Статья поступила в редакцию: 01.10.2026
Статья принята к публикации: 09.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 544.723:546.87:546.284

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23522

Синтез и физико-химические свойства мезопористого кремнезёма из рисовой шелухи, модифицированного оксидом висмута

Муратов Миртохир Мирхалил угли
докторант
Институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Мадримова Озода Шукурллаевна
соискатель
Институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Хошимов Шахром Мансуржон угли
докторант
Институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Эшметов Иззат Дусимбатович
д-р техн. наук, проф.
Институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: izzat.dusimbatovich@gmail.com
Маматалиев Нозим Нимаджонович
д-р хим. наук, гл. науч. сотр., Институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: mamataliyev@gmail.com

Synthesis and physicochemical properties of rice husk-derived mesoporous silica modified with bismuth oxide

Muratov Mirtokhir
Doctoral student
Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Madrimova Ozoda
Applicant, Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Синтез и физико-химические свойства мезопористого кремнезёма из рисовой шелухи, модифицированного оксидом висмута // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Муратов М.М.У. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23522

Khoshimov Shakhrom
Doctoral student
Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Eshmetov Izzat
doctor of Technical Sciences, Professor
Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Mamataliev Nozim
doctor of Chemical Sciences, Chief Researcher
Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель работы – получение мезопористого кремнезёма типа MCM-41 из рисовой шелухи и установление влияния содержания висмута на его структуру, состав и текстурные характеристики. Носитель синтезирован темплатным методом с использованием тетрадецилтриметиламмоний бромида (C_{14}TAB) и модифицирован висмутом (5–20 мас. % Bi) методом пропитки раствором $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ в разбавленной азотной кислоте с последующим прокаливанием при 400 °C. Образцы исследованы методами малоугловой и широкоугловой рентгеновской дифракции, ИК-спектроскопии, рентгенофлуоресцентного анализа, сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом (ЭДС) и низкотемпературной адсорбции азота. Исходный кремнезём имеет двумерную гексагональную мезоструктуру (p6mm) с параметром ячейки a_0 = 41,9 Å, удельную поверхность 909 м^2/г, объём пор 0,60 см^3/г и средний диаметр пор 2,6 нм. Висмут находится в рентгеноаморфном высокодисперсном оксидном состоянии; кристаллические фазы Bi_2O_3 не обнаружены. При 15–20 % Bi гексагональное упорядочение сохраняется, параметр a_0 уменьшается до 40,4 Å. Введение 5 и 10 % Bi снижает удельную поверхность до 578 и 456 м^2/г при неизменном диаметре пор, что обусловлено частичным блокированием каналов. По данным ЭДС фактическое содержание висмута близко к номинальному при 5–15 % Bi и составляет около 15 % при номинальных 20 %, что указывает на предельную ёмкость носителя по висмуту в условиях пропитки. Полученные результаты могут быть использованы при разработке сорбционных и каталитических материалов на основе отходов переработки риса.

Abstract

The aim of the work was to obtain MCM-41-type mesoporous silica from rice husk and to establish the effect of bismuth content on its structure, composition and textural properties. The support was prepared by template synthesis using tetradecyltrimethylammonium bromide (C_{14}TAB) and modified with bismuth (5–20 wt. % Bi) by impregnation with a $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ solution in dilute nitric acid followed by calcination at 400 °C. The samples were characterized by small- and wide-angle X-ray diffraction, IR spectroscopy, X-ray fluorescence analysis, scanning electron

microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and low-temperature nitrogen adsorption. The parent silica exhibits a two-dimensional hexagonal (p6mm) mesostructure with a unit cell parameter a_0 = 41.9 Å, a specific surface area of 909 m^2/g, a pore volume of 0.60 cm^3/g and an average pore diameter of 2.6 nm. Bismuth is present as an X-ray amorphous, highly dispersed oxide; no crystalline Bi_2O_3 phases were detected. At 15–20 % Bi the hexagonal ordering is retained and a_0 decreases to 40.4 Å. Loading 5 and 10 % Bi decreases the surface area to 578 and 456 m^2/g at an unchanged pore diameter owing to partial pore blocking. According to EDS, the actual Bi content is close to the nominal one at 5–15 % Bi and is about 15 % at a nominal 20 %, which indicates a limiting bismuth capacity of the support under the impregnation conditions used. The results can be used in the development of sorbents and catalysts based on rice processing waste.

Ключевые слова: мезопористый кремнезём, MCM-41, рисовая шелуха, тетрадецилтриметиламмоний бромид, оксид висмута, пропитка, текстурные характеристики.

