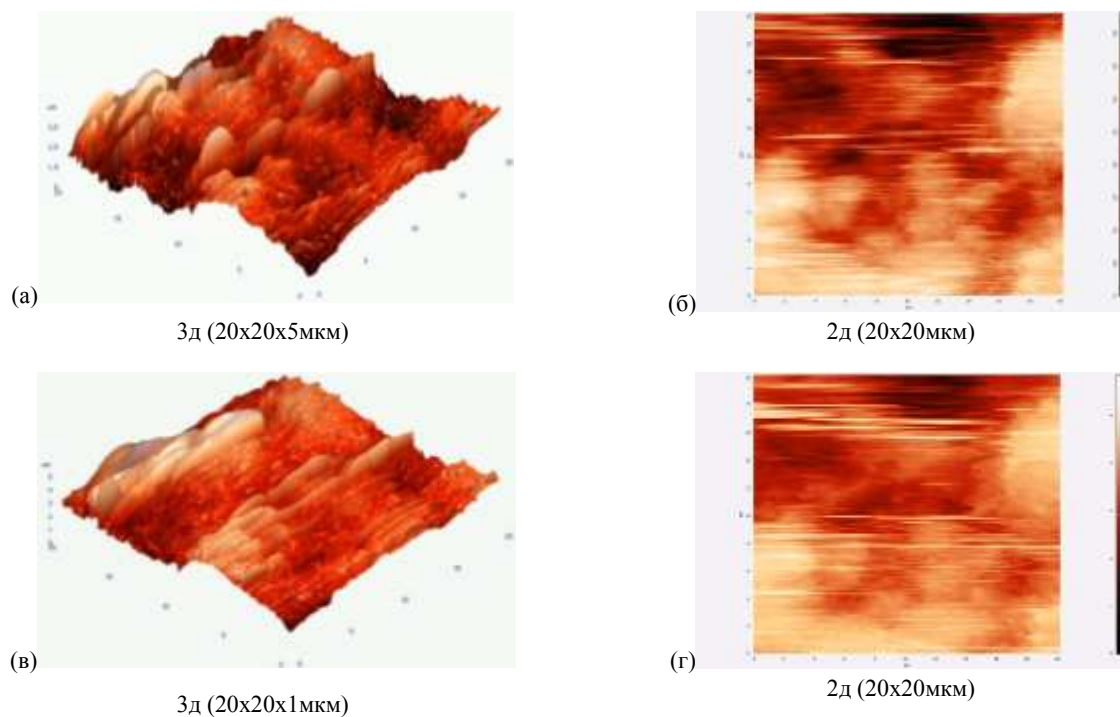
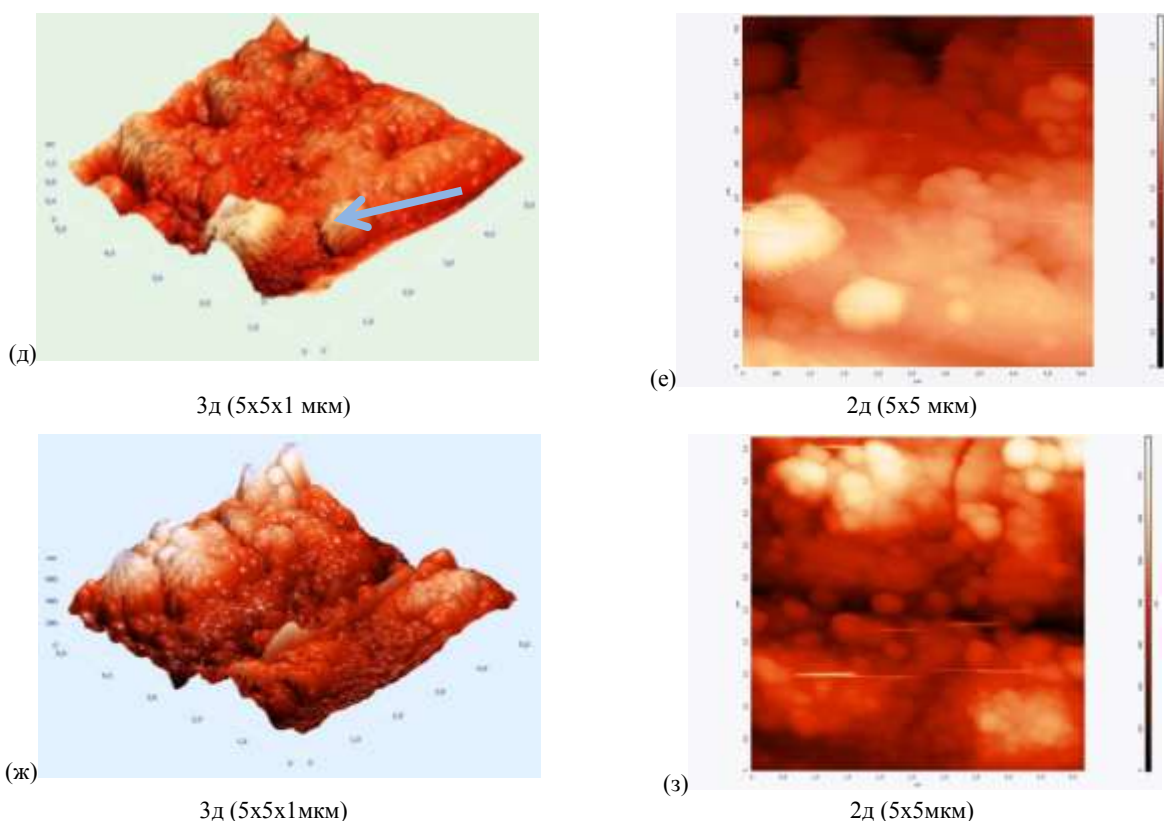


