

Е.Ю. Кедрук<sup>1</sup> , М.Б. Айтжанов<sup>2</sup> , Л.В. Гриценко<sup>1\*</sup> , Х.А. Абдуллин<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Satbayev University, Казахстан, г. Алматы

<sup>2</sup>Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа КазНУ им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

\*email: gritsenko\_lv@mail.ru

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОКСИДА ЦИНКА ДЛЯ РАЗЛОЖЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Стремительное увеличение численности населения и быстрое развитие промышленности привело к образованию промышленных стоков и загрязнению водоёмов вредными для их обитателей и здоровья людей отходами производства. В связи с этим актуальной является задача очистки водных ресурсов от промышленных выбросов, таких как пестициды, органические красители, тяжёлые металлы и другие отходы. Среди оксидов переходных металлов оксид цинка (ZnO) является наиболее перспективным широкозонным полупроводниковым материалом, который благодаря своим уникальным свойствам, активно используется в различных методах очистки сточных вод. В данной работе изучена фотокаталитическая активность наноструктурированных образцов оксида цинка, синтезированных экологичным, низкочастотным простым методом термического разложения дигидрата ацетата цинка в отношении инсектицида широкого спектра Би-58 Нового, основным активным компонентом которого является фосфорорганическое соединение диметоат. Методом оптической спектроскопии и фотолюминесценции проведено исследование водного раствора Би-58 Нового, подвергнутого ультрафиолетовому излучению в присутствии образцов оксида цинка. Аналитическое разделение проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. Анализ полученных результатов показал эффективность применения наноструктурированных образцов оксида цинка для фотокаталитического разложения инсектицида Би-58 Нового.

**Ключевые слова:** оксид цинка, термическое разложение, фотокаталитическая активность, инсектицид Би-58 Новый.

Е.Ю. Кедрук<sup>1</sup>, М.Б. Айтжанов<sup>2</sup>, Л.В. Гриценко<sup>1\*</sup>, Х.А. Абдуллин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Satbayev University, Қазақстан, Алматы қ.

<sup>2</sup>Ашық түрдегі ұлттық нанотехнологиялық зертханасы Әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

\*email: gritsenko\_lv@mail.ru

## Органикалық қосылыстарды ыдырату үшін мырыш оксидін қолдану

Халық санының тез өсуі және өнеркәсіптің қарқынды дамуы өнеркәсіптік ағынды сулардың пайда болуына және су объектілерінің ластануына, олардың тұрғындары мен халқына зиянды әсер етті. Осыған байланысты су ресурстарын өнеркәсіптік шығарындылардан, мысалы, пестицидтерден, органикалық бояғыштардан, ауыр металдардан және басқа да өндіріс қалдықтарынан тазарту міндеті өзекті болып табылады. Өтпелі металл оксидтерінің ішінде мырыш оксиді (ZnO) ең перспективалы кең жартылай өткізгіш материал болып табылады, ол өзінің бірегей қасиеттеріне байланысты ағынды суларды тазартудың әртүрлі әдістерінде белсенді қолданылады. Бұл жұмыста біз мырыш ацетаты дигидратының термиялық ыдырауының экологиялық таза, арзан қарапайым әдісімен синтезделген наноқұрылымды мырыш оксиді үлгілерінің фотокаталитикалық белсенділігін кең спектрлі инсектицид Би-58 Новыға қатысты зерттедік. ол диметоатат болып табылатын фосфорорганикалық қосылыс. Оптикалық спектроскопия және фотолюминесценция мырыш оксиді үлгілерінің қатысуымен ультракүлгін сәулеленуге ұшыраған Би-58 жаңа су ерітіндісін зерттеу үшін пайдаланылды. Аналитикалық бөлу жоғары өнімді сұйықтық хроматографиясы арқылы жүзеге асырылды. Алынған нәтижелерді талдау Би-58 жаңа инсектицидінің фотокаталитикалық ыдырауы үшін мырыш оксидінің наноқұрылымды үлгілерін қолданудың тиімділігін көрсетті.

**Түйін сөздер:** мырыш оксиді, термиялық ыдырау, фотокаталитикалық белсенділік, инсектицид жаңа Би-58.

Y.Y. Kedruk<sup>1</sup>, M.B. Aitzhanov<sup>2</sup>, L.V. Gritsenko<sup>1\*</sup>, Kh.A. Abdullin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Satbayev University, Kazakhstan, Almaty

<sup>2</sup>National Nanotechnology Laboratory of Open Type of Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

