

УДК 535.34

## ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКОЙ ДЕГРАДАЦИИ ПРИ РАЗДЕЛЬНОМ И ОДНОВРЕМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ КВАНТАМИ СОЛНЕЧНОГО СПЕКТРА И ЭЛЕКТРОНАМИ МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ ПОРОШКА $BaSO_4$

© 2021 г. М. М. Михайлов<sup>а, \*</sup>, А. Н. Лапин<sup>а</sup>, С. А. Юрьев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050 Россия

\*e-mail: membrana2010@mail.ru

Поступила в редакцию 20.12.2020 г.

После доработки 24.02.2021 г.

Принята к публикации 28.02.2021 г.

Выполнен сравнительный анализ изменений измеренных *in situ* спектров диффузного отражения и интегрального коэффициента поглощения после раздельного и одновременного облучения в вакууме электронами с энергией 30 кэВ и квантами солнечного спектра порошка сульфата бария, модифицированного наночастицами диоксида кремния. Установлены два кинетических участка на кривых деградации оптических свойств. На первом участке одновременное облучение аддитивно по отношению к раздельному. На втором участке изменения в результате одновременного облучения меньше по сравнению с суммой изменений при раздельном облучении.

**Ключевые слова:** сульфат бария, наночастицы, оптические свойства, облучение, кванты солнечного спектра, ускоренные электроны, аддитивность

**DOI:** 10.31857/S1028096021090107

### ВВЕДЕНИЕ

Порошки сульфата бария широко используются в различных областях промышленности при производстве лакокрасочных материалов, пластмасс, бумаги, стекла, цемента, керамики, оптических приборов, а также при рентгеновских исследованиях, в аналитической химии, металлургии и при бурении нефтяных скважин [1–3]. Благодаря высокой отражательной способности в области солнечного спектра (от 200 до 2500 нм) порошок  $BaSO_4$  могут быть использованы в качестве пигмента для терморегулирующих покрытий космических аппаратов [4].

Требования к срокам активного существования космических аппаратов с каждым годом усиливаются, и проблема повышения фото- и радиационной стойкости материалов для космической техники актуальна. В предыдущих исследованиях [5, 6] установлено, что модифицирование сульфата бария наночастицами  $SiO_2$  позволяет значительно увеличить радиационную стойкость практически без ухудшения отражательной способности.

В условиях реальных орбит на материалы внешних поверхностей космических аппаратов в глубоком вакууме действуют одновременно излучения нескольких видов: электроны, протоны, кванты солнечного спектра. При наземных испы-

таниях материалов, как правило, облучение проводят раздельно одним из видов излучений, реже — одновременно. Выполненные ранее исследования показали [7, 8], что в изменении свойств и рабочих характеристик не наблюдается аддитивность: сумма изменений при раздельном облучении не равна изменениям при одновременном облучении материалов.

Целью настоящей работы было изучение изменений спектров диффузного отражения ( $\rho_\lambda$ ) в ультрафиолетовой (УФ), видимой, ближней инфракрасной (ИК) областях, измеренных *in situ* в вакууме, и интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения ( $a_s$ ) модифицированного наночастицами  $SiO_2$  порошка  $BaSO_4$  ( $nBaSO_4$ ) при раздельном и одновременном облучении ускоренными электронами и квантами солнечного спектра.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В исследованиях использовали порошок  $BaSO_4$  (Extra Pure Reagent, Nacalai Tesque inc., Япония). В качестве модифицирующей добавки был взят нанопорошок диоксида кремния (чистота 99.8%, средний размер 10–12 нм, удельная поверхность 180–220 м<sup>2</sup>/г, производитель ООО “Плазмо-

**Таблица 1.** Интенсивности пиков (отн. ед.) в ИК-спектрах порошка  $n\text{BaSO}_4$  при отдельном и одновременном облучении электронами ( $e^-$ ) и квантами солнечного спектра (КСС)

Режим облучения	Волновое число, $\text{см}^{-1}$											
	476	610	642	810	985	1086	1132	1196	1400	2060	2356	3146
До облучения	0.036	0.862	0.544	0.003	0.107	1.025	1.090	0.998	0.024	0.002	0.007	0.031
$e^-$	0.049	0.823	0.504	0.016	0.138	1.041	1.090	0.996	0.006	0.014	0.005	0.001
КСС	0.037	0.720	0.518	0.021	0.144	1.016	1.090	1.001	0.005	0.018	0.033	0.005
$e^- + \text{КСС}$	0.034	0.680	0.487	0.021	0.146	1.012	1.090	1.014	0.006	0.025	0.018	0.009

терм”, Россия). Концентрация наночастиц выбрана на основании ранее выполненных исследований [9] и составляла 3 масс. %.

