

## Важнейшие достижения за 2025 год

### 1. Механохимический подход к получению наноструктурированных металломатричных композитов

Разработан механохимический *in situ* подход к получению металл-керамических композитов. Показано, что консолидация металл-керамического механокомпозита 50Ni/50TiC методом быстрого спекания при 1100°C приводит к получению материала с размерами кристаллитов Ni ~86 нм и TiC ~95 нм. Микроструктура и элементные карты спеченного механокомпозита свидетельствуют о равномерном распределении TiC в никелевой матрице (рис. 1). Относительная плотность металл-керамического материала составляет 99%, твердость по Виккерсу 980±30 HV<sub>1</sub>. Разработанный подход позволяет снять основные проблемы традиционных методов порошковой металлургии, связанные с несплошностью межфазной поверхности металл/керамика и неравномерностью распределения керамических частиц в металлической матрице. Такие материалы перспективны для использования в тех отраслях, где необходима высокая твердость, износостойкость, электро- и теплопроводность: электроприборостроение (в том числе авиа- и автомобилестроение), токовые коллекторы электрохимических устройств и т.д.

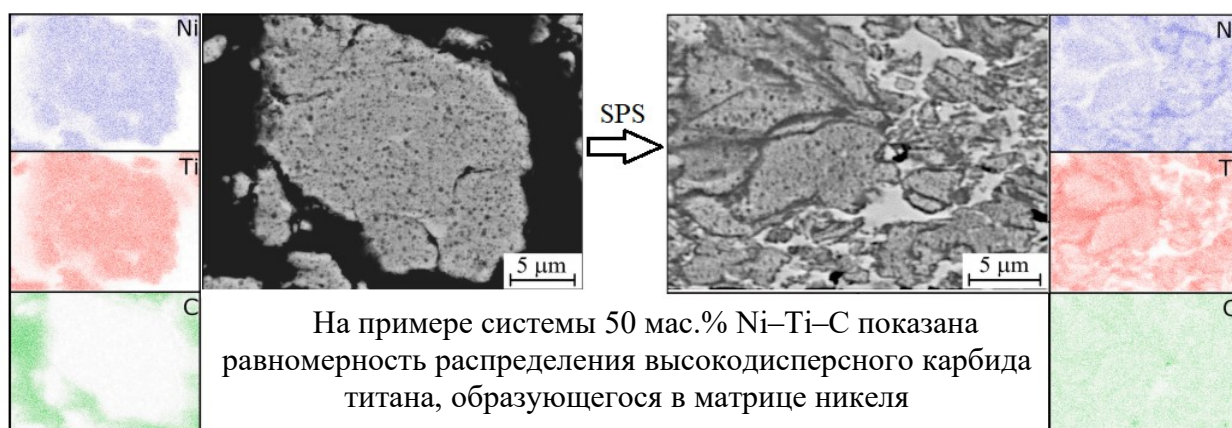


Рисунок 1 – На примере системы 50 мас.% Ni–Ti–C (50Ni/50TiC) показана равномерность распределения высокодисперсного карбида титана, образующегося в матрице никеля

**Организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН совместно с Государственным научным учреждением «Объединенный институт машиностроения» Национальной академии наук Беларуси.

**Руководитель исследования:** научный руководитель ИХТТМ СО РАН, академик РАН Н.З. Ляхов.

**Основные авторы:** Видюк Т.М., Дудина Д.В., Григорьева Т.Ф., Девяткина Е.Т., Восьмериков С.В., Ухина А.В., Ковалева С.А., Ляхов Н.З.

**Публикации:**

*Vidyuk T.M., Dudina D.V., Grigoreva T.F., Devyatkina E.T., Vosmerikov S.V., Ukhina A.V., Kovaleva S.A., Lyakhov N.Z. Features of the spark plasma sintering process of in situ TiC-Ni composites produced by high-energy ball milling // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2025. V. 128. 107035. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2024.107035>*

## 2. Композиционные керамические материалы на основе $ZrO_2$ .

Исследование особенностей формирования микроструктуры и свойств композиционных керамических материалов на основе  $ZrO_2$ , упрочненных добавками нитевидных кристаллов  $Al_2O_3$ , при формировании заготовок методом гель-кастинга.