Keywords: mesoporous silica, MCM-41, rice husk, tetradecyltrimethylammonium bromide, bismuth oxide, impregnation, textural properties.

Введение

Упорядоченные мезопористые кремнезёмы семейства M41S, прежде всего MCM-41, с момента их открытия [2, 13] остаются одним из наиболее востребованных классов пористых носителей. Регулярная система цилиндрических каналов диаметром 2–10 нм, высокая удельная поверхность (до 1000 $м^2$/г и более) и возможность варьировать размер пор длиной углеводородного радикала ПАВ-темплата делают их удобной матрицей для закрепления каталитически и сорбционно активных компонентов [5, 18].

Традиционными источниками кремния для синтеза MCM-41 служат тетраэтоксисилан и товарный силикат натрия. С точки зрения ресурсосбережения значительный интерес представляет рисовая шелуха – крупнотоннажный отход переработки риса, зола которой содержит свыше 90 % аморфного SiO_2 [6, 12, 15]. Кремнезём рисовой шелухи, в том числе выделенный щелочной экстракцией из её золы, успешно используется для темплатного синтеза упорядоченных мезопористых материалов типа MCM-41 и SBA-15 [3, 7, 16]. Для Республики Узбекистан, где рис выращивается в промышленных масштабах, использование этого сырья имеет и практическое значение.

Оксид висмута и соединения на его основе привлекают внимание как фотокатализаторы видимого диапазона, компоненты оксидных катализаторов и сорбенты, в том числе для улавливания радиоактивного иода, где эффективными оказались и висмутсодержащие мезопористые кремнезёмы [8, 10]. Однако массивный Bi_2O_3 имеет малую удельную поверхность и склонен к полиморфным превращениям при нагревании [9]. Кремнезём рисовой шелухи уже применялся для получения висмутсодержащих фотокатализаторов на основе гетероструктур β-Bi_2O_3/Bi_2SiO_5 [1]. Нанесение висмута на мезопористый кремнезём позволяет получить высокодисперсную оксидную фазу на развитой поверхности, однако при этом необходимо контролировать сохранность мезоструктуры носителя и степень блокирования пор.

Цель работы – синтез мезопористого кремнезёма типа MCM-41 из рисовой шелухи с использованием тетрадецилтриметиламмоний бромида, его модифицирование висмутом в интервале 5–20 мас. % и исследование влияния содержания висмута на структуру, состав, морфологию и текстурные характеристики полученных материалов.

Материалы и методы

Синтез носителя. Мезопористый кремнезём получали темплатным методом, используя в качестве источника кремния рисовую шелуху, а в качестве структурообразующего агента – тетрадецилтриметиламмоний бромид (C_{14}TAB). Темплат удаляли прокаливанием на воздухе при 600 °C со скоростью нагрева 1 °C/мин. Полученный носитель обозначен TDTAB.

Модифицирование висмутом. Висмут вводили методом пропитки. Навеску $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ растворяли в смеси азотной кислоты (56 %) и дистиллированной воды в объёмном соотношении 3: 7; объём пропиточного раствора составлял 1,5 мл на 1 г носителя. Содержание висмута (5, 10, 15 и 20 мас. %) рассчитывали в пересчёте на металл от суммарной массы сухого образца (Bi + SiO_2); например, образец с 20 % Bi соответствует 20 г Bi на 80 г SiO_2. Пропитку проводили при комнатной температуре в течение 30 мин, затем образцы сушили при 120 °C в течение 8 ч и прокаливали на воздухе при 400 °C в течение 3 ч (скорость нагрева 2 °C/мин). Образцы обозначены TDTAB-xBi-400, где x – номинальное содержание Bi. Навески соли приведены в табл. 1.

Таблица 1. Условия приготовления образцов

Образец	Bi (номин.), мас. %	$Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$, г на 1 г SiO_2	Bi_2O_3 в прокалённом образце, мас. %
TDTAB	0	–	0
TDTAB-5%Bi-400	5	0,122	5,5
TDTAB-10%Bi-400	10	0,258	11,0
TDTAB-15%Bi-400	15	0,410	16,4
TDTAB-20%Bi-400	20	0,580	21,8

