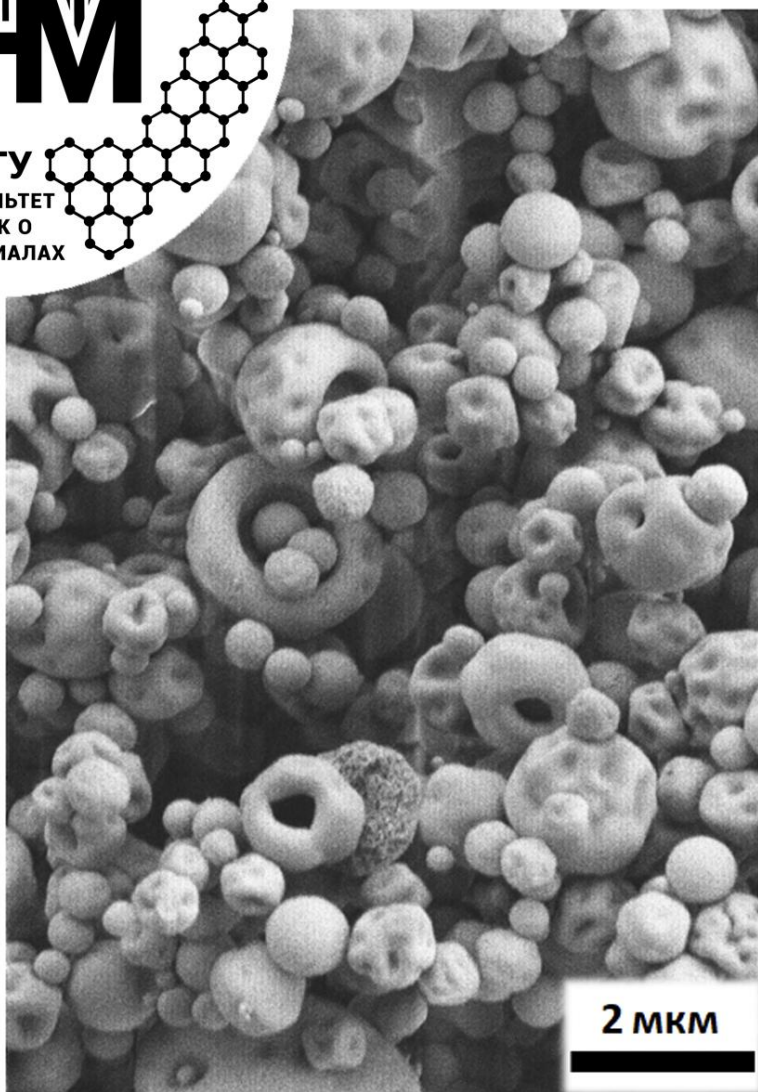
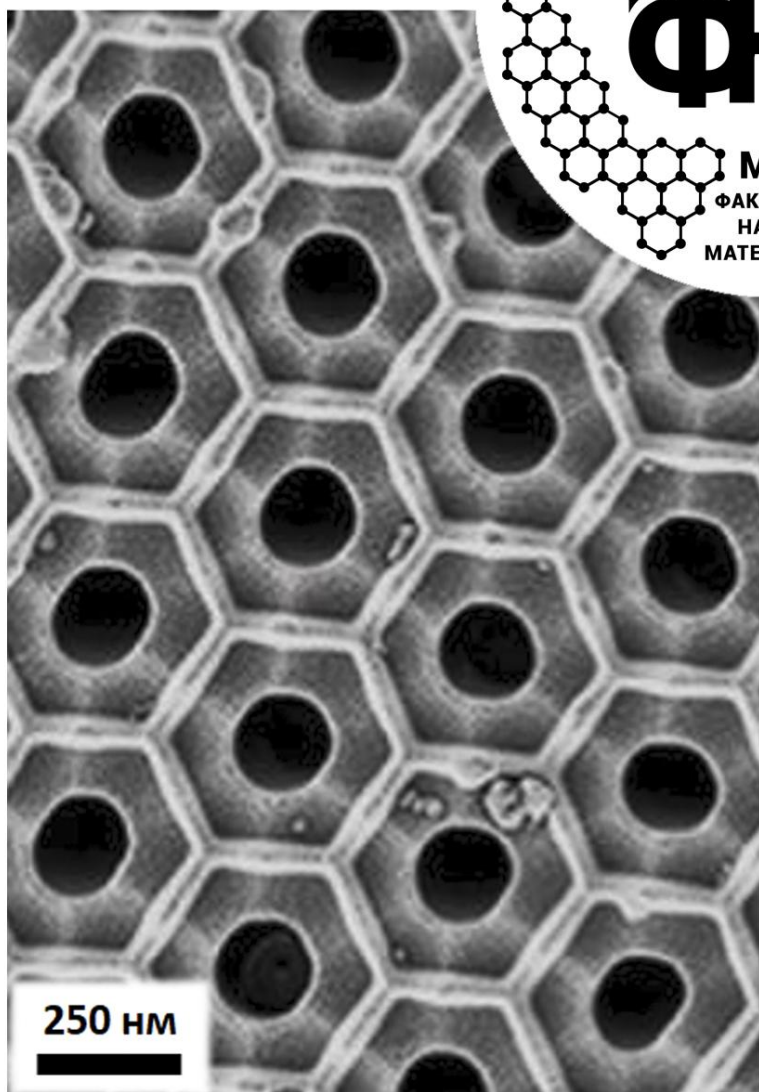