Керамика на основе диоксида циркония широко используется в промышленности благодаря ее высоким механическим свойствам, высокой ударной вязкости и твердости, термической и химической стабильности. Технология гелевого литья (гель-кастинг) – перспективный метод изготовления изделий технической керамики, в т.ч. из диоксида циркония, позволяющий получать заготовки с высокой плотностью сложной формы. Особого внимания требует изучение реологических свойств суспензий, которые значительно влияют на эффективность процессов отливки и сушки, на физические и механические характеристики отливок, на образование дефектов в отливках и формирование конечной микроструктуры. Исследовано влияние pH, количества дисперсанта Dolapix CE 64 и концентрации порошка  $ZrO_2$  на вязкость суспензии (рис. 2). Установлено, что при низких скоростях сдвига наименьшее значение вязкости  $\eta = 2.1$  Па·с имеет суспензия с pH = 7.8...8. Оптимальное содержание добавки Dolapix CE 64 в исследуемой суспензии составляет 1.7 %. Суспензии с содержанием порошка  $ZrO_2$  до 36 % об. имеют сравнительно низкую вязкость (0.02–0.15 Па·с). Суспензии с содержанием  $ZrO_2$  36–40 % об. демонстрируют поведение псевдопластичных жидкостей – их вязкость уменьшается с увеличением скорости деформации. Суспензия с 38 % об.  $ZrO_2$  обладает невысокой вязкостью (0.45 Па·с) при низкой скорости сдвига, при увеличении объема порошка до 40% вязкость при той же скорости возрастает до 2 Па·с. Таким образом, возможно увеличение концентрации твердой фазы порошка в суспензии до 38–40% об. при сохранении удовлетворительных литейных свойств, что открывает перспективы значительного повышения механических свойств отливок и спеченной керамики на основе  $ZrO_2$ , изготовленной методом гелевого литья.

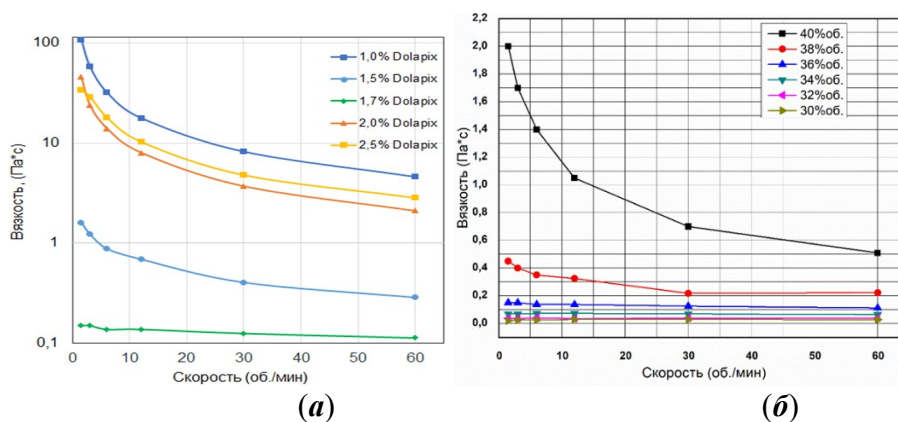


Рисунок 2 – Зависимость вязкости суспензии  $\eta$ :  
(а) от содержания Dolapix CE 64; (б) - от содержания порошка  $ZrO_2$ .

**Организация:** ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (ИМЕТ РАН)

**Руководитель работ**– научный руководитель ИМЕТ РАН, академик РАН К.А.Солнцев

**Авторы:** Шокодько Е.А., Ситников А.И., Шокодько А.В., Огарков А.И., Стрельникова С.С., Чернявский А.С., Солнцев К.А.

**Публикации:** 1. Shokodko E.A., Sitnikov A.I., Shokodko A.V., Ogarkov A.I., Strelnikova S.S., Chernyavskii A.S., Solntsev K.A. Production of ceramic materials based on zirconium dioxide by gel casting // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 558–561. DOI 10.1134/S2075113324702009; 2. Шокодько Е.А., Ситников А.И., Шокодько А.В., Чернявский А.С., Стрельникова С.С., Солнцев К.А. Исследование реологических характеристик суспензии диоксида циркония для гелевого литья // *Перспективные материалы*. 2025. № 12. С. 53–59. DOI 10.30791/1028-978X-2025-12-53-59.

### 3. Регенерация сорбционных свойств новых твердотельных фотокатализаторов на основе пористого стекла, модифицированного ZnO.

На основе силикатных мезопористых стекол синтезированы новые композиционные стеклообразные материалы с фотокаталитическими свойствами, содержащие ZnO, востребованные для решения экологических проблем (водоочистка от органических загрязнителей) [1]. Проведены поисковые исследования, направленные на разработку методики очистки синтезированных твердотельных фотокатализаторов от органического красителя (на примере метиленового синего) с целью регенерации их сорбционных свойств по отношению к этому красителю. Разработана охраноспособная методика комбинированной очистки, включающей последовательную промывку образцов в различных жидкостях и термообработку [2]. Продемонстрирована эффективность разработанной методики, которая при условии регенерации сорбционной способности материала по отношению к метиленовому синему обеспечивает сохранение его фотокаталитической активности (рис. 3) благодаря неизменности содержания в нем ZnO [2].