Методы исследования

Рентгеновские дифрактограммы регистрировали на дифрактометре с CuKα-излучением (λ = 1,5406 Å) в интервале 2θ = 3–70° (для части образцов – до 90°) с шагом 0,01°. Межплоскостные расстояния рассчитывали по уравнению Вульфа–Брэгга, параметр гексагональной ячейки – по соотношению a0 = 2d110 = 4d200/√3. ИК-спектры регистрировали на ИК-Фурье спектрометре в области 4000–450 см−1. Элементный состав определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФлА; каналы Si и Bi, интенсивности в имп/с) и энергодисперсионным анализом (ЭДС, безэталонный ZAF-метод, 15 кВ) на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-IT210; микрофотографии получены в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 3 кВ. Изотермы адсорбции–десорбции азота измеряли при 77 K на анализаторе Quantachrome Autosorb iQ после дегазации при 200 °C (образец до прокаливания – при 100 °C). Адсорбционные измерения выполнены для образцов TDTAB, TDTAB-5 %Bi-400 и TDTAB-10 %Bi-400,

а также для носителя до удаления темплата. Удельную поверхность рассчитывали многоточечным методом БЭТ [4], общий объём пор – по адсорбции при P/P0 ≈ 0,995, средний диаметр пор – по соотношению D = 4V/S.

Результаты и обсуждение

Рентгенофазовый анализ. На малоугловой дифрактограмме носителя TDTAB (рис. 1а) присутствуют три рефлекса при 2θ = 4,21; 4,86 и 6,42° (d = 20,95; 18,15 и 13,75 Å). Отношение межплоскостных расстояний 1: 1/√(4/3): 1/√(7/3) соответствует индексам (110), (200) и (210) двумерной гексагональной решётки p6mm, характерной для MCM-41 [2, 13]. Параметр a_0, рассчитанный по всем трём рефлексам, согласуется в пределах 0,1 Å и равен 41,9 Å. Наиболее интенсивный рефлекс (100) при 2θ ≈ 2,4° лежит вне интервала съёмки.

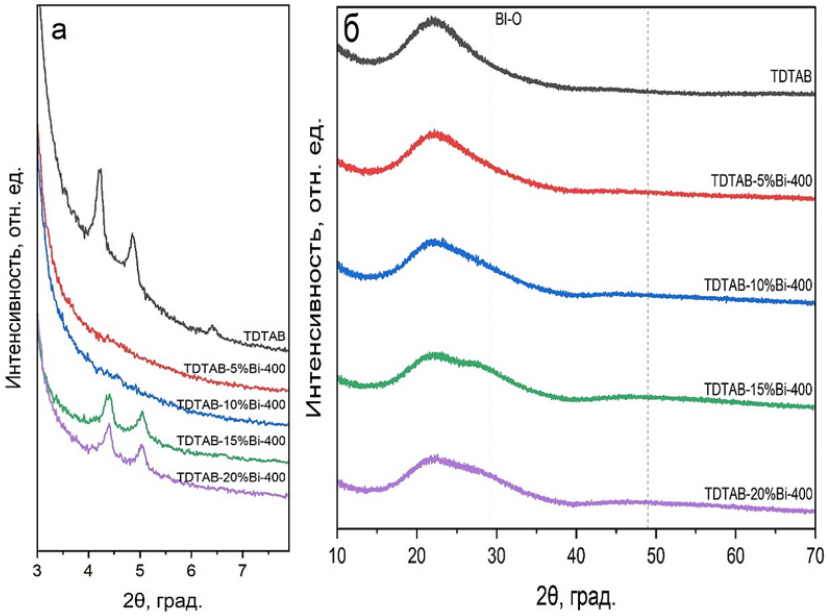


Рисунок 1. Дифрактограммы образцов: а – малоугловая область; б – широкоугловая область

Таблица 2. Параметры мезоструктуры по данным малоугловой рентгеновской дифракции

Образец	$2\theta_{110}$, °	d_{110}, Å	$2\theta_{200}$, °	d_{200}, Å	a_0, Å
TDTAB	4,21	20,95	4,86	18,15	41,9
TDTAB-5%Bi-400	н/р	–	н/р	–	–
TDTAB-10%Bi-400	н/р	–	н/р	–	–
TDTAB-15%Bi-400	4,38	20,14	5,03	17,54	40,4
TDTAB-20%Bi-400	4,38	20,16	5,03	17,55	40,4

Примечание: н/р – рефлексы не разрешаются на уровне фона.