Материалы к защитам выпускных квалификационных работ бакалавров

Факультет наук
о материалах МГУ

2025

www.fnm.msu.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Подготовка бакалавров на Факультете наук о материалах МГУ	4
Состав Государственной экзаменационной комиссии	6
Расписание защит квалификационных работ бакалавров	7
3 июня (вторник)	7
4 июня (среда).....	8
5 июня (четверг)	9
6 июня (пятница)	10
Аннотации квалификационных работ бакалавров	11
Плешаков Г.А.	11
Малинин Н.М.....	13
Витковский В.В.	15
Астахов Н.В.	17
Хвощевская Д.А.	19
Соловьёв И.Д.	21
Дубов Л.А.....	22
Рассолова Ю.Р.	24
Подлягин В.А.....	27
Мотовило Т.А.	28
Гладких А.Ю.....	30
Родина Л.С.	32
Лскавян Д.Н.	34
Погиба А.А.....	35
Тосенко В.А.	37
Жукова И.Н.	38
Александрович А.С.....	39
Касимовская В.С.	41
Сафиуллина А.Р.....	43
Шварцберг М.А.	44

ПОДГОТОВКА БАКАЛАВРОВ НА ФАКУЛЬТЕТЕ НАУК О МАТЕРИАЛАХ МГУ

Естественнонаучная направленность подготовки сосредоточена на химии, физике и механике материалов. Пересечение областей этих дисциплин – это основное поле экспериментальной работы учащихся. Именно по такой схеме происходит подготовка студентов. Сегодня это двухступенчатая система «бакалавриат-магистратура».

Программа обучения бакалавров включает базовую (157 зач.ед.) и вариативную (47 зач.ед.) части¹. Здесь содержатся дисциплины общекультурной, общенаучной и профессиональной подготовки. Важным фактором, способствующим развитию творческой активности студентов, является то, что научная работа входит в учебный план. Форма отчетности – это обязательные студенческие конференции, которые проводятся по окончании каждого семестра. Место выполнения научной работы не ограничено своим факультетом. Студенты уже с первого семестра могут работать в лабораториях химического и физического факультетов МГУ, институтов РАН и других, согласованных с администрацией, организаций. О высокой научной активности студентов свидетельствует большое количество публикаций в научных журналах, а также участие студентов в российских и международных научных конференциях. Общее число публикаций бакалавров-выпускников за 2016-2025 годы представлено в таблице.

