

## НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ВИСМУТА ДЛЯ ФОТОКАТАЛИЗА И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Эшонкулова Учкун Худойназар угли*

*Каршинский государственный  
технический университет*

*Узбекистан, Карши*

**E-mail: [uchqun.eshonqulov91@mail.ru](mailto:uchqun.eshonqulov91@mail.ru)**

*Аминов Умиджон Гайбулла угли*

*Каршинский международный университет*

*Узбекистан, Карши*

**E-mail: [umid9070707@gmail.com](mailto:umid9070707@gmail.com)**

**Аннотация:** В работе представлен обзор физических и химических свойств висмута и его соединений, а также рассмотрены современные направления их практического применения. Отмечено, что оксиды, сульфиды, халькогениды, ванадат и оксигалогениды висмута обладают уникальными оптическими, электрическими и каталитическими характеристиками, что делает их востребованными в различных областях науки и техники. Особое внимание уделено наночастицам на основе висмута, которые демонстрируют высокую фотокаталитическую активность, термоэлектрические и полупроводниковые свойства благодаря своей слоистой структуре и узкой ширине запрещённой зоны.

**Ключевые слова:** висмут, наночастицы, халькогениды, оксигалогениды, фотокатализ, полупроводники.

Висмут (Bi) — это химический элемент с атомным номером 83, относящийся к переходным металлам. В природе он встречается как диамагнитный элемент. Наибольшее промышленное значение имеют его оксиды и сульфиды. Висмут характеризуется низкой теплопроводностью, высоким

коэффициентом Холла и значительным электрическим сопротивлением. Тонкие покрытия из висмута на поверхности различных материалов способны проявлять свойства полупроводников.

Особенностью металла является то, что его жидкая фаза плотнее твердой, вследствие чего при кристаллизации объем увеличивается примерно на 3%. Благодаря этому висмут применяют в составе сплавов для компенсации усадочных процессов других компонентов. Элемент нетоксичен, имеет сравнительно низкую температуру плавления (271 °С), что делает его удобным для технологического применения.

По данным распределения, около 63% всего объема висмута используется в производстве косметики, пигментов и фармацевтических препаратов. Примерно 26% направляется на металлургические процессы, включая гальваническое покрытие и литье. Еще 7% расходуется на изготовление сплавов, припоев и боеприпасов, а оставшиеся 4% находят применение в научных исследованиях.

### **Наночастицы на основе висмута**

Использование наночастиц висмута вместо традиционных объемных соединений или материалов на его основе в последние годы получило значительное развитие благодаря их уникальным свойствам. В отличие от массивных образцов, наночастицы демонстрируют особые характеристики, такие как высокая оптическая активность, электрическая и тепловая чувствительность, фотокаталитическая активность и магнетизм. Подобные эффекты в первую очередь объясняются большой удельной поверхностью и малыми размерами частиц.

Синтез наноструктур висмута осуществляется в основном методами коллоидной химии с использованием солей висмута в качестве прекурсоров. Для получения устойчивых и контролируемых наночастиц применяют модификаторы поверхности и восстановители, что позволяет снизить агрегацию и сформировать кристаллические структуры с заданными параметрами. Среди перспективных объектов особое внимание уделяется наночастицам

халькогенидов висмута, ванадата висмута, оксигалогенидов и других соединений на основе Bi.

### Халькогениды висмута

Халькогениды висмута представляют собой класс фотоэлектрических соединений, включающих висмут и элементы группы VI (O, S, Se, Te). Общая формула этих соединений —  $\text{Bi}_2\text{E}_3$ . Наиболее известными представителями являются оксид висмута ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ), сульфид ( $\text{Bi}_2\text{S}_3$ ), селенид ( $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ) и теллурид ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ). Благодаря своим полупроводниковым свойствам эти материалы широко применяются в различных отраслях, особенно в наноэлектронике и оптоэлектронике.

