

## ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ SrO–Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

© 2020 г. Д. С. Ершов<sup>1</sup> \*, Н. В. Беспрозванных<sup>1</sup>, О. Ю. Синельщикова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН,  
наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия

\*e-mail: ershov.d.s@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.12.2019 г.

После доработки 24.01.2020 г.

Принята к публикации 03.04.2020 г.

В работе рассмотрено влияние методов синтеза на фазовый состав и фотокаталитические свойства композитов, формирующихся в частном разрезе (SrO)<sub>0,2</sub>(Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>0,8</sub>–BiFeO<sub>3</sub>, на примере реакции разложения метиленового оранжевого (МО). Исследованные составы имеют степень деградации МО от 30 до 62% (C<sub>0</sub> = 20 мг/л, загрузка катализатора 30 ммоль/л) при облучении в течение 3 ч люминесцентной ртутной лампой. Ширина запрещенной зоны, оцененная по функции Кубелки–Мунка, для синтезированных составов имела значение ниже 2.6 эВ. Это указывает на возможность их использования в качестве фотокатализаторов видимого диапазона.

**Ключевые слова:** висмутаты, твердофазный синтез, цитратно-нитратный синтез, фотокатализ

DOI: 10.31857/S0132665120040058

### ВВЕДЕНИЕ

Применение фотокатализа в процессах очистки воды и воздуха позволяет использовать солнечную энергию для решения экологических проблем. Наиболее изученные в настоящее время фотокатализаторы на основе оксида титана имеют большую величину ширины запрещенной зоны и могут быть активированы только ультрафиолетовым излучением, на которое приходится около 4% спектра солнечного света [1]. Этот факт ограничивает возможности их применения. На данный момент, поиск новых материалов, обладающих меньшей шириной запрещенной зоны и чувствительных к излучению большей длины волны, является актуальной задачей [2]. В [1–4] была отмечена целесообразность использования некоторых соединений на основе оксида висмута в качестве фотокатализаторов видимого света.

В последнее время существенно возрос интерес к композитным фотокатализаторам на основе висмутатов щелочноземельных металлов. В работах [1, 2] было показано, что композиты на основе висмутата кальция способствуют очистке воды от фенола, а также инициируют разложение метиленового синего в воде под действием видимого света. Результаты исследования фотокаталитических свойств некоторых висмутатов стронция представлены в [5–8]. Ромбоэдрический твердый раствор состава Sr<sub>0,25</sub>Bi<sub>0,75</sub>O<sub>1,36</sub> по данным [8] показал высокую эффективность в реакции разложения

метиленового синего. В [6] установлено, что среди  $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SrBi}_2\text{O}_4$  и  $\text{BiVO}_4$  более высокая фотокаталитическая активность  $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$  объясняется высоким уровнем искажения металло-кислородных полиэдров и меньшей степенью упаковки. Исследования композитов типа  $\text{Me}_x\text{Bi}_y\text{O}_z-\text{Bi}_2\text{O}_3$  ( $\text{Me} = \text{Mg}, \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$ ) показали, что их каталитическая активность в реакции разложения различных органических поллютантов в значительной степени зависит от щелочноземельного металла [9, 10].

Перспективное соединение на основе висмута –  $\text{BiFeO}_3$  (BFO) также может быть использовано в качестве фотокатализатора видимого света. В работе [11] было установлено, что на структуру BFO, легированного ионами  $\text{Sr}^{2+}$ , а также на магнитные и фотокаталитические свойства оказывает влияние размер частиц и содержание легирующей примеси. О положительном влиянии стронция на магнитные свойства  $\text{BiFeO}_3$  сообщалось авторами в [12–14]. Было отмечено, что химическое замещение трехвалентного иона  $\text{Bi}^{3+}$  двухвалентным ионом  $\text{Sr}^{2+}$  вызывает превращение определенной доли  $\text{Fe}^{3+}$  в  $\text{Fe}^{4+}$  и появление кислородных вакансий, которое в свою очередь способствует сильной фотолюминесцентной активности в ИК-области [13].

Фотокаталитическая активность микро- и наночастиц на основе силленита железа  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$  изучалась в [14, 15]. Частичное замещение железа на хром позволяет увеличить степень фотодеградациии за счет изменения их морфологии [14]. Композиты, имеющие в составе силленит, были исследованы в реакции разложения родамина В при облучении видимым светом [15]. Установлено, что они проявляют лучшую фотокаталитическую активность, чем чистые фазы и титаноксидный катализатор  $\text{P}_{25}$ .