\*email: gritsenko\_lv@mail.ru

## Application of zinc oxide for decomposition of organic compounds

The rapid increase in population and the rapid development of industry has led to the formation of industrial effluents and pollution of water bodies with production waste harmful to their inhabitants and human health. In this regard, the task of cleaning water resources from industrial emissions, such as pesticides, organic dyes, heavy metals and other wastes, is relevant. Among transition metal oxides, zinc oxide (ZnO) is the most promising wide-gap semiconductor material, which, due to its unique properties, is actively used in various wastewater treatment methods. In this work, we studied the photocatalytic activity of nanostructured zinc oxide samples synthesized by an environmentally friendly, low-cost simple method of thermal decomposition of zinc acetate dihydrate with respect to the wide-spectrum insecticide Bi-58 New, the main active component of which is the organophosphorus compound dimethoate. Optical spectroscopy and photoluminescence were used to study an aqueous solution of Bi-58 New subjected to ultraviolet radiation in the presence of zinc oxide samples. Analytical separation was carried out by high performance liquid chromatography. An analysis of the obtained results showed the effectiveness of the application of nanostructured zinc oxide samples for the photocatalytic decomposition of insecticide Bi-58 New.

**Key words:** zinc oxide, thermal decomposition, photocatalytic activity, insecticide Bi-58 New.

### Введение

В последние годы значительно возросло использование органических красителей в различных отраслях промышленности, таких как кожевенная, бумажная, пластиковая, текстильная, пищевая, полиграфическая, косметическая, фармацевтическая и др. [1, 2]. Красители, содержащиеся в сточных водах, могут отрицательно влиять на водную среду из-за уменьшения проникновения солнечного света, угрожать здоровью человека [3].

Не менее опасными химическими загрязнителями являются пестициды, используемые в сельскохозяйственной отрасли для уничтожения различных видов вредителей, наносящих ущерб культурам. В последнее время в аграрной промышленности всё чаще используют фосфорорганические пестициды в качестве альтернативы хлорорганическим соединениям, так как фосфорорганические пестициды считаются менее опасными из-за их быстрой деградации в окружающей среде. Однако, если органофосфаты соответствуют подходящим условиям окружающей среды, они могут сохраняться во многих компонентах окружающей среды в течение длительного периода времени [4].

Ярким примером фосфоорганических пестицидов является диметоат, который может вызывать неврологические расстройства, снижать репродуктивность, повреждать ДНК и вызывать другие гистопатологические изменения [5]. Хотя

диметоат является весьма токсичным и классифицируется как умеренно опасный, он крайне опасен для обитателей водоёмов и серьёзно влияет на их физиологию и поведение [6]. Кроме того, недавние исследования показывают, что остатки диметоата и его производных могут быть обнаружены в фруктах, овощах и даже в коровьем молоке [5].

Масштабное использование пестицидов для увеличения прибыли от сельскохозяйственного производства привело к загрязнению сточных вод вредными выбросами и нанесению серьёзного ущерба окружающей среде. В силу своей природы эти соединения потенциально токсичны для многих живых организмов, включая человека [2]. В связи с этим остро стоит вопрос очистки сточных вод от пестицидов и других загрязнений.

Традиционные технологии, широко используемые для удаления органических красителей и пестицидов, в основном включают физические, химические, биологические и комплексные процессы очистки, такие как электродиализ, мембранная фильтрация, осаждение, адсорбция, электрохимическое восстановление и электроионизация [7]. На сегодняшний день фотокаталитическое окисление - один из самых эффективных химических методов, демонстрирующий большой потенциал в очистке сточных вод за счёт индукции образования гидроксильных радикалов и супероксид-аниона путём облучения широкозонных полупроводниковых фотокатализаторов, таких как TiO<sub>2</sub>, ZnO, CdS, WO<sub>3</sub>, SrTiO<sub>3</sub>,

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и т.д. [8]. Когда полупроводники, которые находятся в контакте с раствором электролита, освещаются с энергией, превышающей их ширину запрещённой зоны E<sub>g</sub>, возникают возбуждённые высокоэнергетические состояния электронных и дырочных пар (e<sup>-</sup>/h<sup>+</sup>). Эти частицы могут либо рекомбинировать в объёме полупроводника и рассеивать входящую энергию в виде тепла, либо мигрировать к поверхности частиц полупроводника и реагировать с адсорбированными донорами электронов или акцепторами электронов. Фотогенерированные дырки действуют как мощные окислители, а электроны как мощные восстановители и инициируют широкий спектр химических окислительно-восстановительных реакций, которые могут привести к полной минерализации органических соединений [4].

Многofункциональные наночастицы ZnO демонстрируют полупроводниковые свойства с широкой запрещённой зоной 3,37 эВ, а также представляют собой пьезоэлектрический материал с большим выходом при энергии связи 60 мэВ [9, 10]. К тому же оксид цинка считается безопасным материалом для людей и животных их-за своей стойкости и селективности.