Сведения о бакалаврах ФНМ

Год окончания бакалавриата	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Общее число студентов	21	19	26	19	19	22	19	21	27	20
Число студентов с публикациями	20	19	24	19	19	21	18	19	24	20
Общее число публикаций (статей)	135 16	122 11	185 27	140 23	86 25	187 32	94 13	168 39	183 31	180 21
Оценки за защиту ВКР										
«отлично»	18	17	26	17	18	18	18	19	24	
«хорошо»	2	1	0	2	1	3	1	2	3	
«удовлетворительно»	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
Число работ, отмеченных ГЭК и институтами РАН	9	5	9	9	9	8	8	8	9	
Число дипломов с отличием	9	3	11	3	4	9	8	9	11	

¹ http://www.fnm.msu.ru/images/files/documents/study/curriculum/bach_curr.pdf

В 2025 году выпускные квалификационные работы будут защищать 20 бакалавров факультета. Общее число публикаций составляет 180, из них 21 статья. Работы выполняли на кафедрах неорганической химии, аналитической химии, электрохимии, физической химии Химического факультета МГУ, в лаборатории новых материалов для солнечной энергетики, на кафедре наноматериалов, на кафедре междисциплинарного материаловедения Факультета наук о материалах МГУ, Институте общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Сколковском институте науки и технологий.

Оценивать работы будет высококвалифицированная и объективная комиссия, возглавляемая членом-корреспондентом РАН, доктором технических наук, заместителем директора ИОНХ РАН по научной работе, заведующим лабораторией теоретических основ химической технологии Вошкиным Андреем Алексеевичем. В состав Комиссии, наряду с преподавателями ФНМ и Химического факультета, входят представители университетов и Российской академии наук, ведущие специалисты институтов РАН. Секретарь ГЭК – кандидат химических наук, старший преподаватель Факультета наук о материалах МГУ имени М.В.Ломоносова Берекчиян Михаил Вартанович.

**СОСТАВ ГОСУДАРСТВЕННОЙ
ЭКЗАМЕНАЦИОННОЙ КОМИССИИ
по направлению 04.03.02 «Химия, физика и механика материалов»**

1	Вошкин Андрей Алексеевич – председатель	чл.-корр. РАН, д.т.н., зам. директора ИОНХ РАН
2	Гудилин Евгений Алексеевич	чл.-корр. РАН, д.х.н., проф., зав. каф., ФНМ МГУ // с.н.с., ИОНХ РАН
3	Дрожжин Олег Андреевич	к.х.н., в.н.с., Химический ф-т МГУ
4	Егорышева Анна Владимировна	д.х.н., в.н.с., ИОНХ РАН
5	Иванов Владимир Константинович	чл.-корр. РАН, д.х.н., директор ИОНХ РАН
6	Козлова Таисия Олеговна	к.х.н., с.н.с., ИОНХ РАН
7	Кауль Андрей Рафаилович	д.х.н., проф., зав. лаб., Химический ф-т МГУ // научный руководитель ЗАО «Суперокс»
8	Левашов Евгений Александрович	академик РАЕН, д.т.н., проф., зав. каф., МИСИС
9	Лисичкин Георгий Васильевич	д.х.н., проф., зав. лаб., Химический ф-т МГУ
10	Мальков Михаил Аркадьевич	к.т.н., доц., директор ООО «Мэйертон Инжиниринг»
11	Пономаренко Сергей Анатольевич	чл.-корр. РАН, д.х.н., директор ИСПМ РАН
12	Путляев Валерий Иванович	к.х.н., доц., Химический ф-т МГУ
13	Скипетров Евгений Павлович	д.ф.-м.н., проф., Физический ф-т МГУ
14	Успенская Ирина Александровна	д.х.н., проф., зав. лаб., Химический ф-т МГУ
15	Филиппов Ярослав Юрьевич	к.х.н., преп., Институт механики МГУ
16	Фролов Александр Сергеевич	к.ф.-м.н., зав. лаб., МФТИ
17	Черникова Елена Вячеславовна	д.х.н., проф., Химический ф-т МГУ
18	Шаталова Татьяна Борисовна	к.х.н., зам. декана по учебной работе, ФНМ МГУ
19	Шляхтин Олег Александрович	д.х.н., в.н.с., Химический ф-т МГУ
	Берекчиян Михаил Вартанович – секретарь	к.х.н., ст. преп., ФНМ МГУ