$\text{Bi}_2\text{O}_3$  является p-типом полупроводника и существует в виде шести полиморфных модификаций:  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -,  $\omega$ -,  $\varepsilon$ - и  $\delta$ -форм. При комнатной температуре устойчива моноклинная  $\alpha$ -фаза, которая при нагреве переходит в кубическую  $\delta$ -структуру. Другие кристаллические формы включают тетрагональную  $\beta$ -фазу, кубическую  $\gamma$ -фазу, орторомбическую  $\varepsilon$ -структуру и триклинную  $\omega$ -модификацию. Эти разновидности характеризуются высоким показателем преломления, узкой шириной запрещенной зоны (2,40–2,80 эВ), высокой диэлектрической проницаемостью и выраженной фотопроводимостью.

Особый интерес представляет амфотерный характер  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , так как в ряде исследований отмечена возможность одновременного проявления p- и n-проводимости в зависимости от метода синтеза. Такие свойства делают халькогениды висмута востребованными материалами в фотокатализе, солнечной энергетике и создании новых наноструктурированных приборов.

Селенид висмута ( $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ) имеет слоистую ламинарную структуру, где толщина одного слоя составляет около 0,96 нм. В пределах слоя атомы связаны ковалентными связями вдоль оси z в последовательности Se–Bi–Se–Bi–Se. Благодаря слабым межслоевым взаимодействиям возможно получение тонких нанопластин  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  методом эксфолиации. Этот материал относится к узкозонным полупроводникам с шириной запрещенной зоны 0,3 эВ и отличается

высокой подвижностью носителей заряда. Указанные свойства делают  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  перспективным для применения в фотоэлектрохимических и термоэлектрических устройствах, а также в оптических системах записи и фотокатализе.

Теллурид висмута ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) характеризуется зоной шириной 0,15 эВ, тригональной кристаллической решеткой и высокой температурой плавления (585 °C). При легировании сурьмой или селеном этот материал проявляет высокую эффективность как термоэлектрик при комнатных условиях. Благодаря своим уникальным свойствам  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  широко используется в производстве термоэлектродвигателей и систем охлаждения.

### **Ванадат висмута**

Ванадат висмута ( $\text{BiVO}_4$ ) может существовать в трех основных кристаллических модификациях: тетрагональной шеелитоподобной, моноклинной шеелитоподобной и тетрагональной цирконоподобной. Моноклинная фаза отличается высокой фотокаталитической активностью, что связано с узкой шириной запрещенной зоны (около 2,4 эВ). Благодаря способности эффективно поглощать видимый свет,  $\text{BiVO}_4$  активно исследуется для применения в экологически значимых процессах, таких как фотокаталитическая очистка и ремедиация окружающей среды.

Среди достоинств ванадата висмута отмечаются его экологическая безопасность, высокая устойчивость к фотокоррозии, нетоксичность и относительно низкая себестоимость. Эти свойства обеспечивают материалу конкурентные преимущества по сравнению с другими полупроводниковыми оксидами и делают его перспективным объектом для практического внедрения в фотокатализ и смежные области.