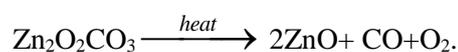
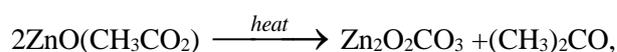
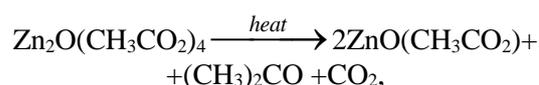
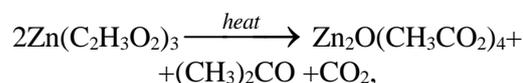
В литературе представлено множество методов синтеза оксида цинка, таких как термическое разложение, пиролиз, магнетронное распыление, сольвотермическая реакция, принудительный гидролиз, золь-гель метод, CVD, гидротермальный метод и другие [11-14]. Наноструктурированный ZnO имеет широкий спектр применения в различных областях, таких как оптические устройства, самоочищающиеся краски, адресная доставка лекарств, косметика, медицинские устройства, текстильная промышленность и фотокатализ [15-18].

### Описание эксперимента и обсуждение полученных результатов

Исследуемые образцы оксида цинка были получены простым низкзатратным методом термического разложения в атмосфере дигидрата ацетата цинка (CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Zn×2H<sub>2</sub>O при температурах 400°C и 700°C в течение 2, 4 и 10 часов согласно способу, описанному в работе [19]. При синтезе наночастиц ZnO (NPs) дигидрат ацетата цинка помещался в керамический тигель, закрытый керамической крышкой. Масса полученного образца ZnO NPs составляла приблизительно 1/3 от массы исходного ацетата

цинка, что весьма близко к расчётному выходу продукта (37,1%).

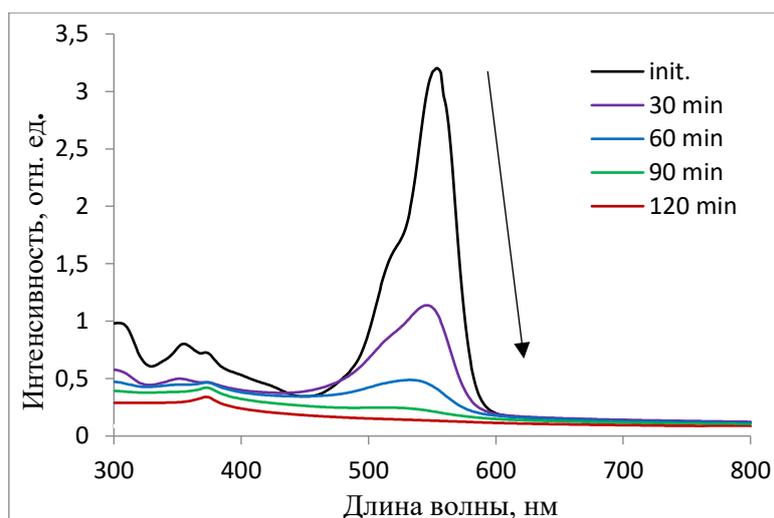
Согласно работе [20] преимущественно потеря веса исходного материала происходит благодаря сгоранию в прекурсором углекислого газа (CO<sub>2</sub>) и ацетона ((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO). Процесс образования оксида цинка при этом можно описать превращением следующих реакций [20]:



Фотокаталитическая активность синтезируемых образцов была изучена при деградации водного раствора красителя RhB и водного раствора инсектицида Би-58 Нового на поверхности ZnO NPs под воздействием УФ-освещения путём измерения спектров оптической плотности. Источником УФ освещения являлась ртутная лампа (LHGGermany, мощность 14 Вт). Спектры оптической плотности исследуемых образцов были изучены на двухлучевом спектрофотометре UV/Vis Lambda 35 (PerkinElmer).

На рисунке 1 показаны спектры деградации водного раствора RhB-красителя, содержащего 9 мг образца ZnO NPs, при ультрафиолетовом излучении. Забор проб раствора RhB для измерения спектров оптической плотности осуществлялся через каждые 30 минут в течение 2.5 часов. Из рисунка видно, что максимум интенсивности поглощения исходного раствора RhB с порошком ZnO приходится на 554 нм.

С увеличением времени экспонирования интенсивность поглощения RhB постепенно снижается в присутствии ZnO NPs, что свидетельствует об уменьшении концентрации красителя RhB. Относительная концентрация красителя RhB уменьшается с увеличением времени экспозиции, при этом для всех представленных образцов краситель RhB значительно деградирует на поверхности ZnO NPs под действием УФ освещения в первые 30 мин экспозиции.



**Рисунок 1** – Изменение спектров оптической плотности водного раствора RhB с образцом ZnO, полученного при отжиге ацетата цинка в атмосфере, продолжительность отжига 10 часов при температуре 400°C, при УФ-освещении в течение 120 мин

В работе [19] было показано, что данные образцы демонстрируют высокую фотокаталитическую активность в отношении органического красителя Родамина В. Было отмечено, что параметры отжига оказывают влияние на морфологию и степень кристалличности синтезированных образцов. Наибольшую фотокаталитическую активность демонстрировали образцы, синтезированные в течение 10 часов при температуре 400°C [19].