У образцов TDTAB-15 %Bi-400 и TDTAB-20 %Bi-400 рефлексы (110) и (200) сохраняются, но смещаются в сторону больших углов (4,38 и 5,03°), их интенсивность снижается примерно в 2,5 раза, а рефлекс (210) не проявляется. Параметр a_0 уменьшается до 40,4 Å, то есть на ≈3,6 %. Сжатие элементарной ячейки связано с дополнительной термообработкой и конденсацией силанольных групп стенок, а снижение интенсивности –

с уменьшением контраста электронной плотности между стенкой и порой при частичном заполнении каналов соединениями висмута и с частичным разупорядочиванием каркаса при кислотной обработке. У образцов с 5 и 10 % Bi рефлексы мезоструктуры на уровне фона не разрешаются, что указывает на более глубокое разупорядочивание каркаса в этих образцах; выяснение причин такого немонотонного поведения требует дополнительного исследования.

В широкоугловой области (рис. 1б) у всех образцов наблюдается диффузное гало с максимумом при 2θ ≈ 22°, характерное для аморфного SiO_2. Узкие рефлексы кристаллических модификаций Bi_2O_3 (α-, β-) отсутствуют даже при номинальном содержании 20 % Bi. С увеличением содержания висмута растёт интенсивность широких компонент при 2θ ≈ 28–30° и 46–50°, где располагаются наиболее интенсивные отражения оксидов висмута [9]: отношение интенсивностей I_{29}/I_{22} возрастает от 0,54 для TDTAB до 0,63; 0,70; 0,81 и 0,78 для образцов с 5, 10, 15 и 20 % Bi соответственно. Это свидетельствует о том, что висмут после прокаливания при 400 °C находится в рентгеноаморфном высокодисперсном оксидном состоянии, по-видимому, в виде кластеров в каналах и на внешней поверхности частиц носителя.

ИК-спектроскопия. ИК-спектры образцов (рис. 2) типичны для аморфного кремнезёма [11]. Интенсивная полоса при 1049–1057 $см^{-1}$ с плечом около 1210 $см^{-1}$ отвечает асимметричным валентным колебаниям связей Si–O–Si, полоса при 800 $см^{-1}$ – симметричным валентным, а поглощение вблизи 460 $см^{-1}$ – деформационным колебаниям O–Si–O. Слабая широкая полоса при 3400 $см^{-1}$ и полоса при 1630 $см^{-1}$ относятся к валентным колебаниям OH-групп и деформационным колебаниям адсорбированной воды. Полосы валентных колебаний C–H метиленовых групп темплата (2850–2925 $см^{-1}$) практически отсутствуют, что подтверждает полноту удаления C_{14}TAB при прокаливании.

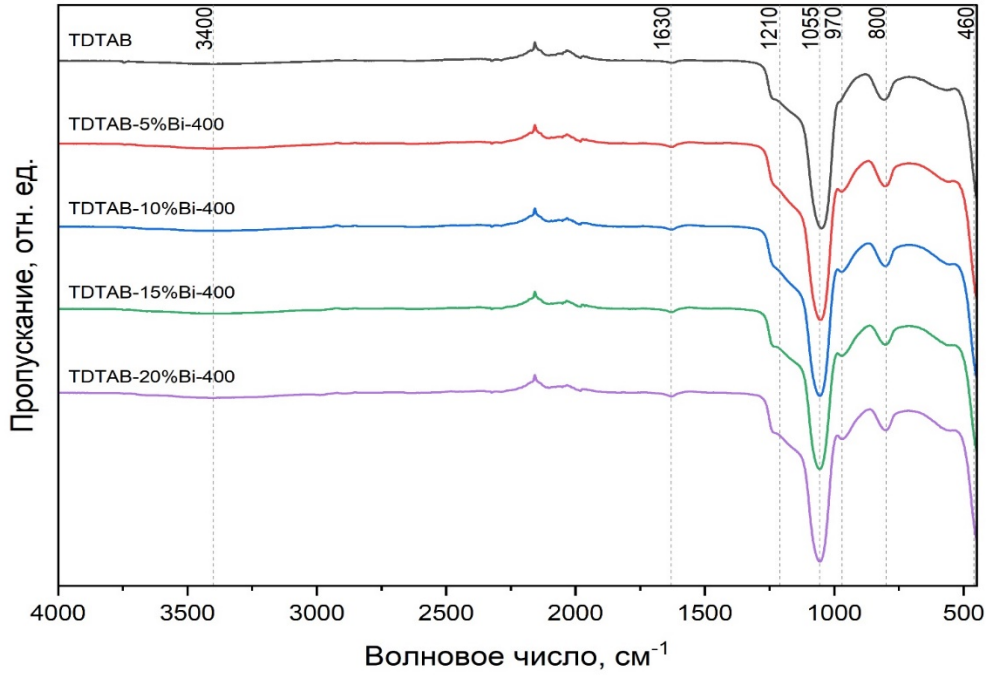


Рисунок 2. ИК-спектры исходного и модифицированных висмутом образцов (область 2400–1900 $см^{-1}$ исключена из-за аппаратного артефакта)

