

Технология обработки поверхностей микрокристаллов воздействием высокоэффективных технологий

Т.В. Губарева

Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

tvgbratsk@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8112-6091>

Статья поступила 03.02.2020, принята 19.02.2020

В статье рассмотрены вопросы, связанные с обработкой микрокристаллов щелочно-галогидных соединений для получения на их поверхности пленок, состоящих из твердых продуктов, в условиях воздействия ионизирующих излучений. Рассмотрены типы микрокристаллов в зависимости от их исходных размеров и структурного состояния. Изучены свойства микрокристаллов, обработанных с использованием предлагаемых методик. При исследовании структуры и свойств кристаллов, для описания изменений строения поверхности микрокристаллов, происходящих при обработке, был выбран электронно-микроскопический анализ. Исследования проводились с использованием метода угольных реплик. Для изучения структуры твердых продуктов реакций применялись различные методы рентгеноструктурного анализа. Спектроскопия в инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра послужила основой для изучения оптических характеристик обработанных кристаллов и идентификации образующихся соединений. Выполнено исследование системы «кристалл – воздух» в соответствии с изменяющимися условиями, а именно: действие различных ионизирующих излучений с изменяющимися дозами; действие изменения влажности и давления воздуха; изменение температуры; оптимизация исследований благодаря использованию кристаллов в нитевидной форме и в виде порошков. Главной целью работы является обоснование методов обработки щелочно-галогидных кристаллов для получения на их поверхности твердых продуктов в виде нитратов щелочных металлов, а также для получения информации о свойствах этих кристаллов, имеющейся в радиационной физике твердого тела. Развитие теоретических и прикладных аспектов, совершенствование методов изучения щелочно-галогидных кристаллов обеспечивают значительное расширение сфер внедрения результатов, полученных в ходе исследования.

Ключевые слова: щелочно-галогидные кристаллы; ионизирующие излучения; методология исследования; рентгеноструктурный анализ; электронная микроскопия; инфракрасные спектры.

Microcrystal surface treatment technology based on high-energy processing

T.V. Gubareva

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

tvgbratsk@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8112-6091>

Received 03.02.2020, accepted 19.02.2020

The article deals with the issues associated with the processing of microcrystals of alkali-halide compounds to obtain films consisting of solid products on their surface under the influence of ionizing radiation. The types of microcrystals are considered depending on their initial sizes and structural state. The properties of microcrystals processed using the proposed methods have been studied. When studying the structure and properties of crystals, to describe the structural changes in the surface of microcrystals that occur during processing, electron-microscopic analysis is selected. The studies were carried out using the coal replica method. The study of the structure of solid reaction products was carried out using various methods of x-ray diffraction analysis. Spectroscopy in the infrared and ultraviolet spectral regions was used to study the optical characteristics of the processed crystals, as well as a method for identifying the resulting compounds. A study of the "crystal - air" system in accordance with changing conditions was performed, namely: the effect of various ionizing radiation with varying doses; the effect of changes in humidity and air pressure; temperature change; research optimization through the use of crystals in the form of filamentary and in the form of powders. The main goal of the work is to substantiate the processing methods of alkali-halide crystals to obtain solid products in the form of alkali metal nitrates on their surface, as well as to obtain information on the properties of these crystals available in solid state radiation physics. The development of theoretical and applied aspects, improvement of methods for studying alkali-halide crystals provides a significant expansion of the scope of implementation of the results obtained in the study.

Keywords: alkali-halide crystals; ionizing radiation; research methodology; X-ray diffraction analysis; electron microscopy; infrared spectra.

Введение. Изучению воздействия высокоэнергетических излучений на различные материалы посвящено большое количество исследований. Поведение материалов в данных условиях является главным фактором, определяющим их применение для изготовления конструкций современной энергетики. Применение материалов требует знания их свойств, в том числе обусловленных воздействием облучения. Разработка таких материалов проводится в сочетании с предварительным испытанием материалов и конструкций в условиях различных видов облучения. Часто реальные условия эксплуатации различных установок не воспроизводятся полностью условиями испытаний, поэтому необходимо установить общие закономерности поведения материалов при облучении [1; 2].

Проведение исследований материалов в различных условиях позволяет изучить различные физические процессы, протекающие в твердых телах под действием излучений, которые влияют на их структуру и свойства. Установлена определяющая роль процессов смещения атомов из узлов кристаллической решетки с образованием точечных радиационных дефектов и их комплексов (кластеров, дислокационных петель, пор и др.). Радиационные повреждения, создающиеся в твердых кристаллических телах под действием излучений, разрушают структуру твердых кристаллических тел [1–4].

Облучение является способом одновременного значительного изменения и структуры, и свойств материалов, которое поддается дозированию и качественному изменению. Облучение можно использовать как метод воздействия на структурно-фазовое состояние материалов для целенаправленного получения нужных свойств. Многие радиационные эффекты экспериментально исследуются в имитационных экспериментах при облучении в ускорителях, плазменных установках, нейтронных источниках и др. [5–6].

Основными направлениями исследования влияния облучения на материалы являются [5]:

- изучение изменения свойств при облучении реакторных материалов, имеющих практическое использование;

- исследование радиационных повреждений в материалах с целью разработки новых радиационно-стойких композиций;

- использование облучения как инструмента для регулируемого введения в материалы элементов и различного типа дефектов.