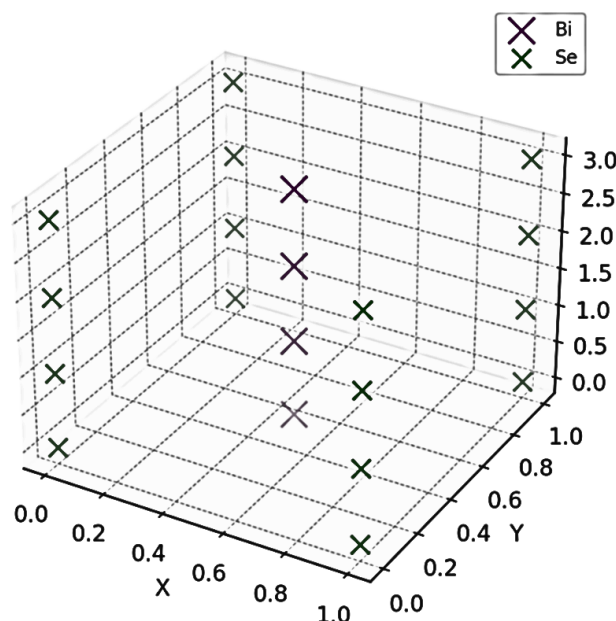


Рисунок 1. Структура селенида висмута

### Оксигалогениды висмута (BiOX)

Соединения типа BiOX, где X = Cl, Br или I, относятся к классу слоистых полупроводников, кристаллизующихся в тетрагональной решетке матлокита. В их структуре каждый атом висмута окружен атомами кислорода и галогена, формируя асимметричную тетраэдрическую конфигурацию X–Bi–O–Bi–X. Такое строение обуславливает широкий спектр уникальных свойств — от оптических и механических до электрических и каталитических. Благодаря этим характеристикам материалы BiOX находят практическое применение в селективном окислении спиртов, органическом синтезе, процессах фотокаталитического расщепления воды, очистке воздуха и фотодеградациии органических загрязнителей сточных вод.

### Оксихлорид висмута (BiOCl)

BiOCl представляет собой полупроводник р-типа с выраженной ионной проводимостью и значительными оптическими и каталитическими возможностями. Его структура состоит из ионов  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Bi}^{3+}$  и  $\text{O}^{2-}$ , образующих тетрагональную слоистую решетку вида  $[\text{Cl–Bi–O–Bi–Cl}]_n$ . Вдоль оси С атомы хлора обеспечивают невалентные взаимодействия между слоями. В такой

конфигурации формируется тетрагональная пирамидальная фаза, где атом Bi занимает центральное положение, а связи Bi–Cl и Bi–O расположены противоположно друг другу. BiOCl проявляет активность в УФ-диапазоне, имея экспериментальную ширину запрещенной зоны 3,1–3,5 эВ (теоретические расчеты — 2,8–2,9 эВ), что делает его перспективным фотокатализатором.

**Таблица 1**

**Сравнительные характеристики оксигалогенидов висмута (BiOCl и BiOBr)**

| <b>Характеристика</b>             | <b>BiOCl</b>                                                                                                          | <b>BiOBr</b>                                                          |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Тип проводимости                  | р-тип                                                                                                                 | р-тип                                                                 |
| Кристаллическая структура         | Тетрагональная, слоистая; решетка типа матлокита $[Cl-Bi-O-Bi-Cl]_n$                                                  | Тетрагональная, слоистая; аналогичная BiOCl, но с Br                  |
| Основные ионы в составе           | $Bi^{3+}$ , $O^{2-}$ , $Cl^-$                                                                                         | $Bi^{3+}$ , $O^{2-}$ , $Br^-$                                         |
| Пространственная организация      | Центральный атом Bi связан с четырьмя атомами O и четырьмя Cl; формируется асимметричная тетраэдрическая конфигурация | Аналогичная конфигурация с атомами Br вместо Cl                       |
| Взаимодействие между слоями       | Невалентные связи за счет атомов Cl вдоль оси C                                                                       | Невалентные связи за счет атомов Br вдоль оси C                       |
| Ширина запрещенной зоны ( $E_g$ ) | Экспериментально: 3,1–3,5 эВ; теоретически: 2,8–2,9 эВ                                                                | Непрямая зона, более узкая, подходит для видимого света (~2,6–2,8 эВ) |

| Оптические свойства           | Высокая активность в УФ-диапазоне                                         | Высокая активность в видимом диапазоне                                                  |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Фотокаталитическая активность | Эффективен в реакциях под действием УФ-излучения                          | Эффективен в реакциях при видимом свете, лучшее разделение электронно-дырочных пар      |
| Химическая стабильность       | Хорошая, устойчива к фотокоррозии                                         | Высокая, устойчива к фотокоррозии                                                       |
| Области применения            | Фотокаталитическое окисление, очистка воздуха, деградация органики под УФ | Очистка сточных вод, деградация органики под видимым светом, экологические фотопроцессы |