Во многих перечисленных литературных источниках приведены исследования фотокаталитической активности висмутсодержащих соединений на измельченных образцах, полученных традиционным твердофазным синтезом. С целью увеличения удельной поверхности и улучшения вышеупомянутого показателя зачастую применяют методы “мягкой химии” [3]. Влияние процессов синтеза на структуру и фотокаталитические свойства композитов становится все более важным, в особенности, когда требуется получить нанокерамику с высоким качеством. Цитратно-нитратный синтез – это простой и удобный метод получения разнообразных усовершенствованных керамических материалов, катализаторов и наночастиц [17].

Изучение композитов, основными фазами которых выступают соединения висмута (висмутаты стронция, силленит  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ , феррит висмута  $\text{BiFeO}_3$ ), является актуальной темой исследования. Проведенные ранее работы по изучению электрофизических свойств образцов, полученных в частном разрезе  $(\text{SrO})_x(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{1-x}-\text{BiFeO}_3$  (при  $0.18 \leq x \leq 0.38$ ) в области существования ромбоэдрического твердого раствора  $\beta$ -типа, показали, что при увеличении содержания  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  электропроводность керамики увеличивается на несколько порядков. Были сделаны предварительные измерения фотокаталитической активности в модельной реакции разложения метиленового оранжевого (МО) для ряда данных составов и установлено, что по сравнению с чистым твердым раствором  $(\text{SrO})_x(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{1-x}$  более высокие значения степени деградации МО имели образцы с содержанием  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  25 и 45 мол. %. Разложение метилоранжа составило в среднем 30% [18]. Предполагается, что получение образцов, синтезированных цитратно-нитратным методом, повысит эффективность работы композитов, как фотокатализаторов.

Цель представленной работы – изучение влияния методов синтеза на фазовый состав, фотокаталитические и сорбционные свойства керамики, формирующейся в частном разрезе  $(\text{SrO})_{0.2}(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{0.8}-\text{BiFeO}_3$  тройной системы  $\text{SrO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы, лежащие в частном разрезе:  $(\text{SrO})_{0.2}(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{0.8}-\text{BiFeO}_3$ , были получены двумя различными способами: традиционным методом твердофазного синтеза и пиролизом цитратно-нитратных композиций.

Для синтеза образцов твердофазным методом использовали оксид висмута(III) марки “ос. ч”, оксид железа(III) и нитрат стронция марки “ч. д. а”. Исходные компоненты брали в соотношениях, соответствующих составу синтезируемой композиции и измельчали в планетарной мельнице с добавлением этанола в течение 15 мин при скорости 350 об./мин. Шихту прессовали в таблетки под давлением около 7 МПа и подвергали термообработке в две стадии при 650 и 750–800°C в течение 6 ч при каждой температуре, с промежуточными перетираниями между обжигами для гомогенизации взаимодействующих реагентов.

При синтезе методом пиролиза цитратно-нитратных композиций в качестве реагентов использовали предварительно приготовленные растворы нитратов висмута(III) марки “ос. ч”, железа(III), и стронция марки “ч. д. а”. Смесь нитратов металлов, соответствующую составу будущей композиции добавляли к раствору лимонной кислоты. Количество лимонной кислоты ( $n$ ) соответствовало расчетному условному соотношению окислителя/восстановителя в композиции, требующемуся для полного восстановления азота и определялось по формуле:

$$n = 5 \sum(\text{NO}_3)/m,$$

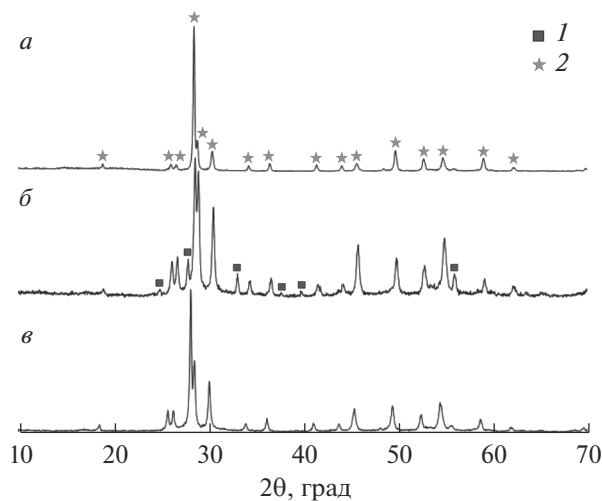
где  $m$  – число окисляемых связей в лимонной кислоте (20),  $\sum(\text{NO}_3)$  – количество нитрат-ионов в синтезируемом составе.