Нанопорошок  $\text{SiO}_2$  растворяли в дистиллированной воде при наложении ультразвуковых волн, в полученный раствор добавляли порошок  $\text{BaSO}_4$  и перемешивали в течение 3 ч в магнитной мешалке. Смесь сушили при температуре  $150^\circ\text{C}$ , перетерли в агатовой ступке и прогревали в атмосфере 2 ч при температуре  $800^\circ\text{C}$ . После охлаждения порошки прессовали в подложки диаметром 24 мм, высотой 2 мм под давлением 1 МПа и выдерживали в течение 2 мин.

Структуру порошков исследовали с помощью рентгеновского дифрактометра XRD-6100 (Shimadzu, Япония). Спектры диффузного отражения в ИК-диапазоне ( $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ ) регистрировали с использованием ИК-фурье-спектрометра Shimadzu IRTracer-100 с приставкой диффузного отражения DRS-8000A.

Облучение образцов в вакууме и регистрацию спектров  $\rho_\lambda$  *in situ* осуществляли в установке “Спектр”, имитирующей условия космического пространства: высокий вакуум, температуру, электромагнитное излучение Солнца, потоки электронов с энергией 5–150 кэВ и протонов с энергией 0.5–140 кэВ [10]. Облучение осуществляли при  $P = 5 \times 10^{-6}$  Торр,  $T = 303$  К ускоренными электронами с энергией 30 кэВ и светом ксеноновой дуговой лампы, имитирующим спектр излучения Солнца, с интенсивностью 3 э. с. о. (э. с. о. – эквивалент солнечного облучения, 1 э. с. о. =  $0.139\text{ Дж/см}^2 \cdot \text{с}$ ). Спектры  $\rho_\lambda$  регистрировали в диапазоне 200–2200 нм до облучения и после каждого периода облучения. Интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения рассчитывали согласно международным стандартам [11, 12].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследовали структуру порошков  $n\text{BaSO}_4$  до облучения и после отдельного и одновременного облучения электронами и квантами солнечного спектра. На рис. 1 в качестве примера представле-

ны дифрактограммы такого порошка до и после совместного облучения электронами ( $e^-$ ) и квантами солнечного спектра в течение 15 ч. Все пики соответствуют ромбической кристаллической фазе сульфата бария. Пики модифицирующей добавки  $\text{SiO}_2$  отсутствуют, поскольку она обладает аморфной структурой. После отдельного облучения электронами и квантами солнечного спектра получены аналогичные дифрактограммы. Анализ всех дифрактограмм показал, что как после отдельного, так и после одновременного облучения этого порошка дополнительные фазы не образуются, существенные структурные изменения не происходит.

Исследования ИК-спектров показали, что в порошках  $n\text{BaSO}_4$  регистрируется ряд полос поглощения в диапазоне от 476 до  $3146\text{ см}^{-1}$  (рис. 2). Полосы в диапазоне  $610\text{--}1400\text{ см}^{-1}$  определяются различными типами колебаний радикалов  $\text{SO}_4^{4-}$  [13–22]: внеплоскостной изгибной вибрацией ( $610$  и  $642\text{ см}^{-1}$ ); симметричными растягивающими колебаниями ( $985\text{ см}^{-1}$ ); симметричными и асимметричными растяжениями и изгибами ( $1086$ ,  $1132$ ,  $1196\text{ см}^{-1}$ ). В ИК-спектрах также присутствуют пики, характерные для соединений диоксида кремния: колебания мостикового кислорода  $\text{Si-O-Si}$  при  $476$ ,  $810$  и  $1110\text{ см}^{-1}$ , валентные симметричные колебания  $\text{Si-Si}$  при  $615\text{ см}^{-1}$ , скручивающие колебания  $\text{SiO}_2$  при  $805\text{ см}^{-1}$ . Полоса при  $2060\text{ см}^{-1}$  соответствует серосодержащему кислороду, полоса при  $3146\text{ см}^{-1}$  – ОН-группам. Двойная полоса малой интенсивности при  $2325\text{--}2360\text{ см}^{-1}$  относится к колебаниям диоксида углерода (как примеси из атмосферы). В зависимости от вида облучения интенсивность этих полос уменьшается или увеличивается (табл. 1).

Эти результаты показывают, что в исходном состоянии осуществляются вибрация, растяжения и изгибы  $\text{SO}_4^-$ -радикалов. После облучения уменьшается вибрация, увеличиваются растяжения и не изменяется интенсивность изгибных колебаний  $\text{SO}_4^-$ -радикалов. Наибольшие изменения происходят после одновременного облучения, наименьшие – после облучения электронами.