Многие радиационные эффекты экспериментально исследуются в имитационных экспериментах при облучении в ускорителях, плазменных установках, нейтронных источниках и др.

Щелочно-галогенидные кристаллы (ЩГК) не являются широко распространенными конструкционными материалами, однако часто используются как модельные объекты при изучении процессов воздействия излучений на твердые тела. В настоящей работе использовано рентгеновское излучение как метод воздействия на систему «кристалл – воздух» для получения в составе микрокристаллов ЩГК дополнительной фазы в виде нитрата соответствующего щелочного металла.

Эксперимент. Для исследования изменения фазового состава, структуры и оптических свойств ЩГК при

воздействии рентгеновского излучения на систему «кристалл – газовая фаза» разработаны методики, обеспечивающие:

- получение микрокристаллов (выращивание нитевидных кристаллов с заданным химическим составом и кристаллической структурой; получение порошков);

- обработку микрокристаллов в системе «кристалл – воздух», активированную рентгеновским излучением с учетом влияния важнейших метеорологических факторов (температура, влажность, давление, освещенность дневным светом);

- анализ морфологии и структуры поверхности микрокристаллов с использованием электронно-микроскопического анализа;

- определение оптических характеристик микрокристаллов;

- исследование структуры микрокристаллов при воздействии ионизирующих излучений с использованием рентгенофазового анализа.

Для получения продуктов реакций на поверхности исследуемые кристаллы помещались в реактор и подвергались воздействию излучений. После проведения облучения в нужных условиях кристаллы исследовались, как показано на рис. 1.

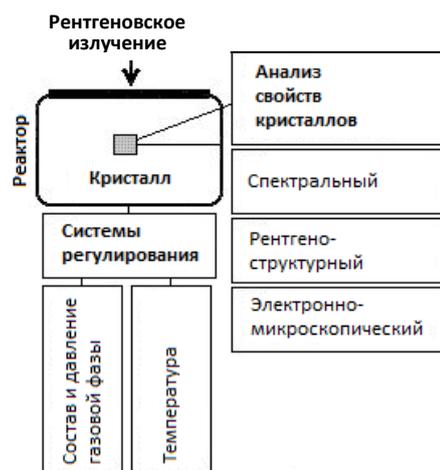


Рис. 1. Комплекс для исследования кристаллов

Облучение системы «кристалл – воздух» рентгеновскими лучами проводилось при следующих условиях:

- температура системы изменялась в пределах 287–373 К;

- давление газовой фазы изменялось в пределах $1 \div 10^{-5}$ Тор.

Для обнаружения и идентификации твердых продуктов, образовавшихся в процессе обработки кристаллов, использовались следующие экспериментальные методы:

- рентгеноструктурный анализ;

- электронная микроскопия;

- ИК-спектроскопия.

Оптические свойства ЩГК после облучения в системе «кристалл – газовая фаза» исследовались в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра.

В настоящих исследованиях использовались образцы галогенида натрия NaCl в виде микрокристаллов: нитевидные кристаллы (НК) и порошки. НК NaCl диаметром 5–10 мкм и длиной 5–10 мм выращивались пу-

тем испарения водных растворов щелочно-галоидных солей через пористую перегородку. Наиболее важные направления в применении НК — реализация их высоких прочностных свойств в композиционных материалах, а также использование высокой тепловой и абразивной стойкости [7; 10–12].

Выбор для экспериментов кристаллов в нитевидной форме основан на том, что они содержат минимальное исходное количество примесей и дефектов кристаллического строения (вакансий, дислокаций, границ блоков) и имеют хорошо развитую поверхность боковых граней. Величина удельной поверхности НК в 10^3 – 10^4 раз выше по сравнению с макрокристаллами. НК ограничены кристаллографическими плоскостями {100}. Рост кристаллов происходит в направлении $\langle 100 \rangle$ [7; 8]. Поперечное сечение кристаллов представляет собой в общем случае многоугольник, форма которого (треугольник, шестиугольник, квадрат) зависит от строения кристаллической ячейки и направления оси роста. Для ЩГК характерно квадратное поперечное сечение НК.

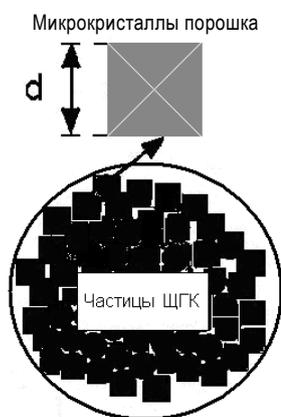


Рис. 2. Образцы ЩГК в виде порошка

Часть исследований выполнялась при использовании микрокристаллов в виде порошков (рис. 2). Для увеличения поверхности контакта и, следовательно, скорости взаимодействия использованы тонкозернистые порошки. При измельчении в тонкий порошок каждая частица представляет собой куб со стороной $10 \text{ мкм} = 10^{-3} \text{ см}$. Порошок состоит из $(10^3)^3 = 10^9$ кристаллитов, каждый из которых имеет поверхность $6 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$. Таким образом, суммарная поверхность частиц порошка составляет $6 \cdot 10^3 \text{ см}^2 = 6 \cdot 10^{-1} \text{ м}^2$ [9].