Разложение водного раствора фосфорорганического инсектицида Би-58 Нового было исследовано в присутствии образцов ZnO, которые продемонстрировали высокую фотокаталитическую активность в отношении органического красителя Родамина В. Основным действующим веществом данного пестицида является диметоат  $C_5H_{12}NO_3PS_2$  ( $CH_3NHCOCH_2SPS(OCH_3)_2$ ). Диметоат (Dimethoate, 2-dimethoxyphosphinothioylsulfanyl-N-methylacetamide) относится к классу фосфорорганических соединений (сложный эфир фосфорной кислоты). Благодаря системному действию диметоат проникает внутрь растений и уничтожает скрытоживущих вредителей. Он обладает системной активностью, кишечным и контактным действием, является ингибитором холинэстеразы, действуя на нервную систему и вызывая угнетение дыхания и сердечной деятельности, представляет угрозу для здоровья человека.

С целью исследования количественного состава диметоата и инсектицида Би-58 Нового в водных растворах, подвергнутых ультрафиолетовому облучению в присутствии

частиц оксида цинка, был проведён их количественный анализ. Разделение и определение диметоата проводилось на высокоэффективном жидкостном хроматографе (ВЭЖХ) Agilent 1200 series (Agilent, Германия), оснащённом четырёхканальным градиентным насосом, дегазатором, автосамплером, термостатом колонок и диодно-матричным детектором. Разделение проводили на колонке Agilent Zorbax SB-C18 4,6x150 мм, диаметр частиц - 3,5 мкм. Время анализа составляло 10 мин. В качестве элюента использовали смесь ацетонитрила:вода (600:300). Раствор хроматографировали при 60 об. % ацетонитрила в изократическом режиме со скоростью потока 1 мл/мин. Температуру колонки поддерживали постоянной на уровне 30°C. Объём вводимой пробы составлял 20 мкл. Детектирование проводили на длине волны  $270 \pm 8$  нм. Для определения содержания диметоата в исследуемых водных растворах был построен градуировочный график (рисунок 2).

Количественное определение диметоата проводили методом абсолютной калибровки. Рабочие стандартные растворы с концентрациями 5,0 25,0 и 50,0 мкг/л готовили из основного стандартного раствора диметоата, соответствующим последовательным разбавлениям подвижной фазой для ВЭЖХ. Концентрация исходного стандартного образца составляла 100 мкг/л. Коэффициент корреляции градуировочного графика в данном диапазоне составил  $R=0.9654$  (рисунок 2).

Спектры оптического поглощения водного раствора инсектицида БИ-58 Нового с образцом

ZnO, полученным при термическом разложении дигидрата ацетата цинка в атмосфере при температуре 400°C, подвергнутого УФ-освещению в течение 120 мин представлены на рисунке 3. Отмечено, что с увеличением времени

УФ освещения раствора интенсивность поглощения возрастает, а край спектра поглощения немного смещается в область более низких энергий  $h\nu$ .