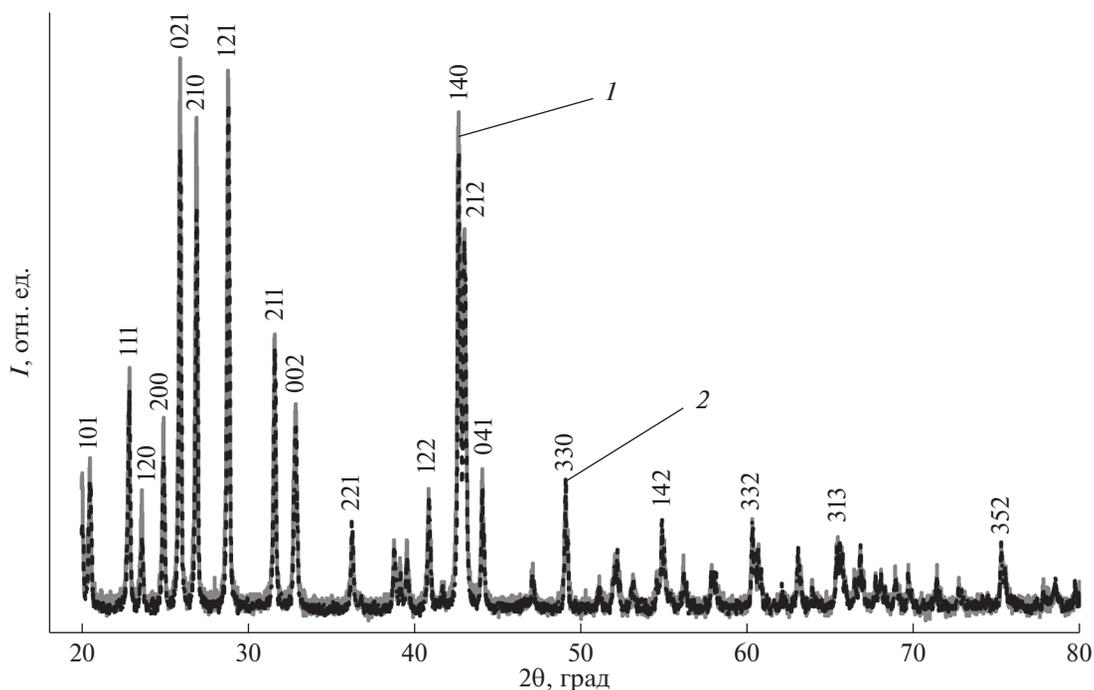


Рис. 1. Дифрактограммы порошка  $n\text{BaSO}_4$  до (1) и после одновременного облучения электронами и квантами солнечного спектра (2).

Интенсивность полосы серосодержащего кислорода увеличивается в 7, 9 и 12.5 раз после облучения электронами, квантами солнечного спектра и одновременного облучения.

На поверхности порошка  $n\text{BaSO}_4$  сорбированы OH-группы, концентрация которых при облучении уменьшается. Значительное уменьшение происходит после действия электронов. При одновременном действии квантов солнечного спектра и электронов изменение концентрации OH-групп такое же, как и после действия электронов, а наименьшие изменения происходят после одновременного облучения.

Спектры  $\rho_\lambda$  и разностные спектры  $\Delta\rho_\lambda$  (определяемые разностью спектров  $\rho_\lambda$  до и после облучения и представляющие спектры поглощения, наведенного действием излучений) порошка  $n\text{BaSO}_4$  до и после облучения электронами показаны на рис. 3. Коэффициент отражения необлученного порошка в области от 400 до 1400 нм составляет порядка 95%, а интегральный коэффициент поглощения  $a_s$  порошка  $n\text{BaSO}_4$  – 0.048. В спектрах  $\rho_\lambda$  порошка  $n\text{BaSO}_4$  (рис. 3а) с увеличением флуенса электронов коэффициент отражения существенно уменьшается (до 61%) в области от 200 до 1000 нм. В области спектра от 1000 до 2200 нм при облучении  $e^-$  изменения незначительные, в пределах 2–3%. Из разностных спектров  $\Delta\rho_\lambda$  (рис. 3б) видно, что с ростом флуенса электронов коэффициент отражения максимально изменяется в

широкой полосе поглощения 200–400 нм. На длинноволновом фронте этой полосы просматривается полоса поглощения с максимумом при 600 нм, которая при увеличении флуенса становится менее выраженной. Форма и сложный характер полос поглощения в области спектра от 200 до 900 нм позволяют предполагать, что в порошках  $n\text{BaSO}_4$  образуются собственные дефекты нескольких типов, поглощающие в УФ- и видимой областях.