Облучение образцов осуществлялось в специальных реакторах, изготовленных из стекла или нержавеющей стали. При проведении экспериментов по облучению кристаллов использовалась рентгеновская установка, рабочие характеристики которой представлены в табл. 1.

Таблица 1. Источники излучения

Вид излучения	Тип установки	Источник излучения	Энергия излучения	Мощность поглощенной дозы
Рентгеновское	УРС-60	Трубка БСВ-2	–	$1,8 \cdot 10^{18} \text{ эв} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{сек}^{-1}$
		Трубка БХВ-7	–	$7 \cdot 10^{18} \text{ эв} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{сек}^{-1}$

При облучении системы «кристалл – воздух» установлено образование сплошной поверхностной пленки, состоящей из твердых продуктов реакций. Некоторые стадии этого процесса, происходящего во время облучения на поверхности боковых граней НК NaCl, показаны на рис. 3.

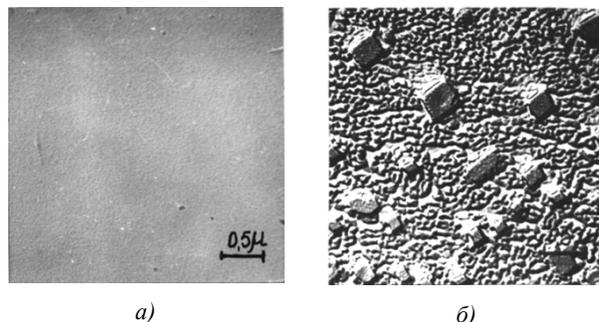


Рис. 3. Структура поверхности боковой грани (100) нитевидного кристалла NaCl. Облучение системы «кристалл – воздух» рентгеновскими лучами: а — кристалл до облучения; б — облучение дозой $1,8 \cdot 10^7 \text{ P}$

Проведенные электронно-микроскопические исследования поверхности НК после облучения рентгеновским излучением разной мощности показали следующее.

1) Облучение дозами до $2,6 \cdot 10^4 \text{ P}$ приводит к образованию мелких кристаллитов. В процессе их слияния образуются ограниченные радиационные кристаллиты, которые ориентированы относительно поверхности облучаемого нитевидного кристалла.

2) При дальнейшем облучении процессы коалесценции вызывают слияние мелких радиационных кристаллитов, приводящее к образованию островков. Увеличение дозы облучения до $3,6 \cdot 10^7 \text{ P}$ приводит к образованию на поверхности облучаемых нитевидных кристаллов сплошной пленки, в состав которой входят отдельные радиационные кристаллиты. В таких условиях облучения, вероятно, происходит увеличение скорости диффузионных процессов как на поверхности, так и в объеме нитевидных кристаллов, что приводит к образованию радиационных кристаллитов без отчетливой грани и ориентации относительно поверхности нитевидного кристалла.

Образцы NaCl облучались без доступа видимого света в системе «кристалл – воздух» при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$, давлении воздуха 760 Тор и относительной влажности воздуха 50% . Кроме этого проводилось облучение рентгеновским излучением в сочетании с дневным светом (доза $1 \cdot 10^8 \text{ P} \cdot \text{см}^{-2}$). На рис. 4 приведены результаты рентгеноструктурных исследований. На рис. 4а показаны дифрактограммы исходных необлученных образцов, приготовленных из порошка NaCl.

Облучение рентгеновскими лучами в условиях, когда в реакционный объем не было доступа обычного видимого света (темное облучение), приводит к регистрации на дифрактограммах дополнительных рефлексов. Образование дополнительной фазы NaNO_3 зарегистрировано при использованных параметрах облучения для исходных кристаллов NaCl (рис 4б).

Дифрактограммы образцов NaCl после облучения системы «кристалл – воздух» рентгеновским излучением

в сочетании с дневным светом дозой $1 \cdot 10^8 \text{ P} \cdot \text{см}^{-2}$ показаны на рис. 4в. Как видно на рисунке, при этих условиях облучения дифрактограммы обработанных образцов не изменяются по сравнению с дифрактограммами исходных образцов (рис. 4а). В этих условиях облучения дополнительная твердая фаза NaNO_3 не образуется.

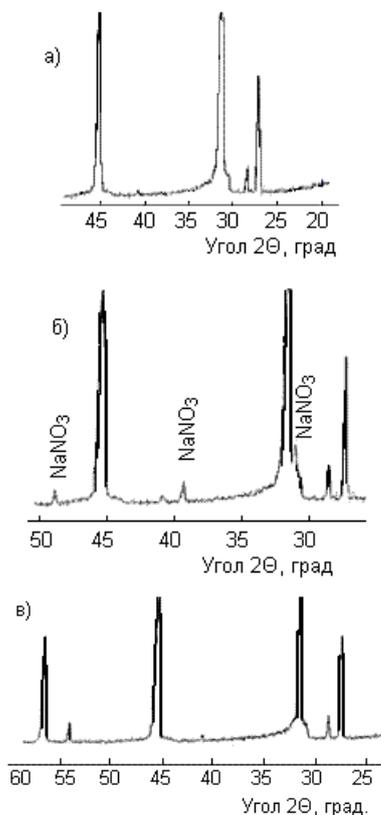


Рис. 4. Рентгенограммы порошков кристаллов NaCl : *а* — исходные образцы; *б* — после облучения в системе «кристалл – воздух» без доступа света; *в* — после облучения рентгеновским излучением в сочетании с дневным светом. Доза облучения $1 \cdot 10^8 \text{ P} \cdot \text{см}^{-2}$