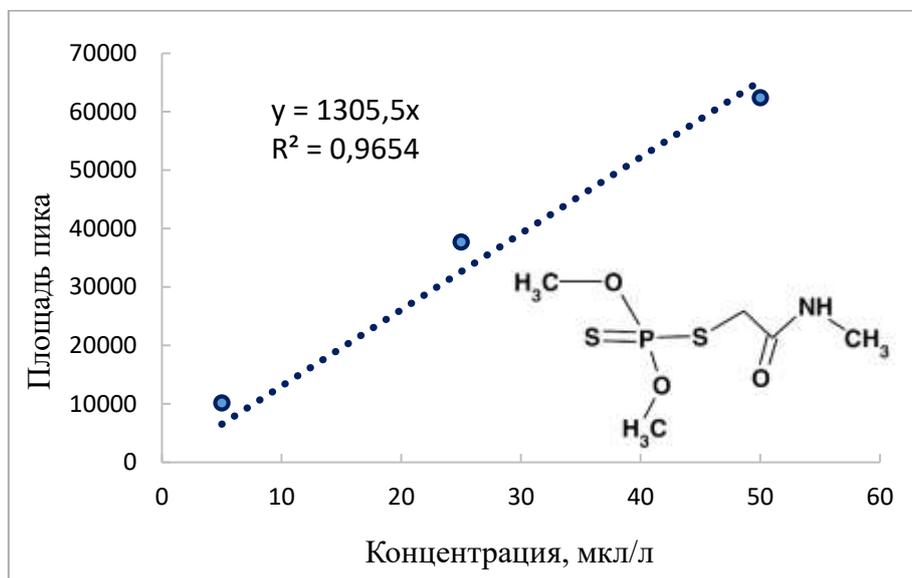


Рисунок 2 – Градуировочный график диметоата и его структурная формула

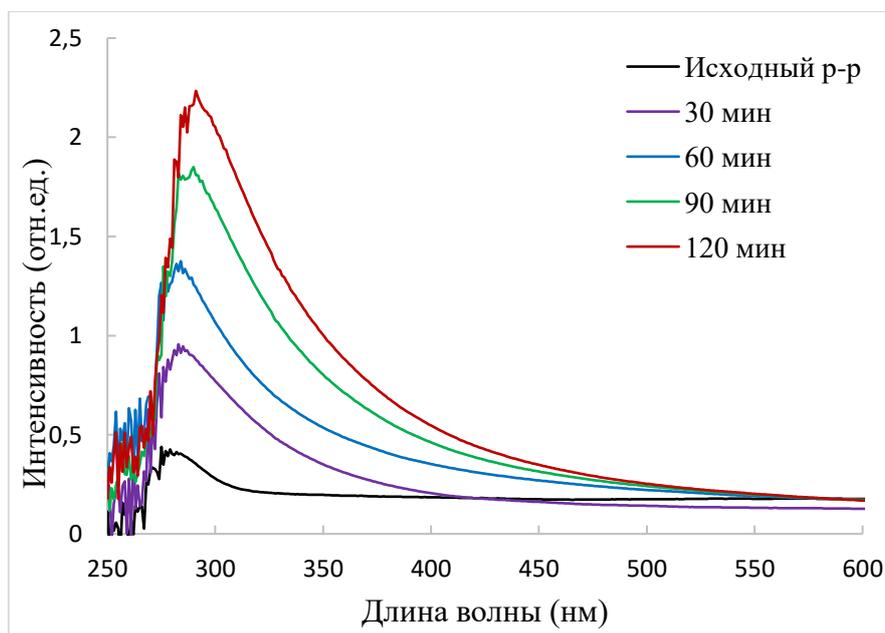
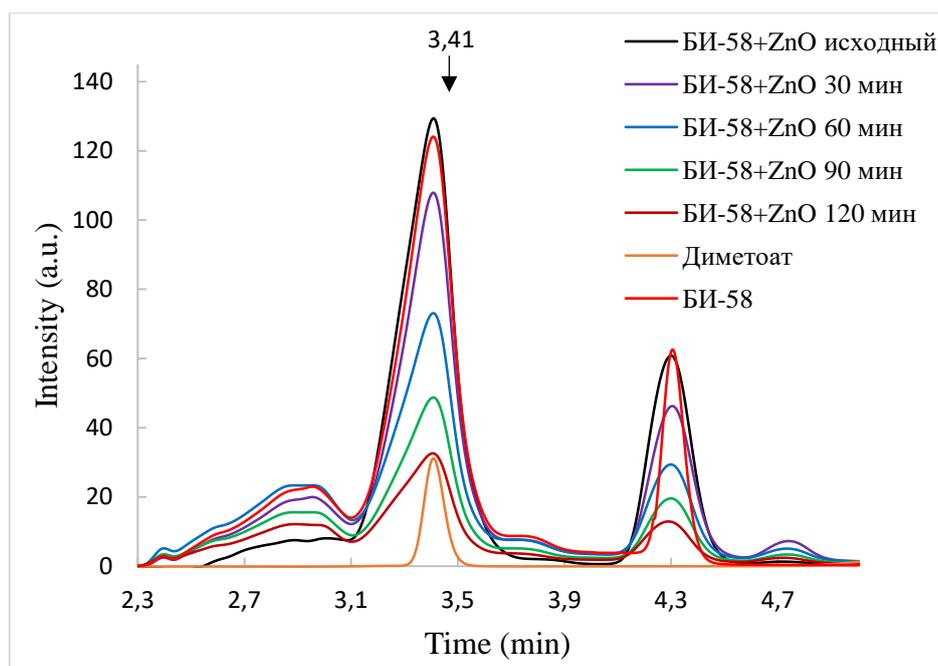


Рисунок 3 – Спектры оптической плотности водного раствора инсектицида БИ-58 Нового с полученным образцом ZnO при УФ-освещении в течение 120 мин

На рисунке 4 представлены хроматограммы водных растворов диметоата, инсектицида БИ-58 Нового без ZnO, а также инсектицида БИ-58 Нового, содержащего синтезированные образцы ZnO. Для водного раствора инсектицида БИ-58 Нового в