РАСПИСАНИЕ ЗАЩИТ КВАЛИФИКАЦИОННЫХ РАБОТ БАКАЛАВРОВ

3 июня (вторник), ауд. 235 лаб. корп. Б

Время	Бакалавр	Название работы	Место выполнения работы	Руководитель	Рецензент
10:00 – 10:05	Вступительное слово Председателя Государственной экзаменационной комиссии				
10:05 – 10:40	Плешаков Георгий Андреевич	Термокаталитические сенсоры метана: химический дизайн материалов микронагревателя и катализатора	Кафедра междисциплинарного материаловедения, Факультет наук о материалах МГУ; Лаборатория неорганического материаловедения, кафедра неорганической химии, Химический факультет МГУ	к.х.н., асс. Росляков Илья Владимирович; м.н.с. Калинин Иван Александрович	к.х.н., м.н.с. Платонов Вадим Борисович Лаборатория химии и физики полупроводниковых и сенсорных материалов, кафедра неорганической химии, Химический факультет МГУ
10:40 – 11:15	Малинин Николай Михайлович	Нановолокна (La,Ba)FeO ₃ как материалы для полупроводниковых газовых сенсоров	Лаборатория химии и физики полупроводниковых и сенсорных материалов, кафедра неорганической химии, Химический факультет МГУ	к.х.н., м.н.с. Платонов Вадим Борисович	к.х.н., асс. Росляков Илья Владимирович Кафедра междисциплинарного материаловедения, Факультет наук о материалах МГУ
11:15 – 11:50	Витковский Виталий Вячеславович	Получение термически и механически стабильных пористых плёнок анодного оксида алюминия в фосфористой кислоте	Лаборатория кинетики электродных процессов, кафедра электрохимии, Химический факультет МГУ	к.х.н., в.н.с. Напольский Кирилл Сергеевич; инж.-иссл. Сотничук Елена Олеговна	к.х.н., с.н.с. Евдокимов Павел Владимирович Лаборатория неорганического материаловедения, кафедра неорганической химии, Химический факультет МГУ
11:50 – 12:20	Перерыв				
12:20 – 12:55	Астахов Никита Витальевич	Синтез новых селенитов 3d-металлов (Mn, Ni, Cu) с низкоразмерными мотивами магнитной подсистемы	Лаборатория направленного неорганического синтеза, кафедра неорганической химии, Химический факультет МГУ	к.х.н., доц. Бердонов Петр Сергеевич	к.х.н., в.н.с. Хасанова Нелли Ракиповна Лаборатория неорганической кристаллохимии, кафедра неорганической химии, Химический факультет МГУ
12:55 – 13:30	Хвощевская Дарья Алексеевна	Аэрогели на основе германатов аммония и оксида германия (IV): синтез, допирование, люминесценция	Лаборатория синтеза функциональных материалов и переработки минерального сырья, ИОНХ РАН; Лаборатория неорганического материаловедения, кафедра неорганической химии, Химический факультет МГУ	к.х.н., н.с. Веселова Варвара Олеговна; к.х.н., с.н.с. Евдокимов Павел Владимирович	к.х.н., с.н.с. Рюмин Михаил Александрович Лаборатория термического анализа и калориметрии, ИОНХ РАН