Изучение процесса образования сплошной пленки, состоящей из твердых продуктов реакций, образующихся на поверхности обрабатываемых НК NaCl , позволило на разных стадиях рассчитать объем образующихся продуктов. При этом рассчитывался объем твердых продуктов реакций, приходящийся на единицу поверхности исходного кристалла, а затем определялась толщина поверхностного слоя. Определение толщины слоя, состоящего из кристаллических продуктов, производилось из предположения об их равномерном распределении по поверхности исходных кристаллов. Изменение толщины слоя продуктов реакций, образующихся на поверхности нитевидных кристаллов NaCl , в зависимости от дозы облучения в системе «кристалл – воздух» показано на рис. 5.

Изучение поверхности кристаллов при облучении рентгеновскими лучами в системе «кристалл – воздух» показало следующее:

- изменения поверхности кристаллов вызваны образованием и кристаллизацией продуктов в процессе протекания радиационно-стимулированных гетерогенных реакций в системе «кристалл – воздух». Процессы,

стимулированные действием рентгеновских лучей, характеризуются образованием реакционной зоны, которая локализуется на поверхности раздела кристалл/воздух;

- установлено, что радиационные кристаллиты, о природе которых велись многочисленные дискуссии в научной литературе, являются продуктом радиационно-стимулированных гетерогенных реакций на границе раздела кристалл/воздух. В случае облучения кристаллов NaCl образуются твердые продукты реакции (так называемые радиационные кристаллиты), состав которых соответствует соединению NaNO_3 ;

- образование твердых продуктов реакций на ранних стадиях облучения определяется поверхностной миграцией и диффузией вещества из объема облучаемого кристалла. Диффузионными каналами служат выходящие на поверхность дислокации;

- в условиях облучения системы «кристалл – воздух» рентгеновским излучением в сочетании с дневным освещением образование твердых продуктов гетерогенного взаимодействия подавлено.

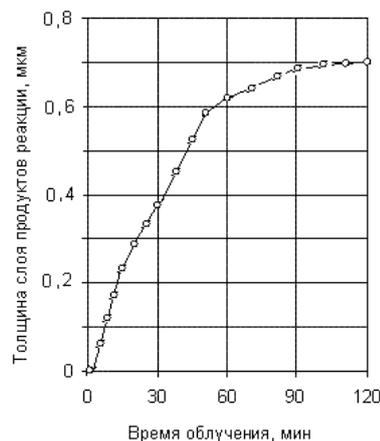


Рис. 5. Толщина поверхностного слоя, состоящего из продуктов реакции на поверхности НК NaCl . Доза облучения $3,6 \cdot 10^7 \text{ P}$ (соответствует времени облучения 120 мин)

Исследование изменений свойств микрокристаллов NaCl в процессе облучения системы «кристалл – воздух» показало следующее:

- существует последовательность процессов в системе «кристалл – воздух» при облучении: а) радиолиз воздуха, формирование газообразных продуктов радиолиза воздуха; б) хемосорбция продуктов радиолиза воздуха на обрабатываемой поверхности щелочно-галогидных кристаллов; в) адсорбция продуктов радиолиза воздуха с образованием химических соединений в поверхностных слоях обрабатываемого кристалла; г) кристаллизация поверхностных фаз; д) формирование поликристаллического поверхностного слоя;

- изменения поверхности кристаллов вызваны гетерогенными реакциями в системе «кристалл – воздух», стимулированными действием рентгеновских лучей, и характеризуются образованием и локализацией реакционной зоны на границе раздела кристалл – газовая фаза;

- твердые продукты реакций — радиационные кристаллиты (нитраты щелочных металлов) — образуются в процессе протекания радиационно-стимулированных

гетерогенных реакций на границе раздела фаз кристалл – воздух;

– образование твердых продуктов на определенных стадиях реакций обусловлено поверхностной миграцией и диффузией вещества из объема облучаемого кристалла. Диффузионными каналами при этом могут служить выходящие на поверхность дислокации.

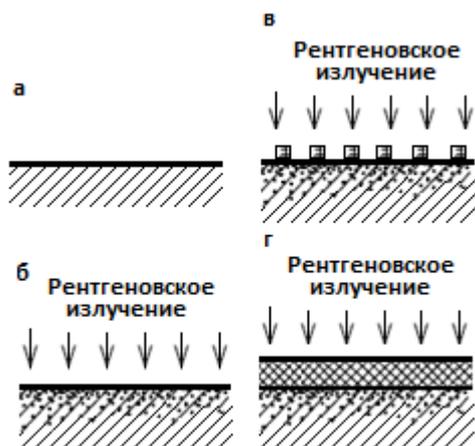


Рис. 6. Схематичное представление стадий преобразования поверхности НК NaCl при облучении в системе «кристалл – воздух»: *a* — исходное состояние; *b* — начальная стадия; *в* — доза облучения около $1,8 \cdot 10^7$ Р; *г* — доза около $4 \cdot 10^7$ Р

Обсуждение. Исследования, выполненные за последние десятилетия в области физики и химии атмосферы, показали, что галогены оказывают влияние на состояние озонового слоя Земли [14; 15]. В связи с этим детально изучаются различные процессы, при которых возможны процессы поступления в атмосферу галогенсодержащих газообразных соединений, в том числе из аэрозольных частиц [16–21].