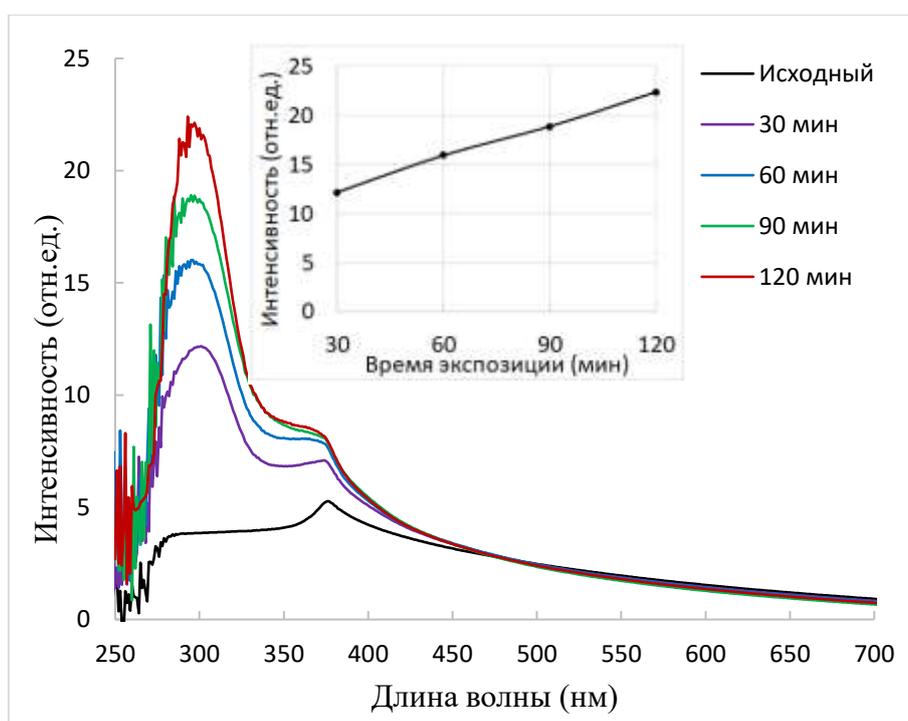
присутствии синтезированных образцов ZnO представлены хроматограмма исходного раствора и хроматограмма данного раствора, подвергнутого УФ излучению в течение 120 минут. Забор проб производился через каждые 30 минут облучения.



**Рисунок 4** – Хроматограммы водных растворов диметоата, пестицида БИ-58 Нового без ZnO и инсектицида БИ-58 Нового, содержащего синтезированные образцы ZnO, при УФ освещении

При количественном определении диметоата методом ВЭЖХ было установлено, что концентрация диметоата в исходном образце БИ-58 составляет 0,61 мкг/л, а концентрация образца с водным раствором БИ-58 и ZnO при УФ освещении в течение 120 минут составляет 0,16

мкг/л. Таким образом, было установлено, что концентрация водного раствора БИ-58 с ZnO при УФ обработке в течение 120 минут уменьшается приблизительно в 4 раза, что свидетельствует о разложении пестицида.



**Рисунок 5** – Спектры фотолуминесценции водного раствора БИ-58 Нового в присутствии ZnO исходного и при УФ облучении в течение 120 минут

**Результаты исследования** фотолюминесцентных свойств водного раствора пестицида БИ-58 Нового и синтезированного образца ZnO под действием УФ излучения приведены на рисунке 5. Отмечено, что исследуемый раствор БИ-58 Нового обладает фотолюминесценцией (ФЛ) в ультрафиолетовом диапазоне с максимумом, приходящимся на длину волны 300 нм. При увеличении времени экспозиции интенсивность ФЛ постепенно, практически линейно возрастает (вставка на рис. 5). Увеличение интенсивности ФЛ при уменьшении концентрации пестицида в растворе объясняется фёрстеровским резонансным переносом энергии, при котором происходит перенос энергии возбуждения между молекулами-хромофорами в ближнем поле за счёт диполь-дипольного взаимодействия, или транспортом электронов при контакте молекул пестицида-акцепторов с поверхностью частиц ZnO (соответственно уменьшением вклада электронов ZnO в ФЛ) [21]. Таким образом увеличение интенсивности ФЛ при увеличении времени экспозиции также свидетельствует о деградации пестицида в растворе.

## Заключение

Образцы оксида цинка, полученные простым методом термического разложения дигидрата ацетата цинка при температуре 400°C в течение 10 часов, продемонстрировали фотокаталитическую активность в отношении фосфорорганического инсектицида БИ-58 Нового. Показано, что концентрация пестицида в водном растворе в присутствии синтезированных образцов ZnO под действием УФ излучения в течение двух часов уменьшается в 4 раза. Таким образом, использованный простой в исполнении метод синтеза наночастиц ZnO экономичен, не требует сложного дорогостоящего оборудования, пригоден для крупномасштабного производства высокоактивных ZnO фотокатализаторов для разложения вредных органических загрязнителей водоёмов под УФ-излучением благодаря своей невысокой стоимости и высокой фотокаталитической активности.

## Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант No. AP08856173).