4 июня (среда), ауд. 235 лаб. корп. Б

Время	Бакалавр	Название работы	Место выполнения работы	Руководитель	Рецензент
10:00 – 10:05	Вступительное слово Председателя Государственной экзаменационной комиссии				
10:05 – 10:40	Соловьёв Иван Дмитриевич	Трёхкомпонентные медиаторные биосенсоры на основе оксидаз для анализа биологических жидкостей	Лаборатория электрохимических методов, кафедра аналитической химии, Химический факультет МГУ	к.х.н., с.н.с. Никитина Вита Николаевна; д.х.н., проф. Карякин Аркадий Аркадьевич	к.б.н., с.н.с. Сафенкова Ирина Викторовна Лаборатория иммунобиохимии, Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН
10:40 – 11:15	Дубов Леонид Алексеевич	Электрохимические сенсоры на основе мембраны из оксида графена для экспресс-анализа выдыхаемого аэрозоля	Лаборатория электрохимических методов, кафедра аналитической химии, Химический факультет МГУ	к.х.н., с.н.с. Комкова Мария Андреевна; д.х.н., проф. Карякин Аркадий Аркадьевич	д.х.н., проф. Матвеев Владимир Николаевич Лаборатория коллоидной химии, кафедра коллоидной химии, Химический факультет МГУ
11:15 – 11:50	Рассолова Юлия Романовна	Биорезорбируемые остеокондуктивные керамические материалы на основе системы $Mg_3(PO_4)_2$ – $Mg_2P_2O_7$ для регенерации костной ткани	Кафедра междисциплинарного материаловедения, Факультет наук о материалах МГУ; Лаборатория неорганического материаловедения, кафедра неорганической химии, Химический факультет МГУ	к.х.н., доц. Филиппов Ярослав Юрьевич; инж. Мурашко Альбина Максимовна	к.т.н., с.н.с. Фомин Александр Сергеевич Лаборатория №20 Керамических композиционных материалов и биоматериалов, ИМЕТ РАН
11:50 – 12:20	Перерыв				
12:20 – 12:55	Подлягин Владимир Алексеевич	Бифазная керамика гидроксиапатит/трикальций фосфат: синтез и свойства	Лаборатория неорганического материаловедения, кафедра неорганической химии, Химический факультет МГУ; Кафедра междисциплинарного материаловедения, Факультет наук о материалах МГУ	к.х.н., доц. Путляев Валерий Иванович; асп. 1 г/о Голубчиков Даниил Олегович	к.х.н., в.н.с. Фадеева Инна Вилоровна Лаборатория №20 Керамических композиционных материалов и биоматериалов, ИМЕТ РАН
12:55 – 13:30	Мотовило Татьяна Андреевна	Производные лигнина как источник неграфитизируемого углерода для натрий-ионных аккумуляторов	Лаборатория материалов для электрохимических процессов, кафедра электрохимии, Химический факультет МГУ	к.х.н., н.с. Бобылёва Зоя Владимировна; асп. 2 г/о Лакиенко Григорий Павлович	к.х.н., м.н.с. Назаров Евгений Евгеньевич Центр энергетических технологий, Сколковский институт науки и технологий

5 июня (четверг), ауд. 235 лаб. корп. Б

Время	Бакалавр	Название работы	Место выполнения работы	Руководитель	Рецензент
10:00 – 10:05	Вступительное слово Председателя Государственной экзаменационной комиссии				
10:05 – 10:40	Гладких Арсений Юрьевич	Применение наночастиц золота для улучшения электролюминесцентных свойств координационных соединений лантанидов	Кафедра наноматериалов, Факультет наук о материалах МГУ; Лаборатория химии координационных соединений, кафедра неорганической химии, Химический факультет МГУ	д.х.н., проф. Уточникова Валентина Владимировна	д.т.н., зав. лаб. Саранин Данила Сергеевич Лаборатория перспективной солнечной энергетики, Университет МИСИС
10:40 – 11:15	Родина Любовь Сергеевна	Высокотемпературная люминесцентная термометрия на основе координационных соединений европия и тербия	Кафедра наноматериалов, Факультет наук о материалах МГУ; Лаборатория химии координационных соединений, кафедра неорганической химии, Химический факультет МГУ	д.х.н., проф. Уточникова Валентина Владимировна; м.н.с. Целых Любовь Олеговна	к.х.н., доц. Белоусов Юрий Александрович Лаборатория химии и физики полупроводниковых и сенсорных материалов, кафедра неорганической химии, Химический факультет МГУ
11:15 – 11:50	Лскавян Давид Норайрович	Влияние кинетики стадии нуклеации на мощностные характеристики электродов на основе гидроксида никеля	Центр энергетических технологий, Сколковский институт науки и технологий; Лаборатория кинетики электродных процессов, кафедра электрохимии, Химический факультет МГУ	к.х.н., ст. преп. (Сколковский институт науки и технологий), доц. (Химический факультет МГУ) Никитина Виктория Андреевна	к.х.н., н.с. Захаркин Максим Валерьевич Лаборатория материалов для электрохимических процессов, кафедра электрохимии, Химический факультет МГУ
11:50 – 12:20	Перерыв				
12:20 – 12:55	Погиба Артём Александрович	Синтез и исследование смешанного оксида $\text{Na}_{2/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{2/3}\text{O}_2$, допированного магнием, как материала катода для натрий-ионного аккумулятора	Лаборатория химии и физики полупроводниковых и сенсорных материалов, кафедра неорганической химии, Химический факультет МГУ	д.х.н., в.н.с. Яшина Лада Валерьевна; к.х.н. Захарченко Татьяна Константиновна	к.х.н., н.с. Захаркин Максим Валерьевич Лаборатория материалов для электрохимических процессов, кафедра электрохимии, Химический факультет МГУ
12:55 – 13:30	Тосенко Владислав Андреевич	Термодинамические свойства и фазовые равновесия в системе "оксид висмута (III) - оксид бора"	Лаборатория химической термодинамики, кафедра физической химии, Химический факультет МГУ	к.т.н., в.н.с. Кондратьев Александр Владимирович	к.х.н., доц. Дроздов Андрей Анатольевич Лаборатория химии и физики полупроводниковых и сенсорных материалов, кафедра неорганической химии, Химический факультет МГУ