Большое количество исследований атмосферного аэрозоля посвящено изучению солевого и морского аэрозоля, в состав которого входят микрокристаллы щелочно-галоидных соединений [16–21]. Особый интерес связан с изучением процессов, в которых возможно преобразование щелочно-галоидных кристаллов с образованием нитратов щелочных металлов. Это преобразование неизбежно сопровождается образованием газообразных продуктов, содержащих галогены [20; 21]. Актуальность подобных исследований связана с тем, что в пробах, которые собираются в натуральных экспериментах в реальной атмосфере, часто обнаруживаются нитраты щелочных металлов [20].

Современная исследовательская аппаратура позволяет исследовать состав и структуру отдельных аэрозольных частиц. Известны исследования отдельных частиц хлористого натрия, которые содержат нитрат натрия. Для объяснения обнаруживаемых эффектов специалисты используют методы химического взаимодействия аэрозольных частиц с различными газообразными компонентами, которые могут входить состав атмосферного воздуха в условиях различного вида загрязнений. Часто исследуются аэрозольные частицы, трансформация которых возможна в условиях загрязнения воздуха различными окислами азота [19–21].

В этой связи исследования особенностей преобразования микрокристаллов ЩГК, сопровождающихся образованием нитратов щелочных металлов, приобретают особую значимость. Использование рентгеновского излучения позволяет получить кристаллы с тем строением и составом, которые обнаруживаются при исследовании аэрозольных солевых частиц из проб, собранных в реальной атмосфере. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию и технологии получения материалов на основе гетерогенных радиационно-стимулированных процессов в системе «кристалл – воздух». Используя различные щелочно-галоидные микрокристаллы и атмосферный воздух, добавляя в действие ионизирующее излучение, можно изменять фазовый состав исходных микрокристаллов в широких пределах и получать кристаллы с новыми и заданными свойствами. Эти исследования могут быть актуальными для прогнозирования поведения солевого (морского) атмосферного аэрозоля благодаря следующим обстоятельствам.

Среди природных радионуклидов есть радон — тяжелый радиоактивный газ природного происхождения, не имеющий цвета и запаха. Радон является источником естественного ионизирующего излучения в атмосфере. Его дочерние продукты распада, такие как полоний-218, свинец-218, висмут-214 и полоний-214, представляют собой твердые частицы, которые очень быстро прикрепляются к следам газов и молекул водяного пара. Эти кластеры имеют диаметр от 0,5 до 5 нм и затем объединяются с окружающими аэрозолями. При этом образуются радиоактивные аэрозоли, как показано на рис. 7, приведенном в работе [13].

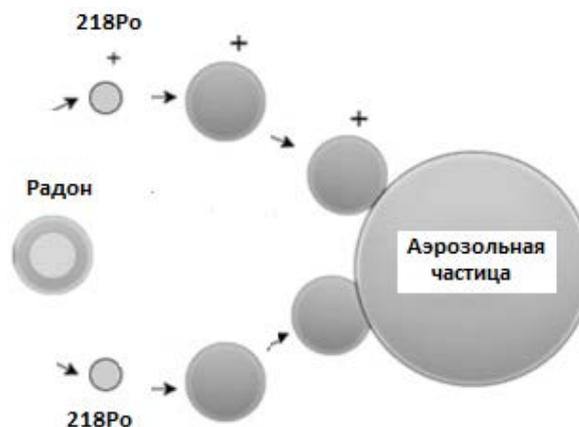


Рис. 7. Основные процессы генерации короткоживущих продуктов распада радона в воздухе, определяющие «не прикрепленную» и «прикрепленную» фракцию

В атмосфере Земли содержится большое количество разнообразных источников ионизирующего излучения, которые являются совокупностью различных видов микрочастиц и физических полей, обладающих способностью ионизировать вещество (образовывать в нем электрически заряженные частицы — ионы). Известны следующие виды ионизирующих излучений: α , β , γ и нейтронное.

Для α -излучения характерной особенностью является высокая ионизирующая и малая проникающая спо-

способность. α -частицы при движении очень быстро теряют свою энергию. β -лучи обладают большей проникающей способностью и могут вызывать химические реакции, люминесценцию, ионизировать газы, воздействовать на фотоматериалы. Фотонное излучение включает в себя рентгеновское и γ -излучение. Распространенным видом фотонного излучения являются обладающие очень высокой энергией при ультракороткой длине волны γ -частицы. Они представляют собой поток высокоэнергичных, не обладающих зарядом фотонов. В отличие от α - и β -лучей, γ -частицы не отклоняются магнитными и электрическими полями и обладают значительно большей проникающей способностью. Источником возникновения нейтронного излучения могут быть ядерные взрывы, ядерные реакторы, лабораторные и промышленные установки.