### Оксибромид висмута (BiOBr)

BiOBr, также относящийся к р-типу полупроводников, характеризуется высокой химической стабильностью, хорошими оптическими параметрами и эффективной фотокаталитической активностью. Слоистая тетрагональная структура BiOBr и подходящая ширина запрещенной зоны обеспечивают его высокую активность в видимом свете, что способствует эффективному разделению электронно-дырочных пар. Это свойство делает BiOBr особенно востребованным при фотокаталитическом разложении органических загрязнителей и в процессах очистки окружающей среды.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ показывает, что соединения висмута и их наноструктуры обладают уникальными физико-химическими характеристиками, которые обеспечивают широкий спектр их применения в современных технологиях. Оксиды и халькогениды висмута отличаются выраженными полупроводниковыми свойствами, высокой фотопроводимостью и устойчивостью к фотокоррозии, что делает их перспективными материалами для фото- и термоэлектрических устройств. Ванадат висмута ( $\text{BiVO}_4$ ) и оксигалогениды ( $\text{BiOCl}$ ,  $\text{BiOBr}$ ,  $\text{BiOI}$ ) демонстрируют высокую каталитическую активность и эффективность в процессах фотодегradации органических загрязнителей, что открывает возможности их применения в экологических технологиях очистки воды и воздуха. Таким образом, висмутовые материалы представляют собой важное направление научных исследований и разработок, соединяющее фундаментальные аспекты химии и физики с практическими задачами энергетики, экологии и нанoeлектроники.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhou, Y., Dong, F., & Jin, S. (Eds.). (2021). *Bismuth: Advanced applications and defects characterization*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.95071>
2. Г.И. Дамская, С.С. Тихонов, Г.Я. Лейзерович. «Разработка процесса получения порошкообразного железа как осадителя при комбинированном процесса обогащения окисленных и смешанных медных руд» // Москва, 1974, С. 186–196.
3. Metson, J. Bismuth – Production, Properties and Applications // *Journal of Metals*, 2011, Vol. 63(12), pp. 72–78.
4. Hansen, H., Zhang, J., Li, Y. Structural and photocatalytic properties of bismuth oxyhalides ( $\text{BiOX}$ ,  $X = \text{Cl, Br, I}$ ) // *Materials Chemistry and Physics*, 2023, Vol. 295, pp. 127–134.
5. Chen, W.-Q., Graedel, T.E. The Potential for Mining Trace Elements from Coal Ash: The Case of Bismuth and Rare Metals // *Environmental Science & Technology*, 2012, Vol. 46(21), pp. 11956–11963.

6. Zhao, Z., Dai, Y., Huang, B. Bismuth-based semiconductors for photocatalytic applications // *Progress in Materials Science*, 2017, Vol. 83, pp. 24–46.
7. Абдисамиевич С.А., Мамарасулович Р.У. и Азаматугли К.О. (2025). РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ГЛИНОЗЕМИЯ ИЗ МЕСТНОГО СЫРЬЯ. Sanoatda raqamli technologiylar/Цифровые технологии в промышленности, 3 (2), 105-111.
8. O'G'Li, T. S. S., Mamarasulovich, R. Z. U. B., & O'G'Li, E. U. X. (2024). KALSIY TARKIBLI QO 'SHIMCHALAR TARKIBIDAGI ALYUMOGETIT VA BOKSITDAN GLINOZEMNI AJRATIB OLISH. Строительство и образование, 3, 203-210.
9. Abdisamiyevich, S. A., Xudaynazar o'g'li, E. U., Mamarasulovich, R. U., & Ilyosjon o'g'li, X. I. (2025). ROASTING OF ALUMINA-CONTAINING MATERIAL IN A ROTARY KILN. GREAT BRITAIN-SCIENTIFIC REVIEW OF THE PROBLEMS AND PROSPECTS OF MODERN SCIENCE AND EDUCATION, 1(1), 22-28.
10. Mamarasulovich, R. U. (2025). INFLUENCE OF ULTRASOUND ON NITRIC ACID LEACHING OF ALUMINA FROM KAOLIN CLAYS. Лучшие интеллектуальные исследования, 46(5), 338-348.