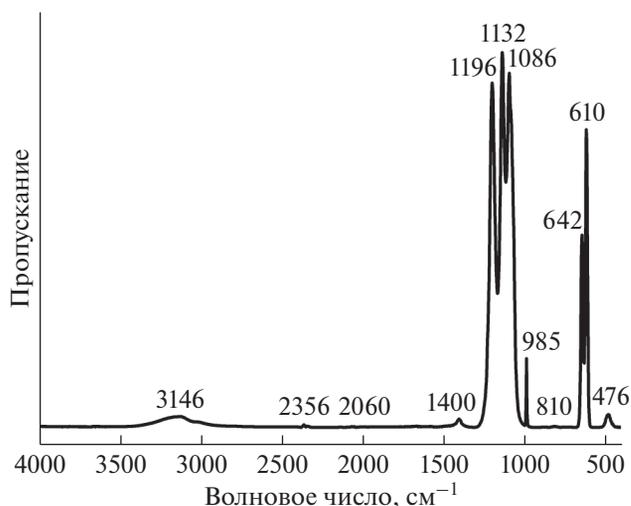
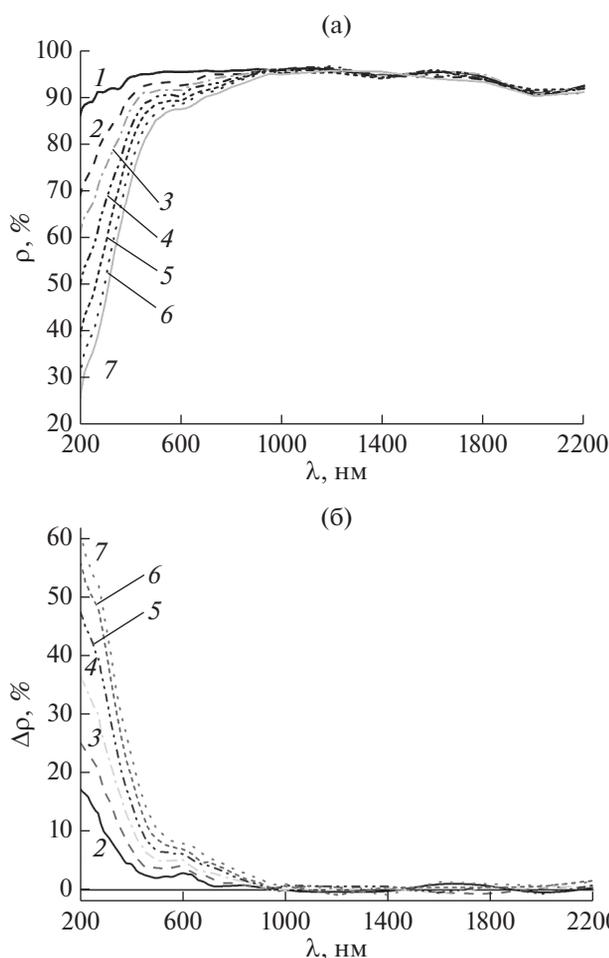


Рис. 2. ИК-спектр порошка  $n\text{BaSO}_4$  до облучения.

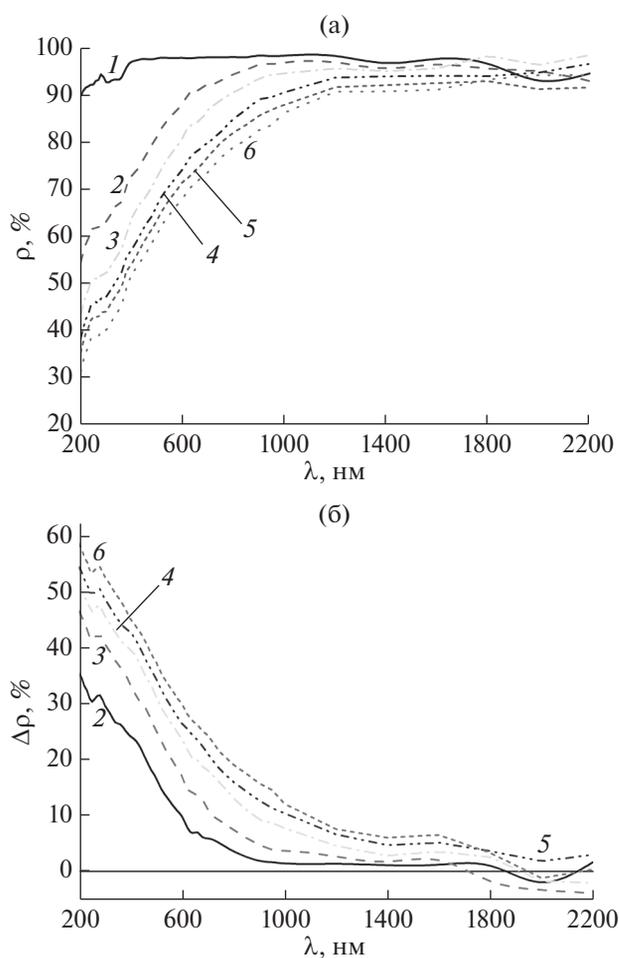


**Рис. 3.** Спектры диффузного отражения  $\rho_\lambda$  (а) и  $\Delta\rho_\lambda$  (б) до (1) и после облучения порошка  $n\text{BaSO}_4$  флуенсом электронов: 0.5 (2); 1.5 (3); 3 (4); 5 (5); 7 (6);  $9 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$  (7).