Все виды ионизирующих излучений в той или иной степени оказывают воздействие на различные вещества, но сильнее всего оно выражено у γ -частиц и нейтронов. При длительном воздействии они могут:

- существенно изменить свойства различных материалов;
- изменить химический состав веществ;
- ионизировать диэлектрики;
- оказывать разрушительный эффект на биологические ткани.

Основными естественными источниками ионизирующего излучения в атмосфере Земли являются:

- Космическое ионизирующее излучение. Характеризуется тем, что распространяется по поверхности земного шара неравномерно. В районах северного и южного полюсов оно на порядок выше, чем в районах, расположенных ближе к экватору.

- Естественное излучение оболочек Земли. Обусловлено присутствием в них радиоактивных элементов, которые входили в их состав в процессе образования и развития планеты. Это излучение зависит от количества радионуклидов в оболочках Земли.

Продукты распада радона (природного радионуклида) опасны для здоровья людей. Радонная безопасность является актуальной экологической проблемой современности. Радон исследуется также для использования во многих сферах человеческой деятельности: для лечения, прогнозирования землетрясений, устранения дефектов на металлических поверхностях, а также в экологической и геологической картографии.

Данные, связанные с образованием радиоактивных аэрозолей, свидетельствуют о том, что в атмосфере возможна генерация радиоактивного аэрозоля, когда щелочно-галоидный микрокристалл будет являться несущей продукты распада радона аэрозольной части-

цей. Проведенные исследования показывают перспективы изучения системы «кристалл – воздух» в условиях облучения ионизирующими излучениями для объяснения трансформации атмосферных солевых аэрозолей, несущих радиоактивные частицы (область физики и химии атмосферы).

Выводы.

1. Кристаллизация продуктов взаимодействия в системе «кристалл – воздух» при рентгеновском облучении происходит в локализованной на границе раздела кристалл/воздух реакционной зоне. Об этом свидетельствуют результаты электронно-микроскопического исследования поверхности кристаллов, выполненные на разных стадиях обработки.

2. Процесс образования пленки, состоящей из твердых продуктов реакций, состоит из нескольких стадий: на первых этапах облучения образуются микрокристаллиты в форме капель (диаметр около 0,1 мкм). Облучение дозой до $1,3 \cdot 10^4$ Р приводит к слиянию микрокристаллитов и образованию дисков (диаметр 0,2 мкм, высота 0,1 мкм). С повышением дозы облучения происходит увеличение размера поверхностных кристаллитов. Облучение дозой более $2,6 \cdot 10^4$ Р приводит к образованию поверхностных кристаллитов, имеющих кристаллическую огранку. Далее происходит увеличение количества кристаллитов, их срастание и образование сплошной поверхностной пленки.

3. Идентификация продуктов реакций, кристаллизующихся на поверхности кристалла в процессе облучения системы «кристалл – воздух», выполненная методами рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии, позволила установить, что продукты, образующиеся на поверхности исходных кристаллов NaCl, представляют собой нитраты натрия NaNO_3 .

4. Образование твердых продуктов в виде NaNO_3 происходит при тех условиях облучения, когда в реактор не поступает свет и в состав облучения входит лишь рентгеновское излучение.

5. Выполненные исследования по облучению щелочно-галоидных кристаллов расширяют сферу использования полученных результатов: применение в технике (прогнозирование поведения интегральных микросхем в условиях ионизирующего излучения); в научных исследованиях по физике твердого тела (расширение представлений о механизмах образования радиационных дефектов в твердых телах); применение в области физики и химии атмосферы (для прогнозирования свойств радиоактивных атмосферных солевых аэрозолей).

Литература

1. Пикаев А.К. Современная радиационная химия: Основные положения: Экспериментальная техника и методы. М.: Наука, 1985. 375 с.
2. Пикаев А.К. Современная радиационная химия: Радиолит газы и жидкости. М.: Наука, 1986. 360 с.
3. Пикаев А.К. Современная радиационная химия: Твердое тело и полимеры: Прикладные аспекты. М.: Наука, 1987. 448 с.
4. Бугаенко Л.Т., Кузьмин М.Г., Полак Л.С. Химия высоких энергий. М.: Химия, 1988. 368 с.
5. Бугаенко Л. Т. Химия высоких энергий. Опыт системного анализа // Вестн. МГУ. Сер. 2. Химия. 2001. Т. 42, № 3. С. 220–230.
6. Экспериментальные методы химии высоких энергии / под ред. М.Я. Мельникова М.: Изд-во МГУ, 2009. 824 с.
7. Бережкова Г.В. Нитевидные кристаллы. М., 1969. 158 с.
8. Гиваргизов Е.И. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара. М., 1977. 304 с.
9. Вест А.Р. Химия твердого тела. М.: Мир, 1988. 560 с.