К полученной смеси, при постоянном перемешивании, медленно добавляли сильно разбавленный раствор  $\text{NH}_4\text{OH}$  до  $\text{pH} = 5.5-6$ , при этом образование цитратных комплексов металлов сопровождалось ее просветлением. Полученные исходные композиции выпаривали в термостате при 80°C до получения ксерогеля, который прокаливали при 650°C в течение 3 ч. Далее полученный образец подвергали дополнительной термообработке при 750 и 800°C для совершенствования кристаллической структуры образующихся фаз.

Состав синтезированных образцов на различных стадиях синтеза исследовали с помощью рентгенофазового анализа (РФА), который выполняли на дифрактометре ДРОН-3М, съемку производили на  $\text{CuK}_\alpha$ -излучении. Идентификацию фаз осуществляли с помощью базы данных PDF-2.

Микроструктуры полученных образцов исследовали на сканирующем электронном микроскопе Tescan MIRA 3 в режиме отраженных электронов (BSE). Сканирующая электронная микроскопия сопровождалась микрорентгеноспектральным анализом (МРСА).

Методом низкотемпературной сорбции азота (Quantachrome NOVA 1200e, США), изучали пористую структуру. Дегазацию осуществляли при температуре 300°C в течение 3 ч. Удельную поверхность образцов рассчитывали по методу Бранауэра–Эммета–Теллера (БЭТ).



**Рис. 1.** Дифрактограммы образцов состава  $(\text{SrO})_{0.2}(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{0.8}$ , синтезированных методами: твердофазным при  $800^\circ\text{C}$  (*a*); цитратно-нитратным при  $750$  и  $800^\circ\text{C}$  (*б*, *в* соответственно). 1 –  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (14-699); 2 –  $(\text{SrO})_x(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{1-x}$ , тв. р-р. (46-417).

Эффективный диаметр и распределение частиц по размерам оценивали в водной суспензии с помощью метода динамического светорассеяния (NanoBrook 90 Plus Zeta), перед измерением порошки диспергировали в воде ультразвуком в течение 40 мин.

Фотокаталитическую активность исследовали в реакции разложения метиленового оранжевого (МО). Условия проведения эксперимента были выбраны исходя из литературных данных [11]. Начальная концентрация МО составляла 20 мг/л при загрузке катализатора 30 ммоль/л. В качестве источника излучения использовали люминесцентную ртутную лампу низкого давления (UVB – 1%; UVA – 3.8 Вт) мощностью 20 Вт. Облучение смеси водного раствора МО и фотокатализатора осуществляли в стеклянных бюксах в течение 3 ч. Каждые 30 мин 5 мл раствора отбирали, центрифугировали, во избежание замутнения пробы, со скоростью 4000 об./мин в течение 5 мин, и приливали в кварцевую кювету спектрофотометра ПФ-5400 толщиной 10 мм для дальнейшей фиксации значения светопропускания.

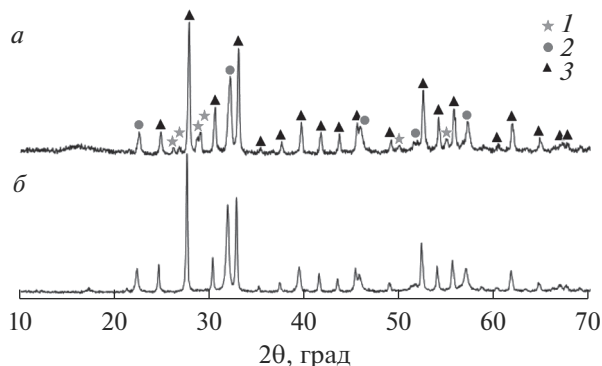
Исследование параметров зонной структуры, включая ширину запрещенной зоны ( $E_g$ ), полученных составов проводили путем математической обработки спектров диффузного отражения, полученных с использованием УФ-спектрометра с интегрирующей сферой Shimadzu UV2600 в интервале длин волн 220–850 нм. Ширину запрещенной зоны  $E_g$  определяли экстраполяцией прямолинейных участков функции Кубелки–Мунка  $F(R)$  до пересечения с осью энергии кванта света  $h\nu$ , эВ:

$$F(R) = (1 - R)^2 / 2R,$$

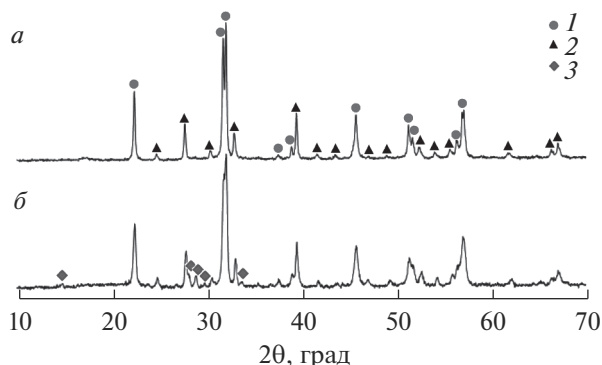
где  $R$  – коэффициент диффузного отражения.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1–3 представлены результаты рентгенофазового анализа образцов в разрезе  $(\text{SrO})_{0.2}(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{0.8}$ – $\text{BiFeO}_3$  с содержанием  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0, 25 и 45 мол. % соответственно, син-



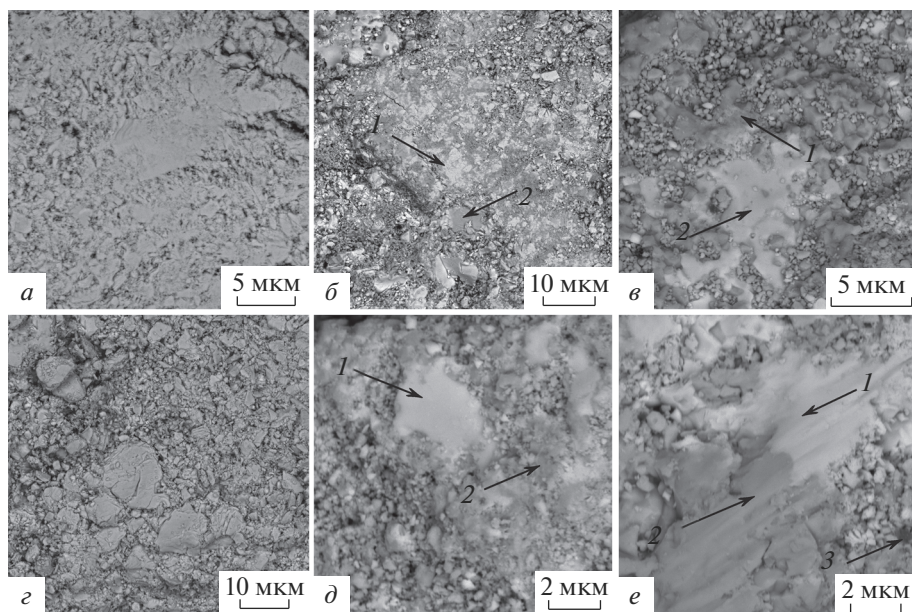
**Рис. 2.** Дифрактограммы образцов в разрезе  $(\text{SrO})_{0,2}(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{0,8}-\text{BiFeO}_3$  с содержанием  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  25 мол. %, синтезированных методами: твердофазным (а); цитратно-нитратным (б). 1 –  $(\text{SrO})_x(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{1-x}$ , тв. р-р. (46-417); 2 –  $\text{BiFeO}_3$ , тв. р-р. (14-181); 3 –  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$  (46-416).



**Рис. 3.** Дифрактограммы образцов в разрезе  $(\text{SrO})_{0,2}(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{0,8}-\text{BiFeO}_3$  с содержанием  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  45 мол. %, синтезированных методами: твердофазным (а); цитратно-нитратным (б). 1 –  $\text{BiFeO}_3$ , тв. р-р. (14-181); 2 –  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$  (46-416); 3 –  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$  (20-836).

тезированных различными методами: твердофазным (а), и пиролизом цитратно-нитратных композиций (б). При содержании  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0 мол. % (рис. 1) методом твердофазного синтеза удалось получить однофазный ромбоэдрический твердый раствор  $(\text{SrO})_x(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{1-x}$  (по данным порошковой дифракционной картотеки PDF, 46-417), в то время как образец того же состава, но синтезированный пиролизом цитратно-нитратных композиций при той же температуре обжига помимо данной фазы имел в качестве примеси моноклинный  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (14-699). Однофазная керамика этого состава была синтезирована с дополнительным обжигом при  $800^\circ\text{C}$ .