Рассчитанные по спектрам  $\Delta\rho_\lambda$  изменения интегрального коэффициента поглощения ( $\Delta a_s$ ) порошка  $n\text{BaSO}_4$  в зависимости от флуенса электронов небольшие (табл. 2) по сравнению с модифицированным этими же наночастицами другими, наиболее используемыми в терморегулирующих покрытиях класса “солнечный отражатель” пигментами [23]. При облучении порошка  $n\text{BaSO}_4$  квантами солнечного спектра коэффициент отражения уменьшается в области спектра от 200 до 1700 нм (рис. 4а). Из спектров  $\Delta\rho_\lambda$  (рис. 4б) следует, что максимальные значения  $\Delta\rho$  около 58%, т.е. близко к значению при облучении электронами

**Таблица 2.** Зависимость изменений коэффициента поглощения порошка  $n\text{BaSO}_4$  от флуенса электронов

$\Phi, 10^{16} \text{ см}^{-2}$	0.5	1.5	3	5	7	9
$\Delta a_s$	0.018	0.027	0.038	0.049	0.059	0.072



**Рис. 4.** Спектры диффузного отражения  $\rho_\lambda$  (а) и  $\Delta\rho_\lambda$  (б) до (1) и после облучения порошка  $n\text{BaSO}_4$  квантами солнечного спектра в течение: 3 (2); 6 (3); 9 (4); 12 (5); 15 ч (6).

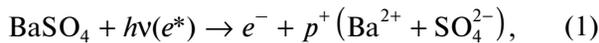
(рис. 3б). Но полоса поглощения при облучении квантами солнечного спектра значительно расширяется в ближнюю ИК-область вплоть до 1800 нм. Изменения коэффициента поглощения  $\Delta a_s$  порошка  $n\text{BaSO}_4$  в зависимости от времени облучения квантами солнечного спектра, рассчитанные по спектрам  $\Delta\rho_\lambda$  (рис. 4б), значительно больше, чем при облучении электронами (табл. 3). Для максимального времени облучения 15 ч значение  $\Delta a_s$  составляет 0.236.

При одновременном облучении электронами и квантами солнечного спектра наибольшее изменение коэффициента отражения регистрируется в УФ-области спектра (рис. 5а). Полоса поглощения в УФ-области спектров  $\Delta\rho_\lambda$  (рис. 5б) расширяется в длинноволновую область до 1300 нм. Максимальное значение 67%  $\Delta\rho$  достигает при длине волны 200 нм. Дополнительно проявляется полоса при 280 нм. В области спектра свыше

1300 нм изменения коэффициентов отражения незначительные – не превышают 7%.

Изменения спектров  $\rho_\lambda$  после отдельного и одновременного облучения электронами и квантами солнечного спектра порошка  $n\text{BaSO}_4$  (рис. 3–5) показали, что образуются дефекты, полосы поглощения которых расположены в области от  $\lambda \sim \lambda_g$  до 1000–1200 нм. Поскольку дополнительные соединения при модифицировании и облучении модифицированного порошка не образуются, такими дефектами могут быть собственные точечные дефекты  $\text{BaSO}_4$ , возникшие под действием излучений.

Действие электронов с энергией 30 кэВ или квантов с длиной волны  $\lambda \sim \lambda_g$  приводит только к ионизационным процессам с образованием электронно-дырочных пар. Для сульфата бария этот процесс можно записать в виде реакции:



где  $e^*$  и  $e^-$ ,  $p^+$  – ускоренный и образовавшийся электроны, дырка.

Образовавшиеся дефекты катионной ( $\text{Ba}^{2+}$ ) и анионной ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) подрешеток также подвержены действию излучений, в результате которого возникают новые дефекты. При разложении  $\text{SO}_4^{2-}$  будут образовываться ионы  $\text{SO}_3^-$ ,  $\text{SO}_2^-$  и  $\text{O}^-$ -центры, полосы поглощения которых расположены при 280 ( $\text{SO}_4^-$ ), 455–470 ( $\text{SO}_2^-$ ), 600 ( $\text{SO}_3^-$ ) и 625–720 нм ( $\text{O}^-$ ) [24–26]. Полосы поглощения дефектов катионной подрешетки к настоящему времени не идентифицированы, но по аналогии с их полосами в таких соединениях, как, например,  $\text{ZnO}$  и  $\text{TiO}_2$  [27, 28], можно предполагать, что они будут расположены в области более коротких длин волн по сравнению с полосами дефектов анионной подрешетки, т.е. в области  $\lambda \sim 280$  нм.

Для сравнения полученные значения  $\Delta a_s$  порошка  $n\text{BaSO}_4$  в зависимости от времени облучения квантами солнечного спектра и одновременного облучения (электронами и квантами солнечного спектра) и флуенса электронов при одновременном и раздельном облучении сведены в табл. 4. Там же приведены значения коэффициента аддитивности ( $K_{\text{адд}}$ ), рассчитанные по отношению суммы значений  $\Delta a_s$  при раздельном облучении ( $\sum \Delta a_s$ ) к значению  $\Delta a_s$  при одновременном облучении ( $\Delta a_{\text{одн}}$ ):