10. Современные композиционные материалы: пер. с англ. / под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. М., 1970. 672 с.
11. Монокристалльные волокна и армированные ими материалы: пер. с англ. / под ред. А.Т. Туманова. М., 1973. 464 с.
12. Келли А. Высокопрочные материалы, пер. с англ. М., 1976. 261 с.
13. Skubacz K., Wołoszczuk K. Size distribution of ambient and radioactive aerosols formed by the short-lived radon progeny [Электронный ресурс] // J. of Sustainable Mining. 2019. Vol. 18. P. 61–112. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.03.006> (дата обращения: 22.12.2019).
14. Porstendorfer J. Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air // J. of Aerosol Science, 1994. 25(2), P. 219–263. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(94\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0021-8502(94)90077-9).
15. Porstendorfer, Physical parameters and dose factors of the radon and thoron decay products // J. Radiation Protection Dosimetry, 2001. 94(4). P. 365–373. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006512>.
16. Wise M.E., Semeniuk T.A., Bruintjes R., Martin S.T., Russell L. M., Buseck P.R. Hygroscopic behavior of NaCl-bearing natural aerosol particles using environmental transmission electron microscopy // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112, D10224, DOI:10.1029/2006JD007678.
17. Lia Y.-J., Liua P.-F., Bergoend C., Batemana A.P., Martina S.T. Rebounding hygroscopic inorganic aerosol particles [Электронный ресурс]: Liquids, gels, and hydrates // Aerosol science and technology. 2017. Vol. 51 (3). P. 388–396. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02786826.2016.1263384> (дата обращения: 22.12.2019).
18. Wang B., Laskin A. Reactions between water-soluble organic acids and nitrates in atmospheric aerosols [Электронный ресурс]: Recycling of nitric acid and formation of organic salts // J. Geophys. Res. Atmos. 2014. Vol. 119 (6). P. 3335–3351. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013JD021169> (дата обращения: 22.12.2019).
19. Wang H., Wang X., Yang X., Li W., Xue L., Wang T., Chen J., Wang W. Mixed Chloride Aerosols and their Atmospheric Implications: A Review. Aerosol and Air Quality Research. 2017. Vol. 17. P. 878–887. DOI: 10.4209/aaqr.2016.09.0383.
20. Laskin A., Cowin J.P., Iedema M.J. Analysis of individual environmental particles using modern methods of electron microscopy and X-ray microanalysis // J. of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 2006. 150 (2–3). P. 260–274. URL <https://doi.org/10.1016/j.elspec.2005.06.008>.
21. Nguyen T.B., Lee P.B., Updyke K.M., Bones D.L., Laskin J., A. Laskin A. Formation of nitrogen and sulfurcontaining light-absorbing compounds accelerated by evaporation of water from secondary organic aerosols // J. of Geophysical Research: Atmospheres 2012. 117(D1): D01207, doi:10.1029/2011JD016944.
4. Bugaenko L.T., Kuz'min M.G., Polak L.S. High-energy chemistry. M.: Himiya, 1988. 368 p.
5. Bugaenko L.T. High-energy chemistry. System analysis experience // Moscow University Chemistry Bulletin. 2001. V. 42, № 3. P. 220–230.
6. Experimental methods of high energy chemistry / pod red. M.YA. Mel'nikova M.: Izd-vo MGU, 2009. 824 p.
7. Berezhkova G.V. Filamentous crystals. M., 1969. 158 p.
8. Givargizov E.I. Growth of filamentous and lamellar crystals from steam. M., 1977. 304 p.
9. Vest A.R. Chemistry of solids. M.: Mir, 1988. 560 p.
10. Modern composite materials: per. s angl. / pod red. L. Brautmana, R. Kroka. M., 1970. 672 p.
11. Single-crystal fibers and materials reinforced with them: per. s angl. / pod red. A.T. Tumanova. M., 1973. 464 p.
12. Kelli A. High strength materialy, per. s angl. M., 1976. 261p.
13. Skubacz K., Wołoszczuk K. Size distribution of ambient and radioactive aerosols formed by the short-lived radon progeny [Elektronnyj resurs] // J. of Sustainable Mining. 2019. Vol. 18. P. 61–112. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.03.006> (data obrashcheniya: 22.12.2019).
14. Porstendorfer J. Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air // J. of Aerosol Science, 1994. 25(2), P. 219–263. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(94\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0021-8502(94)90077-9).
15. Porstendorfer, Physical parameters and dose factors of the radon and thoron decay products // J. Radiation Protection Dosimetry, 2001. 94(4). P. 365–373. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006512>.
16. Wise M.E., Semeniuk T.A., Bruintjes R., Martin S.T., Russell L. M., Buseck P.R. Hygroscopic behavior of NaCl-bearing natural aerosol particles using environmental transmission electron microscopy // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112, D10224, DOI: 10.1029/2006JD007678.
17. Lia Y.-J., Liua P.-F., Bergoend C., Batemana A.P., Martina S.T. Rebounding hygroscopic inorganic aerosol particles [Elektronnyj resurs]: Liquids, gels, and hydrates // Aerosol science and technology. 2017. Vol. 51 (3). P. 38–396. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02786826.2016.1263384> (data obrashcheniya: 22.12.2019).
18. Wang B., Laskin A. Reactions between water-soluble organic acids and nitrates in atmospheric aerosols [Elektronnyj resurs]: Recycling of nitric acid and formation of organic salts // J. Geophys. Res. Atmos. 2014. Vol. 119 (6). P. 3335–3351. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013JD021169> (data obrashcheniya: 22.12.2019).
19. Wang H., Wang X., Yang X., Li W., Xue L., Wang T., Chen J., Wang W. Mixed Chloride Aerosols and their Atmospheric Implications: A Review. Aerosol and Air Quality Research. 2017. Vol. 17. P. 878–887. DOI: 10.4209/aaqr.2016.09.0383.
20. Laskin A., Cowin J.P., Iedema M.J. Analysis of individual environmental particles using modern methods of electron microscopy and X-ray microanalysis // J. of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 2006. 150 (2–3). P. 260–274. URL <https://doi.org/10.1016/j.elspec.2005.06.008>.
21. Nguyen T.B., Lee P.B., Updyke K.M., Bones D.L., Laskin J., A. Laskin A. Formation of nitrogen and sulfurcontaining light-absorbing compounds accelerated by evaporation of water from secondary organic aerosols // J. of Geophysical Research: Atmospheres 2012. 117(D1): D01207, doi:10.1029/2011JD016944.