6 июня (пятница), ауд. 235 лаб. корп. Б

Время	Бакалавр	Название работы	Место выполнения работы	Руководитель	Рецензент
10:00 – 10:05	Вступительное слово Председателя Государственной экзаменационной комиссии				
10:05 – 10:40	Жукова Ирина Николаевна	Разработка высоковольтных фотовольтаических преобразователей на основе органо-неорганических перовскитов	Лаборатория новых материалов для солнечной энергетики, Факультет наук о материалах МГУ	к.х.н., н.с. Ивлев Павел Андреевич; к.х.н., зав. лаб. Тарасов Алексей Борисович	к.х.н., ст. преп. Берекчиян Михаил Вартанович Факультет наук о материалах МГУ
10:40 – 11:15	Александрович Анна Станиславовна	Безмедиаторный биоэлектрокатализ глюкозодегидрогеназами, иммобилизованными на полиазилах	Лаборатория электрохимических методов, кафедра аналитической химии, Химический факультет МГУ	к.х.н., с.н.с. Комкова Мария Андреевна; д.х.н., проф. Карякин Аркадий Аркадьевич	к.х.н., в.н.с. Напольский Кирилл Сергеевич Лаборатория кинетики электродных процессов, кафедра электрохимии, Химический факультет МГУ
11:15 – 11:50	Касимовская Валерия Сергеевна	Мониторинг биологических жидкостей биосенсорами на основе берлинской лазури в гальваноимпульсном режиме	Лаборатория электрохимических методов, кафедра аналитической химии, Химический факультет МГУ	к.х.н., с.н.с. Комкова Мария Андреевна; д.х.н., проф. Карякин Аркадий Аркадьевич	д.х.н., проф. Еремеев Николай Леонидович Лаборатория мицеллярной энзимологии, кафедра химической энзимологии, Химический факультет МГУ
11:50 – 12:20	Перерыв				
12:20 – 12:55	Сафиуллина Алина Рафаэлевна	Влияние состава электролита на сохранение емкости натрий-ионных аккумуляторов при длительном циклировании	Лаборатория материалов для электрохимических процессов, кафедра электрохимии, Химический факультет МГУ	к.х.н., н.с. Бобылёва Зоя Владимировна	к.х.н., ст. преп. Шматова Ольга Игоревна Центр энергетических технологий, Сколковский институт науки и технологий
12:55 – 13:30	Шварцберг Марк Андреевич	Влияние дырочно-транспортного слоя на процесс кристаллизации пленок гибридных перовскитов для создания крупноформатных солнечных элементов	Лаборатория новых материалов для солнечной энергетики, Факультет наук о материалах МГУ	к.х.н., зав. лаб. Тарасов Алексей Борисович; ст.-иссл. Ординарцев Артем Алексеевич	д.х.н., зав. лаб., в.н.с. Лупоносков Юрий Николаевич Лаборатория полимерных солнечных батарей, Институт синтетических полимерных материалов РАН
13:30 – 14:00	Подведение итогов				

АННОТАЦИИ КВАЛИФИКАЦИОННЫХ РАБОТ

Термокаталитические сенсоры метана: химический дизайн материалов микронагревателя и катализатора

Плешаков Г.А.