При синтезе твердофазным методом композит с содержанием  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  25 мол. % по результатам РФА состоял из трех фаз: твердого раствора на основе  $\text{BiFeO}_3$  (14-181), фазы со структурой силленита  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$  (46-416) и следов твердого раствора



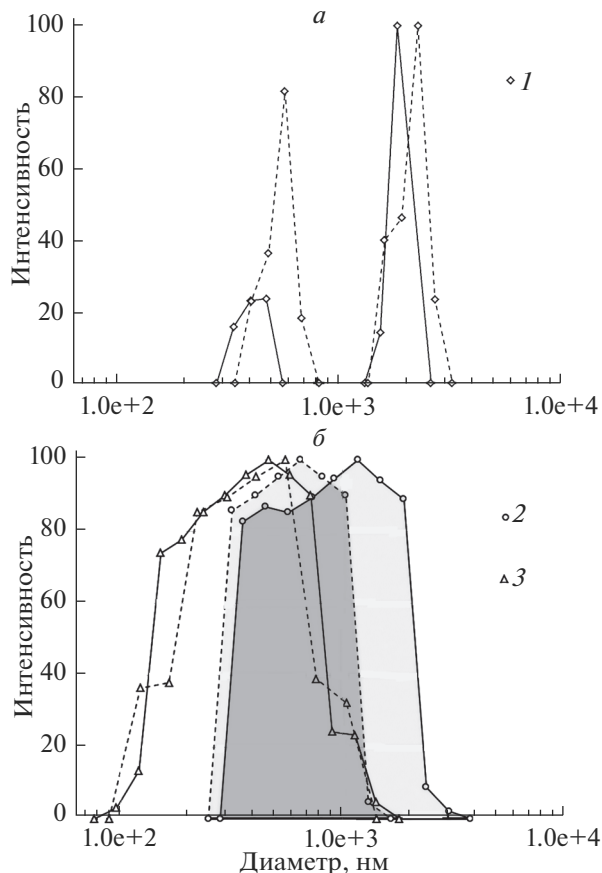
**Рис. 4.** Микрофотографии образцов в разрезе  $(\text{SrO})_{0.2}(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{0.8}-\text{BiFeO}_3$  с содержанием  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ : 0 (а, д); 25 (б, е); 45 мол. % (в, е), синтезированных методами: верхний ряд – твердофазным; нижний – цитратно-нитратным. Примечание: а и е – однофазные образцы состава  $(\text{SrO})_x(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{1-x}$ ; 1 –  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ ; 2 –  $\text{BiFeO}_3$  тв. р-р.; 3 –  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ .

$(\text{SrO})_x(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{1-x}$  (рис. 2а). Применение пиролиза цитратно-нитратных композиций привело к формированию двухфазной керамики, в которой  $(\text{SrO})_x(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{1-x}$  не обнаружен (рис. 2б).

Образцы с содержанием  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  45 мол. % (рис. 3), синтезированные с помощью различных методов имели идентичный фазовый состав, в котором основными фазами были твердый раствор на основе  $\text{BiFeO}_3$  и силленит  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ . При синтезе методом пиролиза помимо данных двух фаз было установлено наличие примеси  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$  (20-836).

Характер и распределение фаз в изучаемых материалах был подтвержден результатами сканирующей электронной микроскопии и микрорентгеноспектральным анализом (рис. 4).

Из рис. 5 и табл. 1 видно, что исследованные образцы представляли собой порошки субмикронного и микронного размера. Применение цитратно-нитратного синтеза привело к увеличению удельной поверхности порошков в 2 раза только у двух исследуемых составов. Использование данного метода синтеза для образцов с содержанием железа 45 мол. % приводит к снижению удельной поверхности. По-видимому, это связано с лучшим смешением компонентов и снижением кинетических факторов, сдерживающих формирование и рост зерен  $\text{BiFeO}_3$  [19]. Образцы, содержащие железо, проявляют более равномерное распределение частиц по размерам, чем керамика на основе твердого раствора  $(\text{SrO})_x(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{1-x}$ , в порошках которой отчетливо просле-



**Рис. 5.** Распределение размеров частиц по данным динамического светорассеяния образцов составов: 1 –  $(\text{SrO})_{0,2}(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{0,8}$ ; 2 –  $(\text{SrO})_{0,1}(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{0,65}(\text{Fe}_2\text{O}_3)_{0,25}$ ; 3 –  $(\text{SrO})_{0,02}(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{0,53}(\text{Fe}_2\text{O}_3)_{0,45}$ , полученных твердофазным (сплошная линия) и цитратно-нитратным (пунктирная) методами.