Введение висмута приводит к смещению основной полосы Si–O–Si от 1049 $см^{-1}$ (TDTAB) к 1053–1057 $см^{-1}$ и к усилению полосы при 970 $см^{-1}$, которая у исходного носителя проявляется лишь как слабое плечо. Отношение оптических плотностей A_{970}/A_{1055} возрастает от 0,15 для TDTAB до 0,18–0,21 для модифицированных образцов. Полосу при 960–970 $см^{-1}$ относят к валентным колебаниям Si–OH и Si–O–M (M – гетероатом) [11]; её усиление указывает на гидроксилирование поверхности при кислотной пропитке и на взаимодействие оксидных форм висмута с силанольными группами носителя с образованием связей Si–O–Bi. Взаимодействие оксида висмута с кремнезёмом рисовой шелухи при термообработке может приводить и к образованию силиката Bi_2SiO_5 [1]; в условиях настоящей работы (400 °C) кристаллические силикатные фазы рентгенографически не выявлены. Собственные колебания Bi–O располагаются ниже 600 $см^{-1}$ и перекрываются с деформационными колебаниями O–Si–O.

Элементный состав и морфология. По данным РФлА во всех модифицированных образцах присутствует висмут; отношение интенсивностей линий Bi/Si составляет 0,69; 1,14; 1,86 и 1,53 для образцов с 5, 10, 15 и 20 % Bi. Количественная оценка выполнена методом ЭДС (табл. 3). Поскольку безэталонный анализ занижает содержание кислорода (атомное отношение O/Si в исходном образце ≈1 вместо 2), содержание висмута дополнительно пересчитано на систему Bi + SiO_2 исходя из стехиометрии кремнезёма.

Таблица 3. Содержание висмута в образцах по данным ЭДС и РФлА

Образец	Bi (номин.), мас. %	Bi (ЭДС), мас. %	Bi/(Bi + SiO_2), мас. %	I_{Bi}/I_{Si} (РФлА)
TDTAB	0	не обн.	0	–
TDTAB-5%Bi-400	5	8,5 ± 0,7 (2)	6,6	0,69
TDTAB-10%Bi-400	10	12,2 ± 2,4 (2)	9,5	1,14
TDTAB-15%Bi-400	15	20,8 ± 4,2 (2)	16,7	1,86
TDTAB-20%Bi-400	20	19,7 ± 1,1 (3)	15,3	1,53

Примечание: для ЭДС приведены среднее ± стандартное отклонение, в скобках – число анализируемых участков.

Пересчитанное содержание висмута для образцов с 5, 10 и 15 % Bi близко к номинальному (6,6; 9,5 и 16,7 %), тогда как для образца с номинальными 20 % оно составляет лишь 15,3 %. Этот результат согласуется с данными РФлА, по которым отношение I_{Bi}/I_{Si} для образца с 20 % Bi ниже, чем для образца с 15 % Bi. По-видимому, при содержании около 15–16 % Bi достигается предел, при котором весь висмут из пропиточного раствора может быть удержан носителем в условиях используемой методики; избыток соли может частично теряться при сушке и прокаливании. Разброс значений между участками (до ±4 %) указывает на некоторую неоднородность распределения висмута на микронном уровне.

На СЭМ-изображениях (рис. 3) исходный носитель и модифицированные образцы представлены рыхлыми агрегатами частиц размером от 0,3 до 1–2 мкм. Отдельные крупные кристаллиты оксида висмута не наблюдаются, что согласуется с рентгеноаморфным состоянием висмута. У образца с 20 % Bi агрегаты выглядят более компактными, с более чёткими границами частиц.