Руководители: к.х.н., асс. Росляков И.В., м.н.с. Калинин И.А.

Газообразный метан активно используется в различных отраслях промышленности и в быту. Негативным моментом является высокая взрыво- и пожароопасность метана, в связи с чем актуальной является задача мониторинга его концентрации. Для детектирования метана в настоящее время активно применяют газовые сенсоры термокаталитического типа. Основная сложность их эксплуатации заключается в высоком энергопотреблении и низкой стабильности работы. Актуальным подходом к решению первой проблемы является миниатюризация за счет перехода к планарной геометрии нагревательного элемента. Вторая может быть связана как с деградацией микроструктуры нагревателей, вследствие чего наблюдается дрейф их электрофизических характеристик, так и со спеканием используемых в качестве катализатора частиц благородных металлов в ходе продолжительной работы сенсора, что приводит к падению чувствительности.

Целью данной работы является химический дизайн материалов планарного нагревательного элемента и модификация традиционно используемого палладий-платинового катализатора никелем для увеличения долговременной стабильности чувствительности термокаталитических сенсоров метана.

В качестве перспективного материала для планарного нагревательного элемента исследованы плёнки Pt-Rh/Zr толщиной 250 нм, которые наносили на поверхность анодного оксида алюминия методом магнетронного напыления. Слои Zr толщиной 9 нм и сплава Pt-11 масс. % Rh толщиной 16 нм наносили поочерёдно. Наилучшие результаты с точки зрения однородной морфологии в сочетании с низким удельным сопротивлением демонстрируют плёнки, отожжённые по предложенной в работе двухстадийной программе: 4 часа при 450 °С, затем 12 часов при 900 °С. Средний размер зёрен составил 60 ± 27 нм (против 202 ± 69 нм для плёнок, отожжённых в одну стадию при 900 °С). При этом цирконий окисляется и кристаллизуется в виде t-ZrO₂ уже при 450 °С, что замедляет последующую рекристаллизацию сплава Pt-Rh при 900 °С.

Для повышения стабильности палладий-платинового катализатора в работе предложено введение добавки никеля. Апробировано два подхода к нанесению катализатора на коммерческие нагревательные элементы из платиновой проволоки с носителем γ -Al₂O₃. Первый заключается в пропитке по влагоёмкости раствором комплексов Pd, Pt и Ni с последующим их термическим разложением. В данном случае, никель оказывается равномерно распределен в носителе с формированием фазы шпинели NiAl₂O₄, а палладий и платина образуют частицы оксида и металла, соответственно, со средним размером 26 ± 8 нм. Второй подход заключается в нанесении суспензии наночастиц аналогичного состава, полученных на предварительном этапе путём коллоидного синтеза (разложением ацетилацетонатов в высококипящем растворителе в присутствии стабилизаторов). Размер получаемых в ходе коллоидного синтеза наночастиц Pd оказывается гораздо меньше – 7 ± 1 нм, а размер триметаллических частиц – 3 ± 1 нм. Чувствительность сенсоров на основе коллоидных частиц составляет ~ 70 мВ/об. % CH₄ при температуре 500 °С, что сопоставимо с сенсорами, полученными методом пропитки. Дрейф чувствительности достигает 40% в течение первых 20 суток и далее стабилизируется.

Таким образом, разработанные в работе подходы к увеличению стабильности материалов микронагревателя и катализатора показали высокую эффективность, что говорит о перспективности их использования для создания термokatалитических сенсоров метана с высокой долговременной стабильностью работы.