Рис. 4 а,б. Фрагмент микроструктуры поверхности церата бария, облученного электронами при 7МГу с высоким разрешением РЭМ.





**Рис. 5 а-з.** АСМ микрофотографии поверхности церата бария, облученного электронами при дозе 14 МГу: 3д - на рисунках 5 а, в, д, ж – трехмерное изображение, а рисунки 5 б, г, е, з – соответственно тот же участок, но в двухмерном изображении 2 д; а-г – верхняя сторона поверхности образца; д-з – обратная (противоположная) сторона поверхности опытного образца.

И так, микроскопический анализ микроструктуры показывает, что в отдельных местах поверхности церата бария имеются участки с относительно высокой плотностью, на фотографиях (рис. 3 б,г). отмеченные белыми стрелками с оранжевой каемкой, а на рисунке 4а и синей стрелкой) эти участки имеют относительно гладкую поверхность. С другой стороны, на микрофотографиях церата бария отчетливо видны области подвергнутые облучению высокоэнергетическими электронами. В результате их действия на поверхности образцов наблюдаются разрыхленные участки микроструктуры с высокой микрошероховатостью, где наблюдаются микропоры. На фотографиях они имеют темный контраст в виде черных точек (рис. 3 а-г). Из рисунка 4 а,б видно, что микроструктура поверхности формируется в виде плоско-холмистых образований различных размеров 1-5мкм,

в которых имеются более светлые точечные микро вкрапления. Отметим, что плоско-холмистые образования не имеют четкой огранки зерен.

На рисунке 5 а-з представлены микрофотографии АСМ, полученных с поверхности церата бария после облучения опытных образцов до доз 7 МГу. Исследование микроструктуры методом АСМ проводилось как с облученной, так и с необлученной стороны поверхностей дисковых образцов церата бария в целом можно отметить о аналогичности в формировании микроструктуры поверхностей для обеих сторон. На АСМ фотографиях поверхность церата бария изображены в трехмерном ракурсе (рис. 5 а,в,д,ж), а на рисунке 5 б,г,у,з эти же участки показаны в двухмерном изображении. Сравнивая соответствующие микрофотографии трехмерных и двухмерных изображений поверхности церата бария можно заметить, что

основания у «овальных холмов-ребень», изображенные в трехмерном ракурсе на двухмерных микрофотографиях соответственно выглядят либо в виде округлой формы, либо как искаженные чрезмерно вытянутых эллипсов с размытыми границами. АСМ сканирование проводили с квадратных площадей размерами 20x20 мкм и 5x5 мкм. Высота образующихся «ребешков» достигала 2 мкм. Природа и структура таких пластинчатых кристаллов церата бария требует отдельного изучения.

Представляло интерес провести сравнительный анализ микрофотографий РЭМ и АСМ, поскольку обе методики являются взаимодополняющими при исследовании различных структурных нюансов морфологии поверхности поликристаллических керамических материалов. Из рис. 5д-з видно, что у опытных образцов церата бария после облучения их электронами высокой энергии в микроструктуре наблюдаются овальные фрагменты, в которых наблюдается характерная микропористая структура.