References

1. Pikaev A.K. Modern radiation chemistry: Basic concepts: Experimental techniques and methods. M.: Nauka, 1985. 375 p.
2. Pikaev A.K. Modern radiation chemistry: Radiolysis of gases and liquids. M.: Nauka, 1986. 360 p.
3. Pikaev A.K. Modern radiation chemistry: Solid and polymers: Applied aspects. M.: Nauka, 1987. 448 p.
4. Bugaenko L.T., Kuz'min M.G., Polak L.S. High-energy chemistry. M.: Himiya, 1988. 368 p.
5. Bugaenko L.T. High-energy chemistry. System analysis experience // Moscow University Chemistry Bulletin. 2001. V. 42, № 3. P. 220–230.
6. Experimental methods of high energy chemistry / pod red. M.YA. Mel'nikova M.: Izd-vo MGU, 2009. 824 p.
7. Berezhkova G.V. Filamentous crystals. M., 1969. 158 p.
8. Givargizov E.I. Growth of filamentous and lamellar crystals from steam. M., 1977. 304 p.
9. Vest A.R. Chemistry of solids. M.: Mir, 1988. 560 p.
10. Modern composite materials: per. s angl. / pod red. L. Brautmana, R. Kroka. M., 1970. 672 p.
11. Single-crystal fibers and materials reinforced with them: per. s angl. / pod red. A.T. Tumanova. M., 1973. 464 p.
12. Kelli A. High strength materialy, per. s angl. M., 1976. 261p.
13. Skubacz K., Wołoszczuk K. Size distribution of ambient and radioactive aerosols formed by the short-lived radon progeny [Elektronnyj resurs] // J. of Sustainable Mining. 2019. Vol. 18. P. 61–112. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.03.006> (data obrashcheniya: 22.12.2019).
14. Porstendorfer J. Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air // J. of Aerosol Science, 1994. 25(2), P. 219–263. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(94\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0021-8502(94)90077-9).
15. Porstendorfer, Physical parameters and dose factors of the radon and thoron decay products // J. Radiation Protection Dosimetry, 2001. 94(4). P. 365–373. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006512>.
16. Wise M.E., Semeniuk T.A., Bruintjes R., Martin S.T., Russell L. M., Buseck P.R. Hygroscopic behavior of NaCl-bearing natural aerosol particles using environmental transmission electron microscopy // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112, D10224, DOI: 10.1029/2006JD007678.
17. Lia Y.-J., Liua P.-F., Bergoend C., Batemana A.P., Martina S.T. Rebounding hygroscopic inorganic aerosol particles [Elektronnyj resurs]: Liquids, gels, and hydrates // Aerosol science and technology. 2017. Vol. 51 (3). P. 38–396. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02786826.2016.1263384> (data obrashcheniya: 22.12.2019).
18. Wang B., Laskin A. Reactions between water-soluble organic acids and nitrates in atmospheric aerosols [Elektronnyj resurs]: Recycling of nitric acid and formation of organic salts // J. Geophys. Res. Atmos. 2014. Vol. 119 (6). P. 3335–3351. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013JD021169> (data obrashcheniya: 22.12.2019).
19. Wang H., Wang X., Yang X., Li W., Xue L., Wang T., Chen J., Wang W. Mixed Chloride Aerosols and their Atmospheric Implications: A Review. Aerosol and Air Quality Research. 2017. Vol. 17. P. 878–887. DOI: 10.4209/aaqr.2016.09.0383.
20. Laskin A., Cowin J.P., Iedema M.J. Analysis of individual environmental particles using modern methods of electron microscopy and X-ray microanalysis // J. of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 2006. 150 (2–3). P. 260–274. URL <https://doi.org/10.1016/j.elspec.2005.06.008>.
21. Nguyen T.B., Lee P.B., Updyke K.M., Bones D.L., Laskin J., A. Laskin A. Formation of nitrogen and sulfurcontaining light-absorbing compounds accelerated by evaporation of water from secondary organic aerosols // J. of Geophysical Research: Atmospheres 2012. 117(D1): D01207, doi:10.1029/2011JD016944.