живается бимодальное распределение частиц по размерам с основной частью образца микронного и большего размера и долей более мелких частиц (500–600 нм).

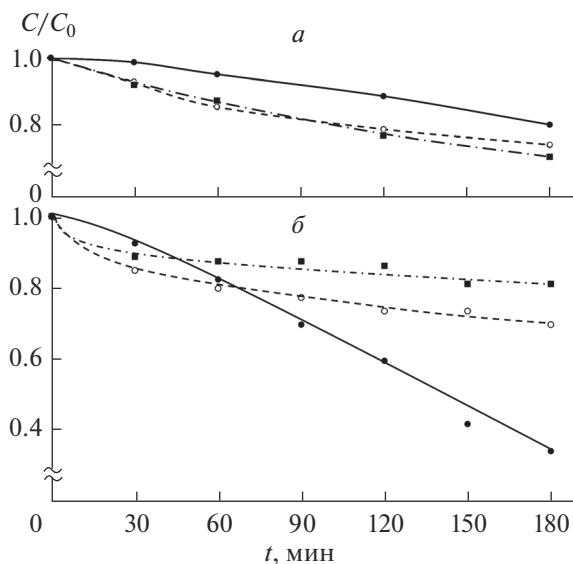
Для исследования фотокаталитических свойств был проведен эксперимент по фотостимулированному разложению метиленового оранжевого в водном растворе. Результаты исследования представлены на рис. 6. Из рисунка видно, что образцы, полученные твердофазным методом синтеза, имеют низкие значения деградации красителя МО ( $\leq 30\%$ ). Для образцов, синтезированных пиролизом цитратно-нитратных композиций, можно проследить закономерность: чем меньше содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в образце, тем лучшую фотокаталитическую активность он проявляет. На порошках, не содержащих  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , был установлен минимальный уровень красителя –  $C/C_0 = 0.35$ .

На рис. 7 представлена спектральная зависимость функции Кубелки–Мунка от энергии фотона для полученных композитов. Графическим методом были определены края полос поглощения. Данные значения можно принять близкими по величине

**Таблица 1.** Размеры и удельная поверхность синтезированных образцов

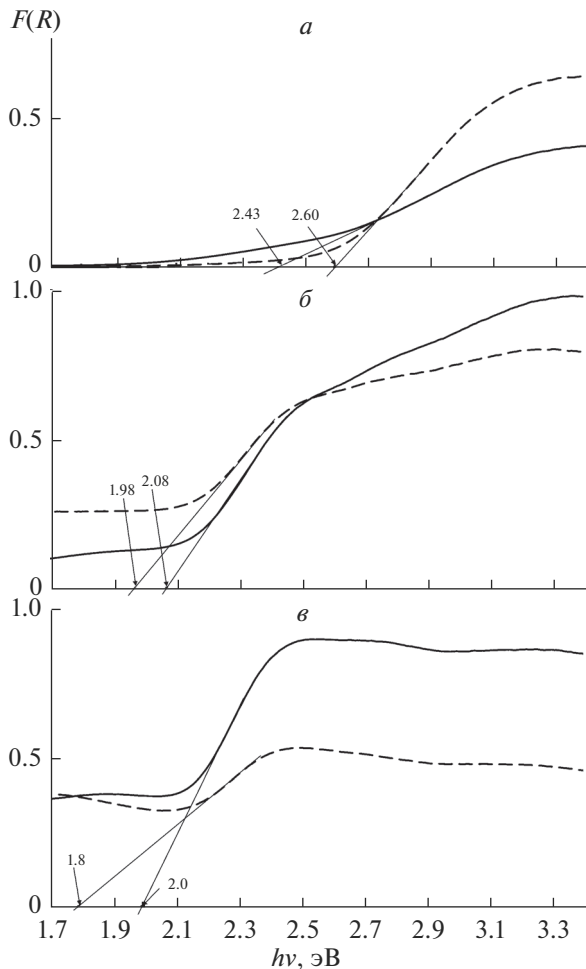
Состав образца	Средний эффективный диаметр частиц, нм		Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	
	твёрдофазный метод синтеза	цитратно-нитратный метод синтеза	твёрдофазный метод синтеза	цитратно-нитратный метод синтеза
(SrO) <sub>0,2</sub> (Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>0,8</sub>	1009	970	1.8	3.3
(SrO) <sub>0,1</sub> (Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>0,65</sub> (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>0,25</sub>	873	536	1.3	2.5
(SrO) <sub>0,02</sub> (Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>0,53</sub> (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>0,45</sub>	346	359	1.9	0.9