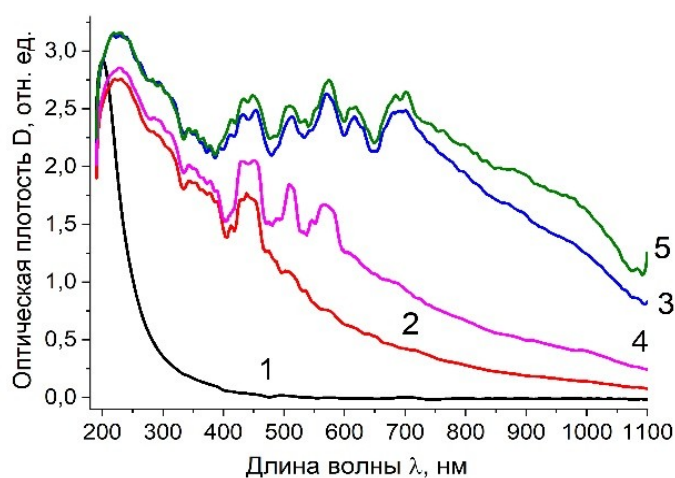


Рисунок 3 – Спектры оптической плотности образцов исходного пористого стекла (1) и пористого стекла, модифицированного оксидом цинка (2–5): до (1, 2) и после (3–5) контакта с раствором метиленового синего, в том числе после цикла комбинированной очистки (4) и после повторного контакта с раствором красителя после очистки (5) [2].

**Организация:** Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС

**Руководитель:** зав. лабораторией физической химии стекла, доцент, д.х.н. Антропова Т.В.

**Авторы:** Гирсова М.А., Саратовский А.С., Куриленко Л.Н., Антропова Т.В.

**Публикации:**

1. Саратовский А.С., Гирсова М.А., Антропова Т.В. Возможность применения макропористых стекол для создания композиционных фотокаталитических материалов // Всероссийская молодежная научная конференция с международным участием «Функциональные материалы: Синтез. Свойства. Применение» YOUNG ISC 2025: Сборник тезисов докладов, г. Санкт-Петербург, 1–4 декабря 2025 г. – СПб: ООО «Издательство «ЛЕМА», 2025. – 311 с. – С. 175–176. – ISBN 978-5-907999-53-4.

2. Гирсова М.А., Саратовский А.С., Куриленко Л.Н., Антропова Т.В. К вопросу о возможности регенерации композитов «пористое стекло – оксид цинка» после сорбции метиленового синего // Физика и химия стекла. – 2025. – Т. 51. – № 4. С. 490–494.

DOI: 10.7868/S3034613425040108.

#### 4. Анализ диффузии Cu в ZnS с применением теории перколяции

Для материалов на основе сульфида цинка впервые обнаружены S-образные перколяционные зависимости интенсивности люминесценции от фазового состава, отражающие корреляцию между структурными и оптическими параметрами. Образование смешанной двухфазной структуры зерен люминофора увеличивает общую скорость диффузии за счет повышенной скорости транспорта вдоль образующейся во время синтеза межфазной границы, что приводит к резкому увеличению интенсивности люминесценции (рис. 4). Предложены перколяционные уравнения для связи интенсивности люминесценции с фазовым составом люминофоров, значения  $R^2$  составляют от 0.9 до 0.98. Компьютерное моделирование на двумерной квадратной решетке зависимости эффективного коэффициента диффузии от соотношения количеств двух фаз (ZnS) в системе (ZnS–Cu) подтвердило справедливость рассмотрения. Применение данного подхода позволяет создавать материалы с оптимальной наноструктурой и высокими люминесцентными характеристиками.