## Литература

- 1 Nyankson E., Efavi J.K., Agyei-Tuffour B. and Manu G. Synthesis of TiO<sub>2</sub>-Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> photocatalyst material with high adsorption capacity and photocatalytic activity: application in the removal of dyes and pesticides // RSC Adv. – 2021. – Vol.11. – P.17032-17045.
- 2 Russo M., Iervolino G., Vaiano V. W-Doped ZnO Photocatalyst for the Degradation of Glyphosate in Aqueous Solution //Catalysts. – 2021. – Vol.11. – P.234.
- 3 Nahi J., Radhakrishnan A., Raghavan R., Bhaskaran B. Efficient photocatalytic degradation of organic dye from aqueous solutions over zinc oxide incorporated nanocellulose under visible light irradiation // Main Group Metal Chemistry. – 2020. – Vol. 43 (1). – P.84-91.
- 4 Nur Alam Md., Alamgir Zaman Chowdhury M., Sabir Hossain M., Mohammad Mijanur Rahman, Abdur Rahman M., Siew Hua Gan, Ibrahim Khalil Md. Detection of Residual Levels and Associated Health Risk of Seven Pesticides in Fresh Eggplant and Tomato Samples from Narayanganj District //Journal of Chemistry. – 2015. – Vol. 2015. – 7 p.
- 5 Liu X., Li Y., Zhou X., Luo K., Hu L., Liu K., Bai L. Photocatalytic degradation of dimethoate in Bok choy using cerium-doped nano titanium dioxide //PLOS ONE. – 2018. – Vol. 13(5). – P.1-9.
- 6 Singh R.N., Pandey R.K., Singh N.N., Das V.K., Acute toxicity and behavioral responses of common carp Cyprinus carpio (Linn.) to an organophosphate (dimethoate) //World Journal of Zoology. – 2009. – Vol. 4 (2). – P.70-75.
- 7 Lin X., Yang A., Huang G., Zhou X., Zhai Y., Chen X. and McBean E. Treatment of Aquaculture Wastewater through Chitin/ZnO Composite Photocatalyst //Water. – 2019. – Vol. 11 (2). – P.310.
- 8 Cao Y-Q., Zi T-Q., Zhao X-R., Liu C., Ren Q., Fang J-B., Li W.-M., Li A.-D. Enhanced visible light photocatalytic activity of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> modified TiO<sub>2</sub> prepared by atomic layer deposition // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10. – P.13437.
- 9 Carofiglio M., Barui S., Cauda V., Laurenti M. Doped Zinc Oxide Nanoparticles: Synthesis, Characterization and Potential Use in Nanomedicine // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10 (15). – P. 5194.
- 10 Raj N.B., PavithraGowda N.T., Pooja O.S., Purushotham B., Kumar M.R.A., Sukrutha S.K., Ravikumar C.R., Nagaswarupa H.P., AnandaMurty H.C., Boppana S.B. Harnessing ZnO nanoparticles for antimicrobial and photocatalytic activities //Journal of Photochemistry and Photobiology. – 2021. – Vol. 6. – P.100021.
- 11 Ningsih S., Khair M., & Veronita S. Synthesis and Characterization of ZnO Nanoparticles Using Sol-Gel Method //Indonesian Journal of Chemical Science. – 2021. – Vol. 10 (1). – p. 59-67.

- 12 Haque Md. J., Bellah Md. M., Hassan Md. R., Rahman S. Synthesis of ZnO nanoparticles by two different methods & comparison of their structural, antibacterial, photocatalytic and optical properties // *Nano Express*. – 2020. – Vol. 1. – P.010007.
- 13 Rajendran N.K., George B.P., Houreld N.N., Abrahamse H. Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using *Rubus fairholmianus* Root Extract and Their Activity against Pathogenic Bacteria // *Molecules*. – 2021. – Vol. 26. – P. 3029.
- 14 Shahzad S., Javed S. and Usman M. A Review on Synthesis and Optoelectronic Applications of Nanostructured ZnO // *Front. Mater.* – 2021. – Vol. 8. – P. 613825.
- 15 Prasad A. R., Williams L., Garvasis J., Shamsheera K. O., Basheer S. M., Kuruvilla M., & Joseph A. Applications of phyto-genic ZnO nanoparticles: A review on recent advancements // *Journal of Molecular Liquids*. – 2021. – Vol. 331 (6). – P. 115805.
- 16 Spoial A., Ilie C.-I., Trus R.-D., Oprea, O.-C., Surdu V.-A., Vasile B.S., Ficai A., Ficai D., Andronescu E., Dit L.-M. Zinc Oxide Nanoparticles for Water Purification // *Materials*. – 2021. – Vol. 14. – P. 4747.
- 17 Al-Ariki S., Yahya N. A. A., Al-A'nsi S. A., Jumali M. H. H., Jannah A. N., & Abd-Shukor R., Synthesis and comparative study on the structural and optical properties of ZnO doped with Ni and Ag nanopowders fabricated by sol gel technique // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11. – P. 11948.
- 18 Tănase M. A., Marinescu M., Oancea P., Răducan A., Mihaescu C. I., Alexandrescu E., Nistor C.L., Jinga L.-I., Ditu L.M., Petcu C., Cinteza L. O. Antibacterial and Photocatalytic Properties of ZnO Nanoparticles Obtained from Chemical versus *Saponaria officinalis* Extract-Mediated Synthesis // *Molecules*. – 2021. – Vol. 26 (7). – P.2072.
- 19 Уалиханов Р.Е., Гриценко Л.В., Кедрук Е.Ю., Абдуллин Х.А. Фотокаталитические свойства наноструктурированного оксида цинка // *Вестник КазНУ*. – 2019. – Т.133 (3). – С.542-548.
- 20 Labuayai S., Promarak V., Maensiri S. Synthesis and optical properties of nanocrystalline ZnO powders prepared by a direct thermal decomposition route // *Appl Phys A*. – 2009. – Vol. 94. – P.755–761.
- 21 Bakar N. A., Salleh M. M., Umar A. A. and Yahaya M. The detection of pesticides in water using ZnCdSe quantum dot films // *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.* – 2011. – Vol. 2 (2). – P. 025011.