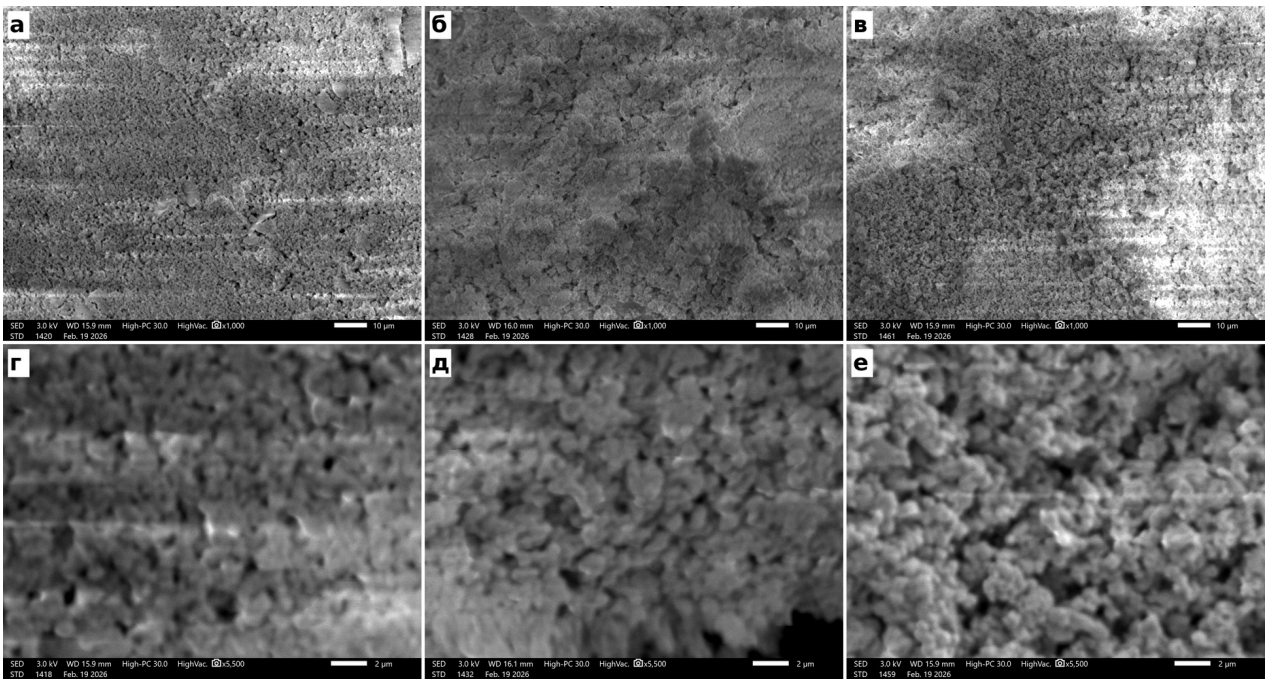


Рисунок 3. СЭМ-изображения образцов TDTAB (а, г), TDTAB-5 %Bi-400 (б, д) и TDTAB-20 %Bi-400 (в, е) при увеличении ×1000 (а–в) и ×5500 (г–е)

Текстурные характеристики. Изотермы адсорбции–десорбции азота представлены на рис. 4, рассчитанные параметры – в табл. 4. Образец носителя до прокаливания практически непорист ($S_{БЭТ}$ = 12 м^2/г, V = 0,014 см^3/г), поскольку каналы заполнены мицеллами C_{14}TAB. Удаление темплата и последующее модифицирование приводят к образованию развитой пористой структуры.