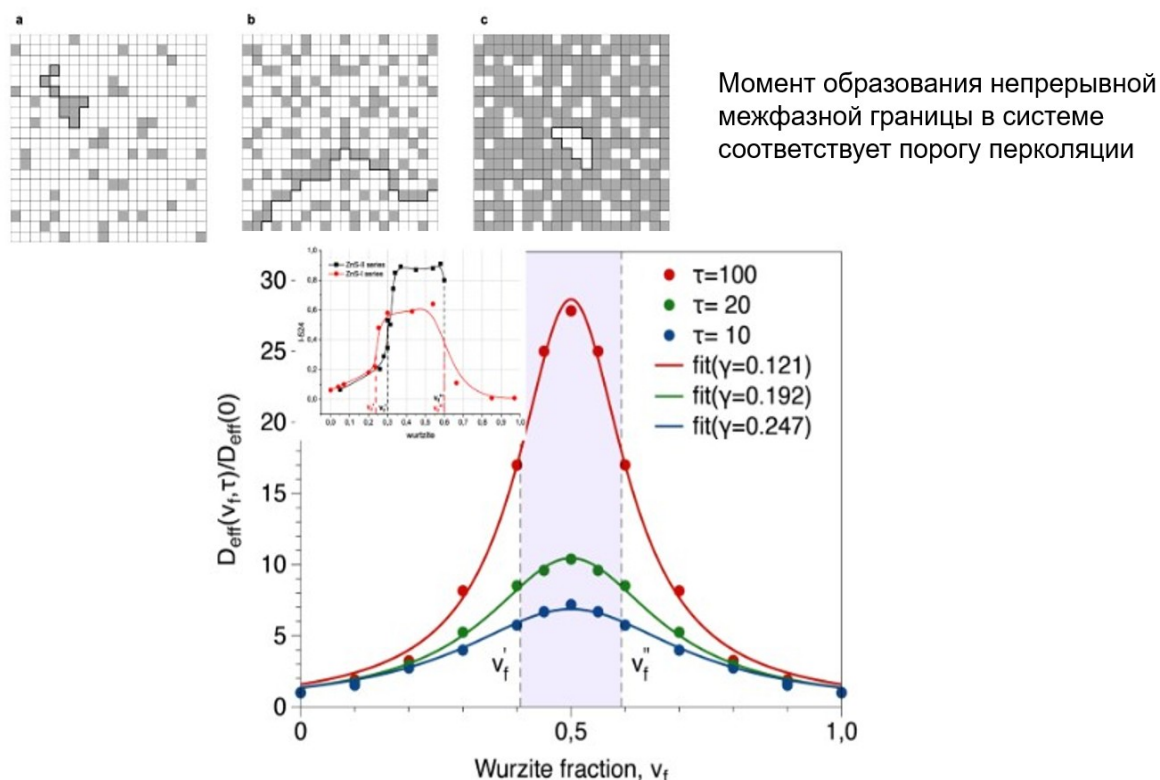


Рисунок 4 – Диффузия в двухфазном материале, рассмотренная с привлечением теории перколяции.

**Организации:** Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет); Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра — Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова.

**Руководитель:** зав. каф. ТОМ СПбГТИ(ТУ), профессор, д.т.н. Сычев М.М.

**Авторы:** Зеленина Е.В., Колотинский Д.А.

**Публикации:** Zelenina E.V., Sychov M.M., Kolotinsky D.A., Petrov S.N., Vasilyeva E.A. Luminescence of ZnS:Cu,Br phosphors considering enhanced diffusion in two-phase system and percolation phenomena // *Ceramics International*, Volume 51, Issue 21, Part A, 2025, P. 32711-32720. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.05.005>.

## 5. Синтез литийпроводящего перспективного твердого электролита на основе цирконата лития-лантана

С применением импульсного плазменного спекания разработан инновационный подход к получению новых твердых Al- и Ta-замещенных литий-проводящих твердых электролитов на основе алюминий и тантал замещенных цирконата лития-лантана  $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ , отличающийся в сравнении с известными мировыми аналогами (MSE Supplies Co; Ampcera Inc.; Toshima Manufacturing Co) пятикратным увеличением литиевой проводимости, и тысячекратным повышением срока службы. Использование искрового плазменного спекания позволило также снизить температуру синтеза, существенно сократить время консолидации, достичь однородной микроструктуры со значительным повышением плотности керамики. Высокие значения Li-ионной проводимости, характерные для наших образцов  $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$  (вплоть до 0.6 мСм/см) практически не изменяются с течением времени (рис. 5). Предложенный нами подход может стать основой производства полностью отечественных твердотельных литий-ионных аккумуляторов и ионселективных мембран для извлечения лития из морской воды.