к энергии перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости, то есть к ширине запрещенной зоны ( $E_g$ ). Для всех образцов, представленных на графиках,  $E_g$  находится в диапазоне 1.80–2.60 эВ. Край полосы поглощения находится в видимом диапазоне, что указывает на возможность использования рассматриваемых составов в качестве фотокатализаторов, активируемых видимым светом. Введение железа позволяет уменьшить значения края полос поглощения с максимальных 2.60 эВ для состава (SrO)<sub>0,2</sub>(Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>0,8</sub> до 1.80 эВ у образца с содержанием Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 45 мол. %. Стоит отме-



**Рис. 6.** Фотокалитическая деградация красителя МО под воздействием облучения на образцах с содержанием Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> равным 0 (сплошная), 25 (пунктирная) и 45 мол. % (штрих-пунктирная), синтезированных методами: твердофазным (а); цитратно-нитратным (б).





**Рис. 7.** Спектральная зависимость функции Кубелка–Мунка образцов с содержанием  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  равным 0 (*a*), 25 (*б*) и 45 мол. % (*в*), синтезированных методами: твердофазным (сплошная); цитратно-нитратным (пунктирная).

тить, что у образцов без  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , полученных цитратно-нитратным методом, наблюдается большее значение  $F(R)$ , которое чаще всего связано с меньшим размером частиц и, как следствие, большей величиной рассеивания падающего на образец излучения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом твердофазного синтеза и пиролизом цитратно-нитратных композиций получены керамические образцы, формирующиеся в частном разрезе  $(\text{SrO})_{0.2}(\text{Bi}_2\text{O}_3)_{0.8}-\text{BiFeO}_3$  тройной системы  $\text{SrO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3$ , изучен фазовый состав и фотокаталитические свойства, оценена ширина запрещенной зоны.