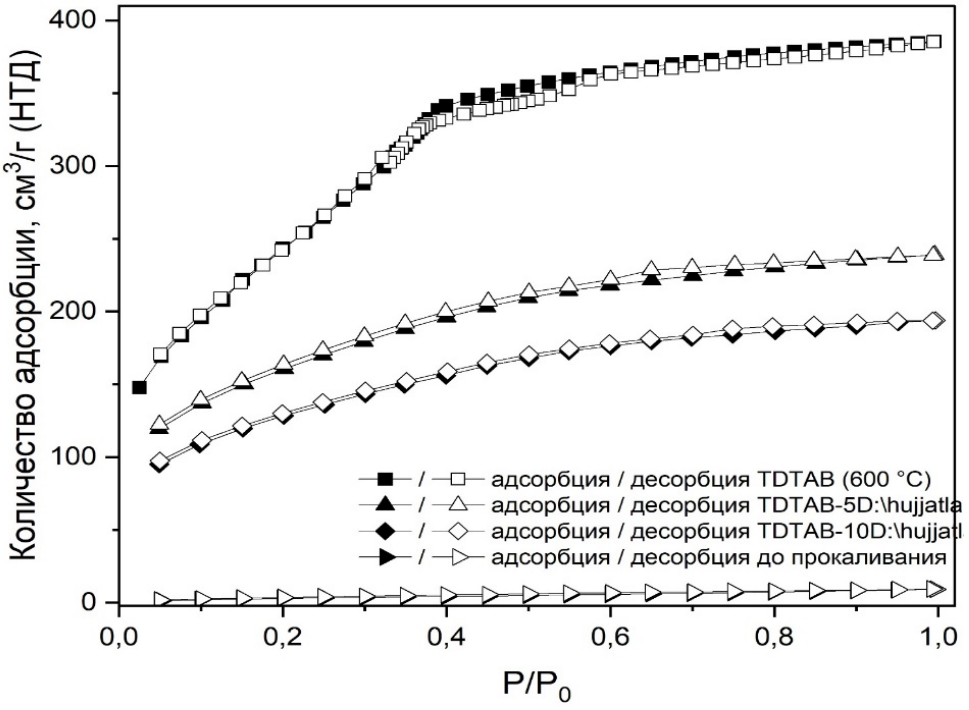


Рисунок 4. Изотермы адсорбции (закрашенные символы) и десорбции (незакрашенные символы) азота при 77 K

Изотерма носителя TDTAB, прокалённого при 600 °C, относится к типу IV(b) по классификации IUPAC [17]: после заполнения монослоя наблюдается резкий подъём адсорбции в интервале P/P_0 = 0,30–0,40, обусловленный капиллярной конденсацией в однородных цилиндрических мезопорах, за которым следует протяжённое плато. Узкая петля гистерезиса в области P/P_0 = 0,42–0,58 указывает на небольшую долю пор с сужениями. Удельная поверхность носителя составляет 909 $м^2/г$, объём пор – 0,598 $см^3/г$, средний диаметр пор D = 4V/S – 2,63 нм. С учётом параметра ячейки a_0 = 41,9 Å толщина стенки оценивается в ≈1,6 нм. Полученные величины типичны для материалов MCM-41, синтезированных с C_{14}TAB [14, 18].

Изотермы образцов TDTAB-5 %Bi-400 и TDTAB-10 %Bi-400 сохраняют значительную адсорбцию в области малых давлений, однако ступень капиллярной конденсации вырождается в плавный подъём до P/P_0 ≈ 0,5, а петля гистерезиса становится узкой и растянутой. Это указывает на уширение распределения пор по размерам и частичную потерю однородности каналов, что согласуется с исчезновением малоугловых рефлексов у этих образцов (рис. 1а).

Таблица 4. Текстурные характеристики образцов по данным адсорбции азота

Образец	**$S_{БЭТ}$, $м^2/г$**	**$C_{БЭТ}$**	**$V_{пор}$, $см^3/г$**	**D = 4V/S, нм**	**$S_{БЭТ}$ на 1 г SiO_2, $м^2/г$**
TDTAB (до прокаливания)	12	–	0,014	–	–
TDTAB (600 °C)	909	57	0,598	2,63	909
TDTAB-5%Bi-400	578	116	0,371	2,56	612
TDTAB-10%Bi-400	456	136	0,301	2,64	512

Введение 5 и 10 % Bi снижает удельную поверхность с 909 до 578 и 456 $м^2/г$ (на 36 и 50 %), объём пор – с 0,598 до 0,371 и 0,301 $см^3/г$ (на 38 и 50 %). В пересчёте на 1 г кремнезёма (с учётом доли Bi_2O_3, табл. 1) поверхность уменьшается до 612 и 512 $м^2/г$, то есть на 33 и 44 %. Следовательно, снижение не сводится к «разбавлению» носителя тяжёлым оксидом и обусловлено частичным блокированием каналов оксидными формами висмута, а также частичным разупорядочиванием каркаса при кислотной пропитке. Средний диаметр пор при этом практически не меняется (2,56–2,64 нм): часть каналов блокируется целиком (закупоривание устьев), а оставшиеся сохраняют исходный размер. Рост константы $C_{БЭТ}$ (57 → 116 → 136) отражает усиление взаимодействия азота с поверхностью, модифицированной оксидом висмута.

Заключение

Из рисовой шелухи с использованием тетрадецилтриметиламмоний бромида получен мезопористый кремнезём типа MCM-41 с двумерной гексагональной структурой p6mm (a_0 = 41,9 Å).

Модифицирование носителя висмутом методом пропитки раствором $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ в разбавленной HNO_3 с прокаливанием при 400 °C приводит к формированию рентгеноаморфной высокодисперсной оксидной фазы висмута; кристаллические модификации Bi_2O_3 не образуются вплоть до 20 % Bi. При содержании 15–20 % Bi гексагональное упорядочение сохраняется при сжатии ячейки до a_0 = 40,4 Å.