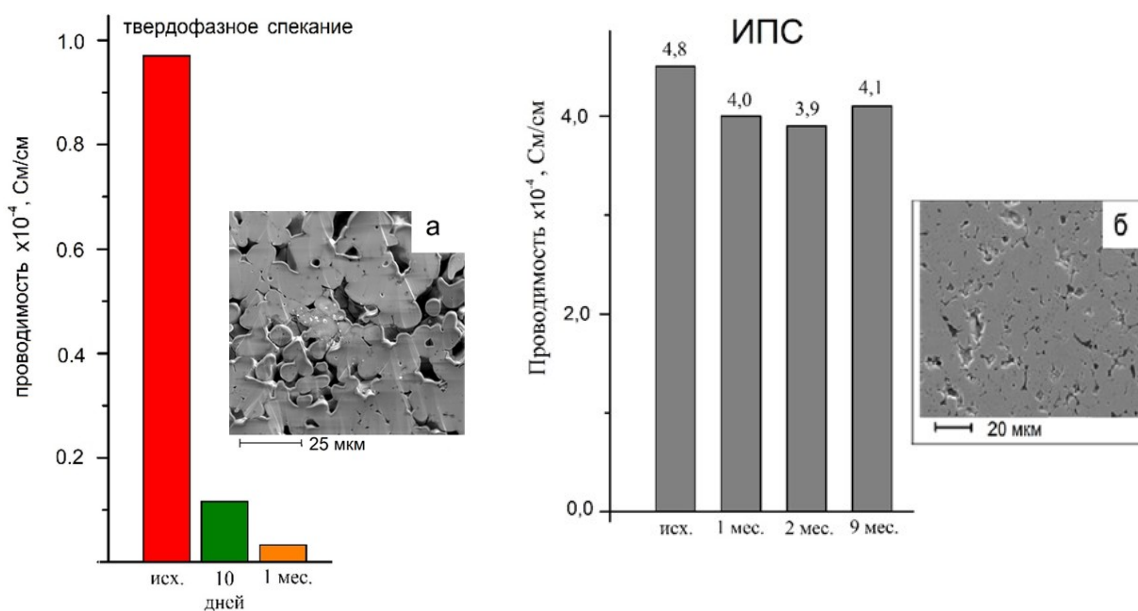


Рисунок 5 – Сравнительные диаграммы Li-ионной проводимости и соответствующие СЭМ-изображения керамики Ta-LLZO после твердофазного спекания (а) и после искрового плазменного спекания (ИПС) (б)

Организация: ИХТРЭМС КНЦ РАН

Авторы: в. н. с., к. т. н., Куншина Г.Б., м. н. с. Бочарова И.В.

Публикации:

1. Куншина Г.Б., Бочарова И.В., Белов А.А., Шичалин О.О., Папынов Е.К. Консолидация методом искрового плазменного спекания порошков Al и Ta-замещенного  $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$  с литий-ионной проводимостью // *Электрохимия*. 2025. Т. 61. №1. С. 93-104. DOI: 10.31857/S0424857025010052.

2. Kunshina G.B., Bocharova I.V. Synthesis of  $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$  solid electrolyte from oxalate precursor // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2025. V. 70. No. 6. P. 812–820. <https://doi.org/10.1134/S0036023625601606>.

## 6. Нанокристаллическая керамика $Y_2Zr_2O_7$ повышенной плотности и твердости для термобарьерных покрытий, матриц для иммобилизации радиоактивных отходов

С применением электроискрового спекания и механоактивации получена нанокристаллическая керамика  $Y_2Zr_2O_7$  повышенной однородности, плотности и твердости. Методом соосаждения гидроксидов синтезирован исходный прекурсор цирконата иттрия  $Y_2Zr_2O_7$ , проведена его механоактивация в центробежно-планетарной мельнице АГО-2 с гарнитурой из диоксида циркония в течение 30 мин. Из исходного и механоактивированного прекурсоров методом электроискрового спекания при температуре 1300 °С в течение 5 мин получены керамики цирконата иттрия (рис. 6) с структурой разупорядоченного флюорита (размер кристаллитов 90-92 нм). Применение при спекании механоактивированного прекурсора позволило увеличить микротвердость и повысить значения модуля Юнга на 78 %, достичь значения относительной плотности 97% (таблица 1).

Таблица 1 – Микротвердость (Н), модуль Юнга (Е) и плотность образцов керамики  $Y_2Zr_2O_7$

Прекурсор	ИП	МП
Микротвердость, ГПа	9.2±1.5	16.4±1.5
Модуль Юнга, ГПа	153.0±2.8	187.8±2.8
Отн. плотн., %	96	97

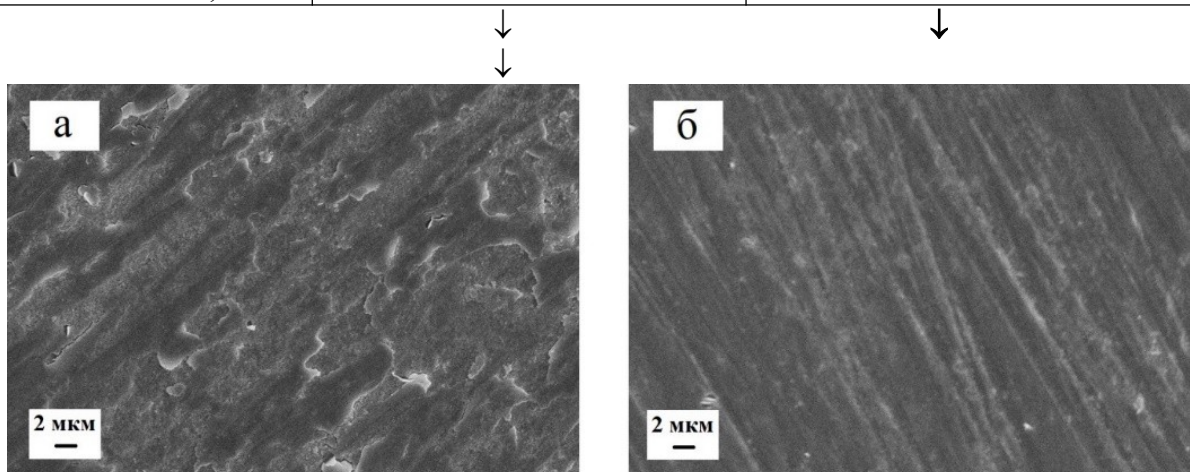


Рисунок 6 – СЭМ-изображения поверхности керамических образцов, полученных из исходного (а) и механоактивированного (б) прекурсоров.