Высокая разрешающая способность АСМ при больших увеличениях съёмки удалось выявить образование и рост целых колоний параллельно ориентированных относительно друг друга наноструктурных кристаллов цератов бария под воздействием высокоэнергетических электронов с большой дозой облучения. Анализ контрастности изображения выросших наноструктурных кристаллов церата бария на приведенных микрофотографиях АСМ (рис. 6 а,б) показывает, что их форма представляет собой прямолинейные игольчато-столбчатые кристаллы. Из рисунка ба видно, что в поперечном сечении сформировавшиеся игольчато-столбчатые нанокристаллы церата бария в первом приближении по форме они представляет собой форму в виде равностороннего прямоугольника. Хотя из-за нечёткости изображения, обусловленной недостаточностью разрешающей способности, можно также утверждать, что сформировавшиеся нанокристаллы церата бария имеют форму вытянутых сплошных цилиндров и в поперечном сечении имеют близ-

кую к округлой форме. В диаметре игольчато-столбчатые нанокристаллы церата бария составляют 5÷10 нм, по длине они вырастают до различных размеров и достигают различных величин по длине от ~20 до 150 нм. Предварительно с некоторой вероятностью можно предположить, что под воздействием высокоэнергетических электронов опытные образцы церата бария нагреваются до высоких температур ~950°C когда активно протекают диффузионные и фазовые переходы, в частности перестраивается кристаллическая решётка церата бария с орторомбической решетки в кубическую со структурной симметрией  $R\bar{3}m$ . Очевидно, в процессе этих явлений переноса и трансформации кристаллической решётки церата бария формируются колонии прямолинейных игольчато-столбчатых нанокристаллов. Известно, что формирование и наличие нанокристаллов в оксидосодержащих керамиках существенно улучшают их физико-механические свойства, но каким образом это повлияет на протонную проводимость церата бария пока неизвестно. Для изучения и выявления точного механизма формирования колоний наноструктурных кристаллов церата бария в процессе облучения высокоэнергетическими электронами требует отдельных дополнительных исследований, поэтому в рамках данной статьи этот физико-химический аспект детально не рассматривается. Их детальное изучение – это предмет дальнейших исследований.

**Дифференциальный термический анализ.** Дифференциальный термический анализ выполнен в проточной атмосфере высокочистого азота на опытных образцах церата бария как необлученных, так и облученных высокоэнергетическими электронами. Установлено, что в диапазоне температур 200÷1000°C наблюдаются три последовательных фазовых перехода, причем при трёх различных температурах 270, 392 и 950°C. Оказалось, что на недопированных образцах церата бария фазовые переходы проявляются более четким пиком ДТА, чем у допированных цератов бария независимо от того облучены или не облучены опытные образцы церата бария.



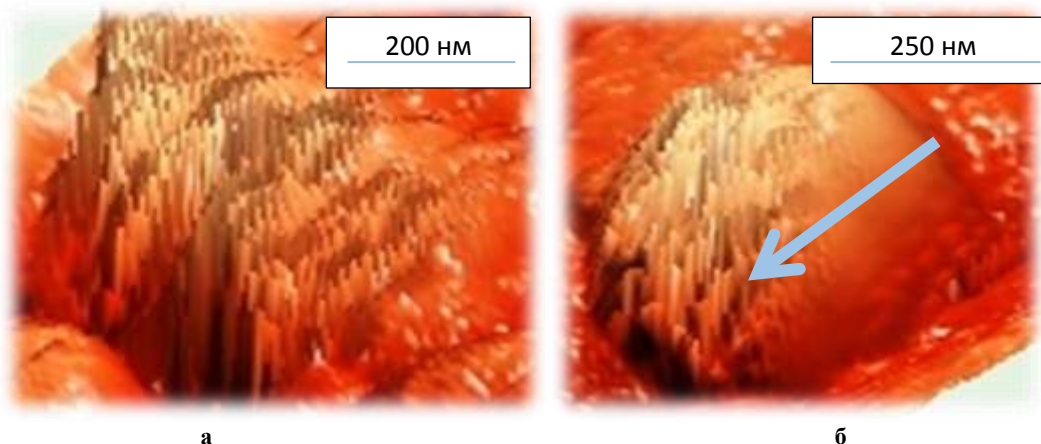


Рис. 6 а, б. Колонии наноразмерных игольчато-столбчатых кристаллов церата бария сформировавшиеся под действием облучения потоком высокоэнергетических электронов: а, б) различные фрагменты участков поверхности  $\text{BaCeO}_3$  при облучении электронов с энергией  $E_{\text{эл}}=1,3$  МэВ и с дозой облучения соответственно 7 МГу (а) и 14 МГу (б).