По данным ИК-спектроскопии введение висмута сопровождается смещением полосы Si–O–Si к 1053–1057 $см^{-1}$ и усилением полосы при 970 $см^{-1}$, что указывает на взаимодействие висмута с силанольными группами носителя. Фактическое содержание висмута близко к номинальному при 5–15 % Bi; при номинальных 20 % оно составляет около 15 %, что свидетельствует о предельной ёмкости носителя по висмуту в условиях используемой методики пропитки.

Носитель обладает удельной поверхностью 909 $м^2/г$ и объёмом пор 0,60 $см^3/г$ при диаметре пор 2,6 нм. Введение 5 и 10 % Bi снижает поверхность до 578 и 456 $м^2/г$ (на 33 и 44 % в пересчёте на SiO_2) при неизменном диаметре пор, что обусловлено частичным блокированием каналов оксидными формами висмута.

Список литературы

1. Arefieva O.D., Vasilyeva M.S., Lukiyanchuk I.V. et al. Preparation and photocatalytic properties of β-Bi2O3/Bi2SiO5 heterostructures // Russian Journal of Inorganic Chemistry. – 2021. – T. 66, № 6. – P. 943–949. – DOI: 10.1134/S0036023621060036.
2. Beck J.S., Vartuli J.C., Roth W.J. et al. A new family of mesoporous molecular sieves prepared with liquid crystal templates // Journal of the American Chemical Society. – 1992. – T. 114. – P. 10834–10843.
3. Bhagiyalakshmi M., Yun L.J., Anuradha R., Jang H.T. Utilization of rice husk ash as silica source for the synthesis of mesoporous silicas and their application to CO2 adsorption through TREN/TEPA grafting // Journal of Hazardous Materials. – 2010. – T. 175. – P. 928–938.
4. Brunauer S., Emmett P.H., Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers // Journal of the American Chemical Society. – 1938. – T. 60. – P. 309–319.
5. Ciesla U., Schüth F. Ordered mesoporous materials // Microporous and Mesoporous Materials. – 1999. – T. 27. – P. 131–149.
6. Della V.P., Kühn I., Hotza D. Rice husk ash as an alternate source for active silica production // Materials Letters. – 2002. – T. 57. – P. 818–821.
7. Gebretatios A.G. Kadiri Kanakka Pillantakath A.R., Witoon T. et al. Rice husk waste into various template-engineered mesoporous silica materials for different applications: a comprehensive review on recent developments // Chemosphere. – 2023. – T. 310. – Art. 136843. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136843.
8. Hao Y., Tian Z., Liu C., Xiao C. Recent advances in the removal of radioactive iodine by bismuth-based materials // Frontiers in Chemistry. – 2023. – T. 11. – Art. 1122484. – DOI: 10.3389/fchem.2023.1122484.

9. Harwig H.A., Gerards A.G. The polymorphism of bismuth sesquioxide // Thermochimica Acta. – 1979. – T. 28. – P. 121–131.
10. He R., Xu D., Cheng B. et al. Review on nanoscale Bi-based photocatalysts // Nanoscale Horizons. – 2018. – T. 3. – P. 464–504.
11. Innocenzi P. Infrared spectroscopy of sol–gel derived silica-based films: a spectra-microstructure overview // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2003. – T. 316. – P. 309–319.
12. Kalapathy U., Proctor A., Shultz J. A simple method for production of pure silica from rice hull ash // Bioresource Technology. – 2000. – T. 73. – P. 257–262.
13. Kresge C.T., Leonowicz M.E., Roth W.J. et al. Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism // Nature. – 1992. – T. 359. – P. 710–712.
14. Kruk M., Jaroniec M., Sayari A. Application of large pore MCM-41 molecular sieves to improve pore size analysis using nitrogen adsorption measurements // Langmuir. – 1997. – T. 13. – P. 6267–6273.
15. Rodriguez-Otero A., Vargas V., Galarneau A. et al. Sustainable harnessing of SiO2 nanoparticles from rice husks: a review of the best synthesis and applications // Processes. – 2023. – T. 11, № 12. – Art. 3373. – DOI: 10.3390/pr11123373.
16. Sennoun L., Lee C.-C., Fretel Y. et al. Direct pseudomorphic transformation of silica from rice husk into organo-functionalized MCM-41 // New Journal of Chemistry. – 2024. – T. 48. – P. 7052–7069. – DOI: 10.1039/D4NJ00715H.
17. Thommes M., Kaneko K., Neimark A.V. et al. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) // Pure and Applied Chemistry. – 2015. – T. 87. – P. 1051–1069.
18. Zhao X.S., Lu G.Q., Millar G.J. Advances in mesoporous molecular sieve MCM-41 // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2090. – T. 35. – P. 2075–2090.