**Организация:** Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева ФИЦ КНЦ РАН, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Институт проблем промышленной экологии севера ФИЦ КНЦ РАН)

**Руководитель** – гл. н. с., д. х. н. Калинин А.М.

**Публикация:** *O.A. Kuzmenkov, D.V. Dudina, M.A. Esikov, O.B. Shcherbina, V.V. Efremov, A.M. Kalinkin. Synthesis of nanocrystalline  $Y_2Zr_2O_7$  by the coprecipitation hydroxide method using mechanical activation and preparation of ceramics by spark plasma sintering. // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2025 (принята в печать).*

## 7. Новый магнитный биокомпозит

Разработан новый магнитный биокомпозит на основе синтетического силиката кальция для направленной доставки химиотерапевтического препарата (5-фторурацила). Наноструктурированный материал (носитель для 5-ФУ), полученный одностадийным гидротермальным синтезом, сочетает высокую удельную поверхность (до 59 м<sup>2</sup>/г), ёмкость загрузки препарата (10 мг/г), с контролируемым высвобождением в течение 7 суток, обладает абсолютной биосовместимостью и биорезорбцией. Включение магнитных наночастиц Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> обеспечивает управляемую доставку в опухоль под внешним магнитным полем, снижая системную токсичность на весь организм. Биологические испытания подтвердили отсутствие токсичности компонентов композита (силикат кальция) *in vitro* и *in vivo*, а также их постепенную биорезорбцию без патологических изменений тканей

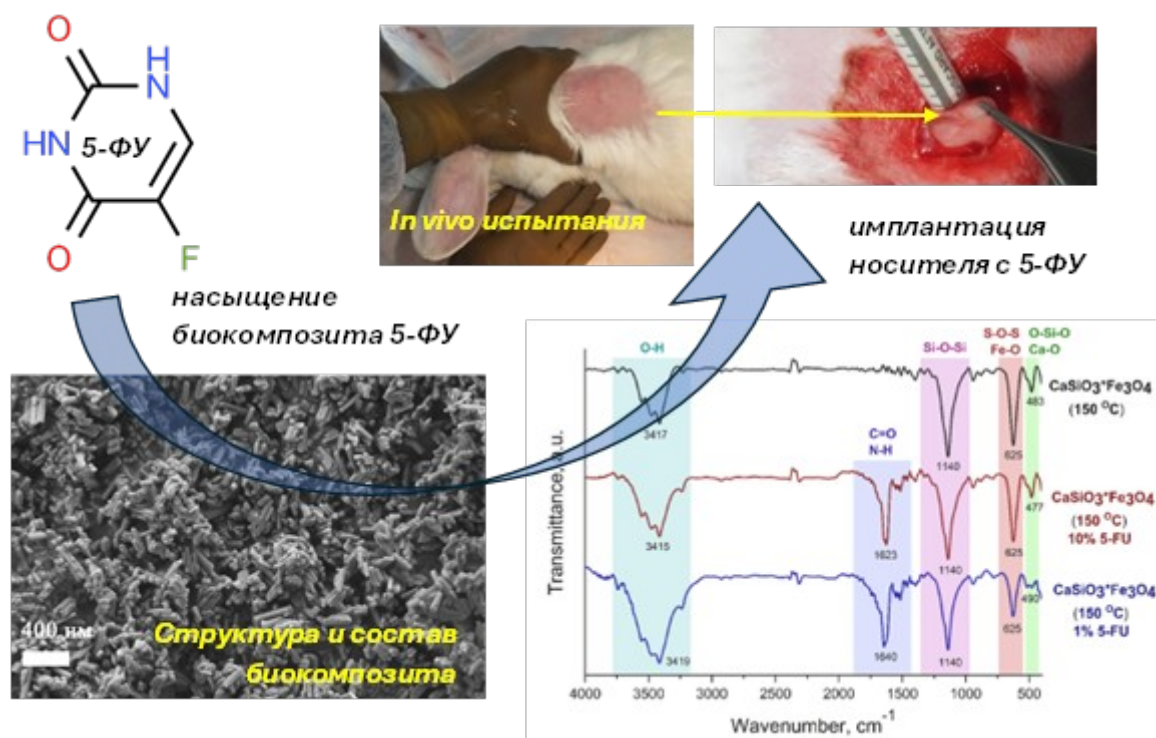


Рисунок 7 – Структура, состав и фото экспериментальных биоиспытаний магнитного биокомпозита CaSiO<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, предназначенного для адресной доставки химиотерапевтического препарата (5-фторурацила)

**Организация:** ДВФУ совместно с ТГМУ.

**Публикации:** Shichalin O.O., Buravlev I.Yu., Apanasevich V.I., Papynov E.K. and et al. Synthetic magnetic biocomposite based on calcium silicate for targeted delivery of 5-fluorouracil // *Materials Chemistry and Physics*. – 2026. Vol. 350. – Art. numb. 131859. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131859> (Q1, IF JCR 4.7).