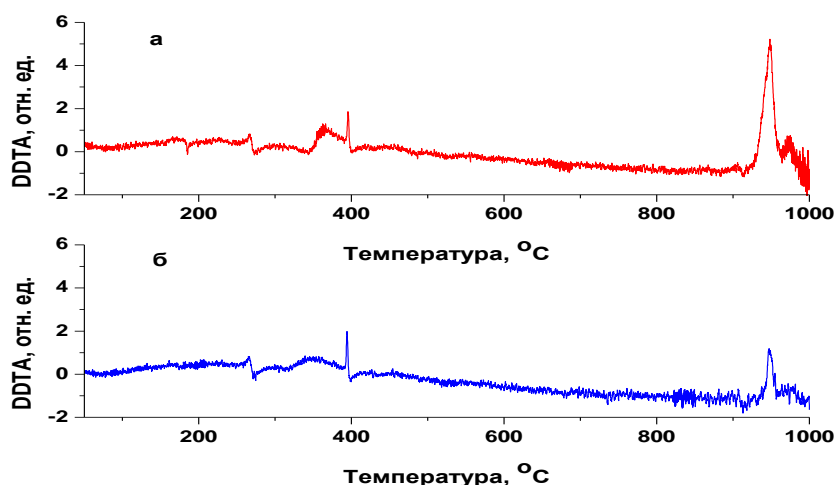


Рис. 7 а, б. ДТА образцов  $\text{BaCeO}_3$ : а – исходный, не отожженный образец; б – после отжига на воздухе при  $650^\circ\text{C}$ .

На основе ДТА пиков (рис.7 а, б) и в результате их сравнения с литературными данными [15] можно утверждать, что переходы, обнаруженные при температурах 270 и  $392^\circ\text{C}$ , обусловлены последовательными превращениями церата бария с примитивной орторомбической решетки  $Rmnc$  в объёмноцентрированную решётку  $Insp$  ( $\sim 270^\circ\text{C}$ ) с последующим её превращением в ромбоэдрическую  $F3\bar{2}/n$  решётку при температуре  $\sim 392^\circ\text{C}$ .

Фазовый переход, наблюдаемый при температуре  $950^\circ\text{C}$ , обусловлен превращением ромбоэдрической решетки церата бария в кубическую структуру  $Rm3m$ . И так, было обнаружено, что облучение

$\text{BaCeO}_3$  электронами до дозы 7 МГу, наблюдается заметный рост интенсивности пика (рис. 7 а, б), что соответствует фазовому переходу при температуре  $\sim 950^\circ\text{C}$ . Следует отметить, что интенсивность пика ДТА обусловлена фазовым переходом при температуре  $950^\circ\text{C}$ , причем сам пик заметно выше на не отожжённых образцах церата бария, а у отожжённых при  $650^\circ\text{C}$ -7ч. пик ниже приблизительно 2,5 раза.

#### Заключение.

1. Исследованы особенности формирования микроструктуры и физические свойства церата бария до и после облучения электронами с энергией 1.3 МэВ до доз 1, 5, 7, 10 и 14 МГу.

2. Установлено, что в процессе электронного облучения высоких энергий 1,3 МэВ и больших доз облучения в микроструктуре церата бария  $BaCeO_3$  формируется колонии нанокристаллов параллельно ориентированные относительно друг друга с размерами в диаметре  $5 \div 10$  нм и длиной от 20 до 170 нм.

3. Формирование и рост колоний игольчато-столбчатых нанокристаллов церата бария обусловлено нагревом опытных образцов под действием высокоэнергетического электронного облучения, которое при определенных температурах сопровождается последовательными фазовыми трансформациями кристаллической решетки.

4. Количественный анализ по выявлению степени аморфизации керамических образцов церата бария по данным рентгенографии показало, что дефектность облученного церата бария симбатна дозе (14 MGy) облучающих электронов и значения изменяются от 47,0% до 26,5% и также прослеживается рост степени аморфизации с глубиной рассеяния электронного пучка при дозе 7 MGy.

5. Методами растровой электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии установлена морфология поверхности церата бария после различных доз облучения высокоэнергетическими электронами. Установлено, что структурные зерна церата бария имеют микропористость.

6. Микрорентгеноспектральным анализом установлено, что после облучения электронами кристаллическая структура у поверхности церата бария насыщается атомами кислорода, причём его количество растёт с нарастанием дозы электронного облучения.