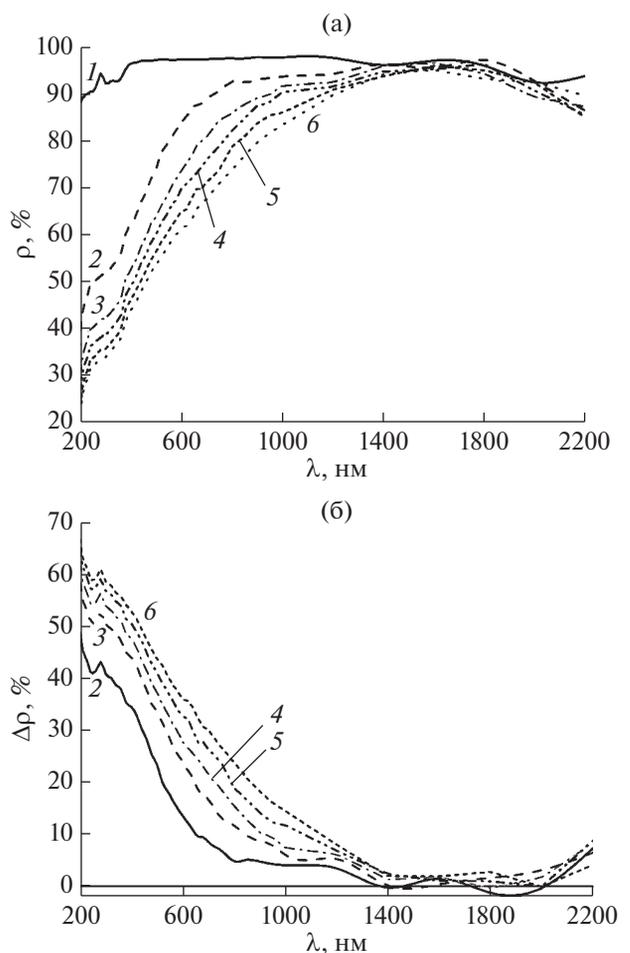
$$K_{\text{адд}} = \sum \Delta a_s / \Delta a_{\text{одн}}. \quad (2)$$

Данные табл. 4 показывают, что вклад в деградацию оптических свойств порошка  $n\text{BaSO}_4$  при облучении квантами солнечного спектра существенно больше по сравнению с действием электронов. Из трех видов облучения наибольшие из-

**Таблица 3.** Зависимость изменений коэффициента поглощения порошка  $n\text{BaSO}_4$  от времени облучения квантами солнечного спектра

$t$ , ч	3	6	9	12	15
$\Delta a_s$	0.085	0.135	0.184	0.212	0.236

менения коэффициента поглощения порошка  $n\text{BaSO}_4$  происходят при одновременном облучении электронами и квантами солнечного спектра, а наименьшие – при облучении электронами. При одинаковом времени одновременное облучение приводит к меньшим изменениям коэффициента поглощения  $a_s$  по сравнению с суммой изменений при раздельном облучении электронами и квантами солнечного спектра.



**Рис. 5.** Спектры диффузного отражения  $\rho_\lambda$  (а) и  $\Delta \rho_\lambda$  (б) до (1) и после одновременного облучения порошка  $n\text{BaSO}_4$  электронами и квантами солнечного спектра:  $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} + 3 \text{ ч}$  (2);  $6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} + 6 \text{ ч}$  (3);  $8.13 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} + 8 \text{ ч}$  (4);  $10 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} + 10 \text{ ч}$  (5);  $12 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} + 12 \text{ ч}$  (6).

**Таблица 4.** Зависимость изменений коэффициента поглощения и коэффициента аддитивности порошка  $n\text{BaSO}_4$  от времени раздельного и одновременного облучения электронами ( $e^-$ ) и квантами солнечного спектра (КСС) и флуоресценции электронов

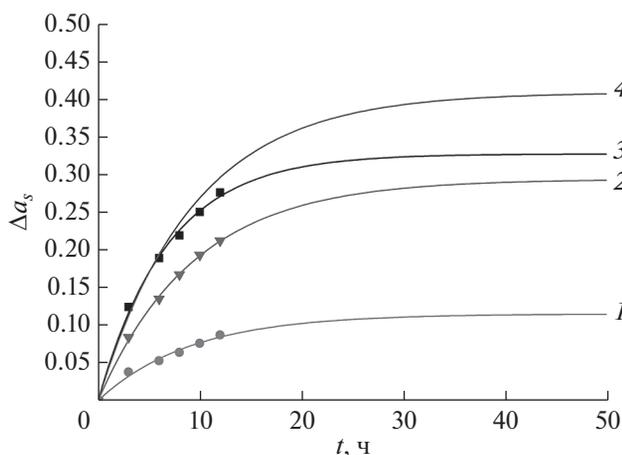
КСС, ч		3	6	8	10	12
$\Phi_{e^-}, 10^{16} \text{ см}^{-2}$		3	6	8	10	12
$\Delta a_s$	$e^-$	0.038	0.053	0.064	0.076	0.087
	КСС	0.085	0.135	0.167	0.193	0.212
	$e^- + \text{КСС}$	0.124	0.189	0.219	0.250	0.276
	$\Sigma \Delta a_s$	0.123	0.188	0.231	0.269	0.299
$K_{\text{адд}}$		0.992	0.994	1.055	1.076	1.083