## 8. Высокоэффективная матрица для полного цикла иммобилизации радиоактивного стронция-90

Разработан высокоэффективный материал на основе цеолита Na-Y и керамика минералоподобного состава на его основе для полного цикла иммобилизации радиоактивного стронция-90. Сверхплотные керамические матрицы с рекордно низкой скоростью выщелачивания радиоактивного  $^{90}\text{Sr}$  ( $\sim 10^{-7}$  г·см $^{-2}$ ·сут $^{-1}$ ) соответствуют нормативным требованиям и обеспечивают его надежное захоронение или безопасное полезное использование в радиоизотопной продукции. Впервые с помощью синхротронных исследований (EXAFS) детально установлен механизм фиксации стронция в кристаллической фазе  $\text{Sr}(\text{Na})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  гидротермически стойкой керамики. Технология перспективна для обращения с жидкими радиоактивными отходами.

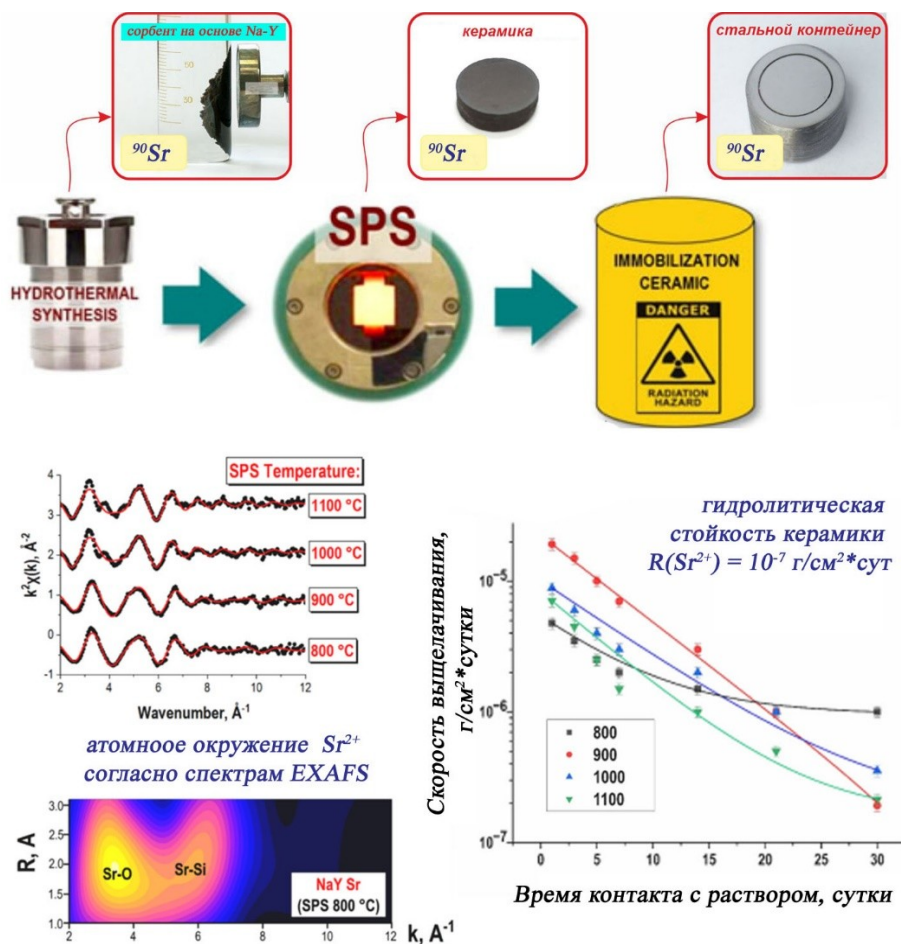


Рисунок 8 - Схема получения сорбента и его керамической отвержденной формы состава  $\text{Sr}(\text{Na})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  с иммобилизованным стронцием, структурный механизм фиксации стронция в матрице по данным синхротронного анализа (EXAFS) и сведения о гидротермической стойкости керамики, предназначенной для надежной изоляции в герметичном контейнере и захоронения

**Организация:** ДВФУ совместно с ИХТРЭМС РАН, НИЦ «Курчатовский институт» и ИОНХ НАН Беларуси.

**Публикации:** Shichalin O.O., Papunov E.K., Ivanov N.P., Sergienko V.I., Tananaev I.G. and et al. Structural and phase evolution of NaY zeolite during strontium adsorption and immobilization in aluminosilicate ceramic matrices // Separation and Purification Technology. – 2025. Vol. 379. Art. numb. 134899. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134899> (Q1, IF JCR 9.0).