#### Литература:

1. Пикаев А.К., Кабакчи С.А., Макаров И.Е. Высокотемпературный радиолиз воды и водных растворов. - М.: Энергоатомиздат. - 1988. - 136 с.
2. Кабакчи С.А., Булгакова Г.П. Радиационная химия в ядерном топливном цикле. НИФХИ им. Л.Я. Карпова, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 1997. - 298 с., гл. 9, <http://www.chemnet.ru/rus/teaching/kabakchi/welcome.html>.
3. Физическая химия. Теоретическое и практическое руководство. Под редакцией Б.П. Никольского. - М.: Химия. - 1987. - 374 с.
4. Гальчинецкий Л.П., Гринёв Б.В., Дульфан А.Я. Взаимодействие реакторных материалов с водяным паром и кислородом. // Наука инновации. - 2013. - Т.9. №3. - С. 5-12.
5. Xiong J., Yang Y., Cheng X. CFD Application to Hydrogen Risk Analysis and PAR Qualification. // Science and Technology of Nuclear Installations. - 2009. - Vol. 2009. - P.10.
6. Baronov G.S., Davidov Y.G., Ershov D.E., Furkasov D.E., Kalinnikov A.A. Hydrogen Mitigation Technical Means of Nuclear Power Plants. // Hydrogen Behavior and Mitigation in Water-Cooled Nuclear Power Reactors: Proceedings Workshop. Brussels. - 1991. - P.4.
7. Калякин С.Г., Вашляев Ю.Н., Сумин Д.В. Разработка новых систем водородной безопасности и их испытание в условиях запроектной аварии на АЭС. // Доклады Межотраслевой тематической конференции «Теплогидравлические аспекты безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах». Обнинск. - 2005. - С.197.
8. Авария на АЭС Фукусима - [ru.wikipedia.org/wiki/](http://ru.wikipedia.org/wiki/)
9. Schober T., Krug F., Schilling W. Criteria for the Application of High Temperature Proton Conductors in SOFCs. // Solid State Ionics. - 1997. - Vol.97. - P.369-373.
10. Kreuer K.D. On the Development of Proton Conducting Materials for Technological Applications. // Solid State Ionics. - 1997. - Vol.97, №1-4. - P.1-15.
11. Kim J., Tsuchiya B., Nagata S., Shikama T. Effect of Ion Beam Surface Modification on Proton Conductivity of  $BaCe_{0.9}Y_{0.1}O_{3-y}$ . // Solid State Ionics. - 2008. - Vol.179. - P.1182-1186.
12. Хромушин И.В., Аксенова Т.И., Мунасбаева К.К., Жотабаев Ж.Р., Тусеев Т.Т., Дегтярев В.В., Русакова А.В. Модифицирование твердооксидных протонных проводников ионами кислорода и аргона. // Тезисы докладов 8-ой Международной конференции «Ядерная и радиационная физика». Алматы. - 2011. - С.72.
13. Tsuchiya B., Morono A., Hodgson E.R., Nagata S., Shikama T. Change in Hydrogen Absorption Characteristic of  $SrCe_{0.95}Yb_{0.05}O_{3-\delta}$  by Electron Beam Modification. // Solid State Ionics. - 2008. - Vol.179. - P.909-912.
14. Tsuchiya B., Morono A., Hodgson E.R., Nagata S., Shikama T. Radiation-Induced Changes in Electrical and Proton Conductivities of  $BaCe_{0.9}Y_{0.1}O_{3-\delta}$  upon Irradiation by Electron Beams. // Solid State Ionics. - 2010.-Vol.181.-P.92-96.
15. Knight K.S. Structural Phase Transition, Oxygen Vacancy Ordering and Protonation in Doped  $BaCeO_3$ : Results from Time-of-Flight Neutron Powder Diffraction Investigations. // Solid State Ionics. - 2001. - Vol.145. - P.275-294.
16. Khromushin I.V., Aksenova T.I., Tuseev T., Munasbaeva K.K., Ermolaev Yu.V., Ermolaev V.N., Seitov A.S. Particularities of Radiation Defect Formation in Ceramic Barium Cerate. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2015. - V.8.-1012037 doi:10.1088/1757-899X/81/1/012037.
17. Касмамытов Н.К., Ермолаев Ю.Н., Хромушкин И.В. Исследование структуры и свойств керамического церата бария, облученного ионами инертных газов. // Вестник ОшТУ, №1. - 2018. - С.33-38.
18. Kasmamytov N.K., Yermolayev Y.V., Khromushin I.V. Radiation modification of  $BaCe_{0.85}Nd_{0.25}O_{2.925}$  /Alternative energy sources, materials and technologies (AESMT-19) // 2-4 June, 2019/ - Sofia, Bulgaria.