#### References

- 1 E. Nyankson, J.K. Efavi, B. Agyei-Tuffour and G. Manu, *RSC Adv*, 11, 17032 (2021).
- 2 M. Russo, G. Iervolino and V. W. Vaiano, *Catalysts*, 11, P. 234 (2021).
- 3 J. Nahi, A. Radhakrishnan, R. Raghavan and B. Bhaskaran, *Main Group Metal Chemistry*, 43 (1), 84-91 (2020).
- 4 Md. Nur Alam, M. Alamgir Zaman Chowdhury, M. Sabir Hossain, Mohammad Mijanur Rahman, M. Abdur Rahman, Siew Hua Gan and Md Ibrahim Khalil, *Journal of Chemistry*, 2015, 7 p. (2015).
- 5 X. Liu, Y. Li, X. Zhou, K. Luo, L. Hu, K. Liu and L. Bai, *Plos One*, 13(5), 1-9 (2018).
- 6 R.N. Singh, R.K. Pandey, N.N. Singh and V.K. Das, *World Journal of Zoology*, 4 (2), 70-75 (2009).
- 7 X. Lin, A. Yang, G. Huang, X. Zhou, Y. Zhai, X. Chen and E. McBean, *Water*, 11, 310 (2019).
- 8 Y-Q. Cao, T-Q. Zi, X-R. Zhao, C. Liu, Q. Ren, J.-B. Fang, W.-M. Li and A.-D. Li, *Scientific Reports*, 10, 13437 (2020).
- 9 M. Carofiglio, S. Barui, V. Cauda and M. Laurenti, *Applied Sciences*, 10(15), 5194 (2020).
- 10 N.B Raj, N. T. Pavithra Gowda, O. S. Pooja, B. Purushotham, M. R. A. Kumar, S. K. Sukrutha and S. B. Boppana, *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 6, 100021 (2021).
- 11 S. Ningsih, M. Khair and S. Veronita, *Indonesian Journal of Chemical Science*, 10(1), 59-67 (2021).
- 12 Md. J. Haque, Md. M. Bellah, Md. R. Hassan and S. Rahman, *Nano Express*, 1, 010007 (2020).
- 13 N.K. Rajendran, B.P. George, N.N. Houreld and H. Abrahamse, *Molecules*, 26, 3029 (2021).
- 14 S. Shahzad, S. Javed and M. Usman, *Front. Mater*, 8, 613825 (2021).
- 15 R. Prasad, L. Williams, J. Garvasis, K. O. Shamsheera, S. M. Basheer, M. Kuruvilla and A. Joseph, *Journal of Molecular Liquids*, 331, 115805 (2021).
- 16 Spoial, C.-I. Ilie, R.-D. Trus, O.-C. Oprea, V.-A. Surdu, B.S. Vasile, A. Ficai, D. Ficai, E. Andronescu and L.-M. Dit, *Materials*, 14, 4747 (2021).
- 17 S. Al-Ariki, N. A. A. Yahya, S. A. Al-A'nsi, M. H. H. Jumali, A. N. Jannah and R. Abd-Shukor, *Scientific Reports*, 11 (1), 11948 (2021).
- 18 M. A. Tănase, M. Marinescu, P. Oancea, A. Răducan, C. I. Mihaescu, E. Alexandrescu and L. O. Cinteza, *Molecules*, 26 (7), 2072 (2021).
- 19 R.E. Ualihanov, L.V. Gritsenko, Y. Y. Kedruk and Kh.A. Abdullin, *Vestnik KazNITU*, 133 (3), 542-548 (2019). (In Russ.)
- 20 S. Labuayai, V. Promarak and S. Maensiri, *Appl Phys A*, 94, 755-761 (2009).
- 21 N.A. Bakar, M. M. Salleh, A. A. Umar and M. Yahaya, *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.*, 2 (2), 025011 (2011).