Из табл. 4 следует, что при малом времени облучения значения  $\Delta a_s$  при одновременном облучении электронами и квантами солнечного спектра равны сумме значений при их раздельном действии. Коэффициент аддитивности практически равен единице. С ростом времени облучения эти величины отличаются, и чем больше время облучения, тем больше отличие. Коэффициент аддитивности при времени облучения 12 ч возрастает до 1.083. Для определения значений  $K_{\text{адд}}$  при большем времени облучения проводили расчеты с использованием модели деградации оптических свойств в виде степенной функции:

$$\Delta a_s = \alpha(1 - \exp(-\beta/t)), \quad (3)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты,  $t$  – время облучения.

На рис. 6 представлены результаты расчетов  $\Delta a_s$  для времени облучения до 50 ч, выполненных



**Рис. 6.** Зависимость полученных с помощью расчетов на основе экспериментальных значений изменений коэффициента поглощения  $a_s$  порошка  $n\text{BaSO}_4$  при облучении: электронами (1); квантами солнечного спектра (2); одновременном электронами и квантами солнечного спектра (3); сумма значений  $\Delta a_s$  при раздельном действии электронов и квантов солнечного спектра (4).

с использованием экспериментальных данных. Там же приведены экспериментальные значения  $\Delta a_s$ , полученные при раздельном действии электронов и квантов солнечного спектра, а также их сумма. Полученные данные показывают, что с увеличением времени раздельного и одновременного облучения электронами и квантами солнечного спектра отличие значений при одновременном облучении от суммы значений  $\Delta a_s$  при раздельном облучении увеличивается. При максимально расчетном времени облучения 50 ч эти значения составляют 0.327 и 0.407 соответственно, что дает величину  $K_{\text{адд}}$ , равную 1.245.

Выполненные расчеты позволяют заключить, что кинетика изменения коэффициента аддитивности при одновременном и раздельном облучении электронами с энергией 30 кэВ и квантами солнечного спектра порошка  $n\text{BaSO}_4$  зависит от времени облучения. Кривая  $\Delta a_s(t)$  состоит из двух участков. На первом участке при малом времени облучения наблюдается аддитивность в изменении оптических свойств, на втором – изменения при одновременном облучении меньше суммы изменений при раздельном облучении. При времени облучения 50 ч коэффициент аддитивности составляет 1.245. Эти данные показывают, что если определять фото- и радиационную стойкость такого модифицированного наночастицами порошка по результатам раздельного облучения электронами и квантами солнечного спектра, то получим данные, в 1.245 раз большие по сравнению с изменениями, происходящими при одновременном облучении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы в вакууме *in situ* изменения состава, структуры, спектров диффузного отражения и интегрального коэффициента поглощения  $a_s$  модифицированного наночастицами  $\text{SiO}_2$  порошка  $\text{BaSO}_4$  после раздельного и одновременного облучения электронами ( $E = 30 \text{ кэВ}$ ,  $\phi = 1 \times$

$\times 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) и квантами солнечного спектра с интенсивностью, в три раза превышающей интенсивность излучения Солнца. Установлено, что модифицирование порошка и его последующее облучение не приводит к образованию дополнительных соединений. В ИК-спектрах регистрируются полосы различных колебаний  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{SO}_3^-$ ,  $\text{SO}_2^-$ ,  $\text{O}^-$ , интенсивность которых изменяется по-разному в зависимости от типа колебаний. Интенсивность полос серосодержащего кислорода увеличивается, полосы ОН-групп – уменьшается.