Полученные составы проявляют фотокаталитическую активность под воздействием видимого и ближнего ультрафиолетового света. Синтезированные твердофазным методом образцы показали примерно равный уровень деградации модельного красителя МО. Для порошков, полученных пиролизом цитратно-нитратных композиций, наблюдалось увеличение фотокаталитической активности при уменьшении содержания  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Ширина запрещенной зоны, оцененная на основании спектроскопических исследований, показала перспективность изучаемых композитов с железом в качестве фотокатализаторов, активируемых видимым светом. Минимальное значение  $E_g$  для состава, не содержащего железа, было 2.43 эВ, с концентрацией  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  45 мол. % – 1.80 эВ.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХС РАН по Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2019–2021 гг. (тема № 0097-2019-0012) и при частичной поддержке гранта РФФИ на 2019–2021 гг. № 19-33-90226 (Аспиранты).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang Y., He Y., Li T., Cai J., Luo M., Zhao L. Photocatalytic degradation of methylene blue on  $\text{Ca-Bi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$  composites under visible light // *Chemical Engineering J.* 2012. V. 189–190. P. 473–481.
2. Штареv Д.С., Штарева А.В., Зайцев А.В. Исследование токсического воздействия продуктов фотостимулированного разложения фенола при использовании катализатора висмута-кальция – оксида висмута // *Вопросы естествознания.* 2016. № 2(10). С. 23–28.
3. Кувшинова Т.Б., Егорышева А.В., Гайтко О.М., Руднев П.О., Баранчиков А.Е., Дудкина Т.Д. Синтез нанокристаллического тройного оксида висмута, железа, сурьмы со структурой пирохлора // *Журн. неорганической химии.* 2015. Т. 60. № 10. С. 1294–1298.
4. Hameed A., Gombac V., Montini T., Felisari L., Fornasiero P. Photocatalytic activity of zinc modified  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  // *Chemical Physics Letters.* 2009. V. 483. P. 254–261.
5. Yang Y., Wang X., Qu J. Preparation and photocatalytic degradation of malachite green by photocatalyst  $\text{SrBi}_4\text{O}_7$  under visible light irradiation // *Applied Mechanics and Materials.* 2014. V. 522–524. P. 411–415.
6. Shan Z., Xia Y., Yang Y., Ding H., Huang F. Preparation and photocatalytic activity of novel efficient photocatalyst  $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$  // *Materials Letters.* 2009. V. 63. P. 75–77.
7. Makarevich K.S., Zaitsev A.V., Kaminsky O.I., Kirichenko E.A., Astapov I.A. Catalytic Activity of a Composition Based on Strontium Bismuthate and Bismuth Carbonate at the Exposure to the Light of the Visible Range // *International J. Chemical Engineering.* V. 2018. Article ID 4715629. 9 p.
8. Li T., Wang Y., He Y., Cai J., Luo M., Zhao L. Preparation and photocatalytic property of  $\text{Sr}_{0.25}\text{Bi}_{0.75}\text{O}_{1.36}$  photocatalyst // *Materials Letters.* 2012. V. 74. P. 170–172.
9. Shtarev D.S., Shtareva A.V., Syuy A.V., Pereginiak M.V. Synthesis and photocatalytic properties of alkaline earth metals bismuthates–bismuth oxide compositions // *Optik.* 2016. V. 127. P. 1414–1420.
10. Штареv Д.С., Штарева А.В., Макаревич К.С., Перегиняк М.В. Пат. РФ № 2595343. // *Бюл.* 2016. № 24.
11. Wang B., Wang S., Gong L., Zhou Z. Structural, magnetic and photocatalytic properties of  $\text{Sr}^{2+}$ -doped  $\text{BiFeO}_3$  nanoparticles based on an ultrasonic irradiation assisted self-combustion method // *Ceramics International.* 2012. V. 38. P. 6643–6649.
12. Khomchenko V.A., Kopcewicz M., Lopes A.M.L., Pogorelov Y.G., Araujo J.P., Vieira J.M. and Kholkin A.L. Intrinsic nature of the magnetization enhancement in heterovalently doped  $\text{Bi}_{1-x}\text{A}_x\text{FeO}_3$  (A = Ca, Sr, Pb, Ba) multiferroics // *J. Physics D: Applied Physics.* 2008. V. 41. 102003. 4 p.
13. Mandal S.K., Rakshit T., Ray S.K., Mishra S.K., Krishna P.S.R., Chandra A. Nanostructures of  $\text{Sr}^{2+}$  doped  $\text{BiFeO}_3$  multifunctional ceramics with tunable photoluminescence and magnetic properties // *J. Physics: Condensed Matter.* 2013. V. 25. 055303. 10 p.
14. Bhushan B., Basumallick A., Bandopadhyay S.K., Vasanthacharya N.Y., Das D. Effect of alkaline earth metal doping on thermal, optical, magnetic and dielectric properties of  $\text{BiFeO}_3$  nanoparticles // *J. Physics: Condensed Matter.* 2009. V. 42. 065004. 8 p.
15. Xiong Z., Cao L. Tailoring morphology, enhancing magnetization and photocatalytic activity via Cr doping in  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$  // *J. Alloys and Compounds.* 2019. V. 773. P. 828–837.

16. *Ly M., Yang H., Xu Y., Chen Q., Liu X., Wei F.* Improving the visible light photocatalytic activities of  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}/\text{MIL-101}/\text{PTH}$  via polythiophene wrapping // *J. Environmental Chemical Engineering*. 2015. V. 3. Issue 2. P. 1003–1008.
17. *Deganello F., Marci G., Deganello G.* Citrate–nitrate auto-combustion synthesis of perovskite-type nanopowders: A systematic approach // *J. European Ceramic Society*. 2009. V. 29. P. 439–450.
18. *Беспрозванных Н.В., Еришов Д.С., Синельщикова О.Ю.* Композиты на основе  $\text{SrO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3$ : синтез и электрофизические свойства // *Журн. общей химии*. 2019. Т. 89. № 12. С. 1955–1960.
19. *Морозов М.И., Ломанова Н.А., Гусаров В.В.* Особенности образования  $\text{BiFeO}_3$  в смеси оксидов висмута и железа(III) // *Журн. общей химии*. 2003. Т. 73. № 11. С. 1772–1776.