## 9. Новые композитные люминесцентные материалы

Разработаны новые композитные люминесцентные материалы на основе стеклянных микросфер, инкапсулирующих в своем объеме длительно послесвечающие люминофоры  $Y_2O_3S:Eu^{3+}$  (красное свечение) и  $Sr_4Al_{14}O_{25}:Eu^{2+}, Dy^{3+}$  (синее свечение), для направленной стимуляции роста растений в условиях слабой освещенности. Инкапсуляция обеспечивает стабильность и биобезопасность люминофоров, исключая их миграцию в окружающую среду. Путём варьирования соотношения красного и синего свечения (R/B от 1,16:1 до 2,68:1) удалось селективно управлять морфогенезом газонной травы: высокие соотношения усиливали рост побегов (увеличение высоты до 44,18%), а низкие – развитие корневой системы и кущение (увеличение числа побегов на 16,7%). Технология позволяет осуществлять энергонезависимую ночную подсветку растений, что создаёт основу для устойчивых агросистем в условиях светодифицита.

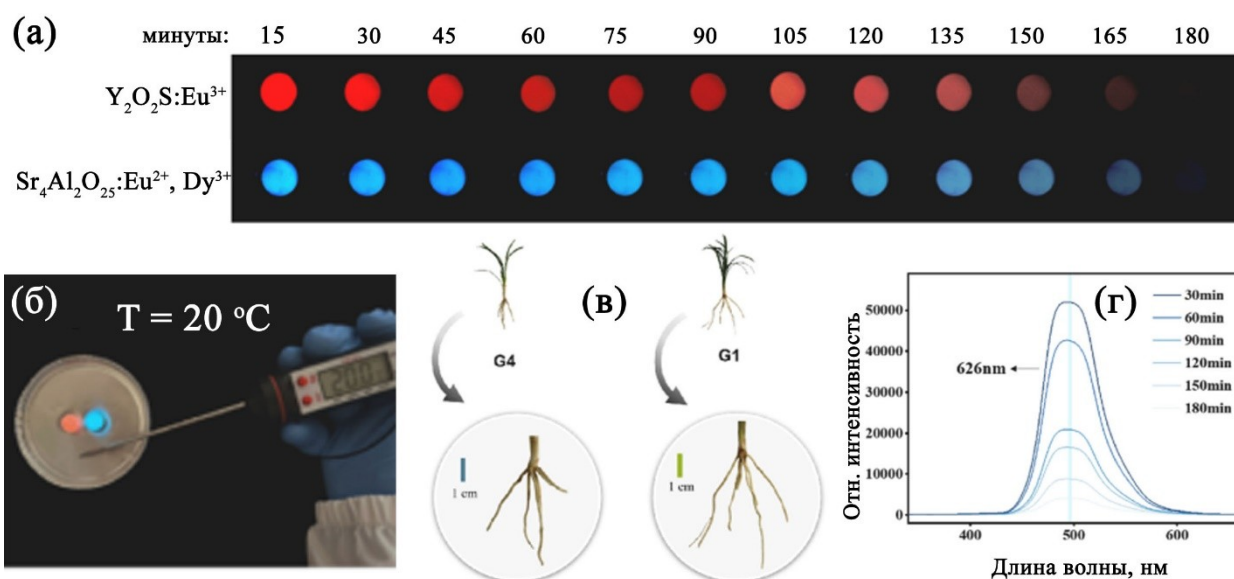


Рисунок 9 – Внешний вид (а) стеклянных микросфер, содержащих красные ( $Y_2O_3S:Eu^{3+}$ ) и синие ( $Sr_4Al_{14}O_{25}:Eu^{2+}, Dy^{3+}$ ) люминофоры (послесвечение), испытания на термостойкость и водостойкость люминофорных образцов (б), фактические фотографии корней после стимулирующего роста, диаграмма спектрального анализа ослабления послесвечения стеклянных микросфер  $Sr_4Al_{14}O_{25}:Eu^{2+}, Dy^{3+}$

**Организация:** ДВФУ совместно с Шанхайским технологическим институтом и Шанхайским институтом керамики Китайской академии наук, КНР.

**Публикации:** Wang Y., Shi Y., Shichalin O.O., Papynov E.K., Buravle I.Yu., et al. Glass-microsphere-encapsulated long afterglow phosphors enhance turfgrass growth under low-light stress // *Ceramics International*. – 2025. – Vol. 51, Is. 24. – P. 40735-40744. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.05.360>. (Q1, IF JCR 5.6).