Экспериментально и с помощью расчетов установлены два участка на кривых изменения спектров диффузного отражения и интегрального коэффициента поглощения  $a_s$ . На первом участке со временем облучения до 6 ч значения  $\Delta a_s$  при одновременном облучении равны сумме значений, полученных при раздельном облучении. На втором участке сумма значений больше значений при одновременном облучении, с увеличением времени облучения их разность увеличивается. Для времени облучения 50 ч коэффициент аддитивности, определяемый отношением этих величин, составляет 1.245: оценка деградации оптических свойств этого порошка по результатам раздельного облучения приводит к ее завышению в 1.245 раз. Такое отличие в случае использования порошка, например, в терморегулирующих покрытиях космических аппаратов, может привести к ошибкам в определении размеров, веса и стоимости радиаторов терморегулирования космических аппаратов, на которые они будут нанесены.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Госзадание № FEWM-2020-0038).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cao R., Qin Z., Yu X. et al. // Int. J. Light Electron Optics. 2016. V. 127. № 3. P. 1126.
2. Annalakshmi O, Jose M.T., Madhusoodanan U. // Rad. Prot. Dosimetry. 2012. V. 150. № 2. P. 127.
3. Bahl S., Lochab S.P., Pandey A., Kumar V., Aleynikov V.E., Molokanov A.G., Kumar P. // J. Luminescence. 2014. V. 149. P. 176.
4. Патент RU № 2524384. Терморегулирующее покрытие / ОАО "Композит". Странолова В.Н., Киселева Л.В., Токарь С.В., Юртов Е.В., Мурадова А.Г. // Б.И. 2014. № 21.
5. Mikhailov M.M., Yuryev S.A., Sokolovskiy A.N., Lovitskiy A.A. // Dyes and Pigments. 2019. V. 163. P. 340.
6. Mikhailov M.M., Yuryev S.A., Lovitskiy A.A. // Opt. Mater. 2018. V. 85. P. 226.
7. Хасанишин Р.Х., Новиков Л.С. // Физика и химия обработки материалов. 2015. № 5. С. 14.
8. Mikhailov M.M., Yuryev S.A., Lapin A.N., Karanskiy V.V. // Symmetry. 2020. V. 12. P. 1021.
9. Mikhailov M.M., Yuryev S.A., Lapin A.N. // Key Engin. Mater. 2019. V. 806. P. 106.
10. Kositsyn L.G., Mikhailov M.M., Kuznetsov N.Ya., Dvoretiskii M.I. // Instrum. Experim. Tech. 1985. V. 28. № 4. P. 929.
11. ASTM E490-00a. Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables. West Conshohocken: ASTM International, 2019.
12. ASTM E903-96. Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres. West Conshohocken: ASTM International, 2012.
13. Vicum L., Mazzotti M., Bałdyga J. // Chem. Engin. Technol. 2003. V. 26. № 3. P. 325.
14. Sifontes Á.B., Cañizales E., Toro-Mendoza J. et al. // J. Nanomater. 2015. Spec. Iss. P. 510376.
15. Zhang M., Zhang B., Li X., Yinb Z., Guo X. // Appl. Surf. Sci. 2011. V. 258. P. 24.
16. Prameena B., Anbalagan G., Sangeetha V., Gunasekaran S., Ramkumaar G.R. // Int. J. ChemTech Res. 2013. V. 5. № 1. P. 220.
17. Manam J., Das S. // Ind. J. Pure Appl. Phys. 2009. V. 47. № 6. P. 435.
18. Борило Л.П. Синтез и физико-химические закономерности формирования золь-гель методом тонкоплёночных и дисперсных наноматериалов оксидных систем элементов III–V групп: Дис. ... д-ра хим. наук: 02.00.04. Томск: ТГУ, 2003. 286 с.
19. Lange P. // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. № 1. P. 201.
20. Ильвес В.Г., Зуев М.Г., Соковнин С.Ю., Мурзакаев А.М. // Физика твердого тела. 2015. Т. 57. № 12. С. 2439.
21. Аверин И.А., Карманов А.А., Мошников В.А., Пронин И.А., Игошина С.Е., Сигаев А.П., Теруков Е.И. // Физика твердого тела. 2015. Т. 57. № 12. С. 16.
22. Накамото К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений. М.: Мир, 1991. 536 с.
23. Нецименко В.В. Исследование структуры, свойств и радиационной стойкости оксидных порошков, модифицированных наночастицами: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07. Томск: ТУСУР, 2017. 273 с.
24. Бахытхан А.Б., Ким Л.М., Кукетаев Т.А. Изв. вузов. Физика. 2004. № 3. С. 87.
25. Окабе Х. Фотохимия малых молекул. М.: Мир, 1981. 504 с.
26. Ким Л.М., Оразбаев А.Х., Ташимова А.К. // Вестн. КарГУ. 1992. № 3. С. 56.
27. Lv J., Li C., Chai Z. // J. Luminescence. 2019. V. 208. P. 225.
28. Mikhailov M.M., Yuryev S.A., Remnev G.E., Sazonov R.V., Vlasov V.A., Kholodnaya G.E. // J. Thermal Anal. Calorim. 2017. V. 130. Iss. 2. P. 671.

## Features of Optical Degradation under Separate and Simultaneous Irradiation of a Nanoparticle-Modified BaSO<sub>4</sub> Powder with Solar Quanta and Electrons

M. M. Mikhailov<sup>1,\*</sup>, A. N. Lapin<sup>1</sup>, and S. A. Yuryev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050 Russia*

*\*e-mail: membrana2010@mail.ru*

A comparative analysis of the changes in the in situ measured diffuse reflectance spectra and the integral absorption coefficient after separate and simultaneous irradiation in vacuum with electrons with an energy of 30 keV and quanta of the solar spectrum of barium sulfate powder modified with silicon dioxide nanoparticles is performed. Two kinetic regions on the curves of optical properties degradation have been established. In the first section, the simultaneous irradiation is additive in relation to the separate one. In the second section, the changes due to simultaneous irradiation are less than the sum of changes in the case of separate irradiation.

**Keywords:** barium sulfate, nanoparticles, optical properties, irradiation, quanta of the solar spectrum, accelerated electrons, additivity.