Публикации студента

(https://istina.msu.ru/profile/Pleshakoff_Georgiy_Andreevich/):

1. Pleshakov G.A., Kalinin I.A., Ivanov A.V., Roslyakov I.V., Yaminsky I.V., Napolskii K.S. *Towards High-Temperature MEMS: Two-Step Annealing Suppressed Recrystallization in Thin Multilayer Pt-Rh/Zr Films*. **Micromachines**, 2023, 14, 11, p. 2003, DOI 10.3390/mi14112003
2. Плешаков Г.А., Калинин И.А., Росляков И.В., Напольский К.С. *Коллоидный синтез наночастиц палладия в качестве катализатора для термokatалитических сенсоров метана*. **XXXII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов»**, электронный ресурс, Москва, Россия, 2025
3. Плешаков Г.А., Калинин И.А., Росляков И.В., Напольский К.С. *Pd-Pt-Ni/Al₂O₃ катализаторы для термokatалитических сенсоров метана*. **XV Конференция молодых ученых по общей и неорганической химии**, сборник тезисов, с. 51, Москва, Россия, 2025
4. Дербенев В.А., Калинин И.А., Плешаков Г.А., Росляков И.В., Напольский К.С. *Разработка методики фотолитографического структурирования анодного оксида алюминия для создания планарных сенсоров горючих газов*. **XV Конференция молодых ученых по общей и неорганической химии**, сборник тезисов, с. 341, Москва, Россия, 2025
5. Плешаков Г.А., Калинин И.А., Росляков И.В., Напольский К.С. *Создание термokatалитических газовых сенсоров на основе триметаллических катализаторов Pd-Pt-Ni*. **XXIII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Актуальные проблемы неорганической химии: химия и экология»**, сборник тезисов, с. 126-127, Красновидово, Россия, 2024
6. Дербенев В.А., Калинин И.А., Плешаков Г.А., Росляков И.В., Напольский К.С. *Структурирование пленок анодного оксида алюминия для создания планарных сенсоров горючих газов*. **XXIII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Актуальные проблемы неорганической химии: химия и экология»**, сборник тезисов, с. 106-107, Красновидово, Россия, 2024
7. Плешаков Г.А., Калинин И.А., Росляков И.В., Напольский К.С. *Оптимизация процесса отжига для повышения высокотемпературной стабильности плёнок Pt-Rh/Zr*. **XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии**, сборник тезисов, 1, с. 526, «Сириус», Россия, 2024
8. Плешаков Г.А., Калинин И.А., Росляков И.В., Напольский К.С. *Создание термokatалитических газовых сенсоров на основе нанесенных наночастиц Pd-Ni, полученных с помощью коллоидного синтеза*. **XIII Всероссийская конференция с международным участием «Химия твёрдого тела и функциональные материалы 2024»**, сборник тезисов, с. 362, Санкт-Петербург, Россия, 2024
9. Плешаков Г.А., Калинин И.А., Росляков И.В., Напольский К.С. *Исследование электрофизических характеристик тонкоплёночных микронагревателей состава Pt-Rh/Zr на подложке анодного оксида алюминия*. **XXXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов»**, электронный ресурс, Москва, Россия, 2024
10. Дербенев В.А., Калинин И.А., Плешаков Г.А., Росляков И.В., Напольский К.С. *Получение анизотропных материалов из анодного оксида алюминия с высоким разрешением*. **XXXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов»**, электронный ресурс, Москва, Россия, 2024
11. Дербенев В.А., Калинин И.А., Плешаков Г.А., Росляков И.В., Напольский К.С. *Химическое структурирование анодного оксида алюминия с высоким пространственным*

разрешением. XIV Конференция молодых ученых по общей и неорганической химии, сборник тезисов, с. 337, Москва, Россия, 2024

12. Плешаков Г.А., Калинин И.А., Иванов А.В., Росляков И.В., Напольский К.С. *Использование двухстадийной программы отжига для подавления рекристаллизации в тонких плёнках Pt-Rh/Zr. XXII Всероссийская школа-конференция «Актуальные проблемы неорганической химии: энергия+»*, сборник тезисов, с. 95-96, Красновидово, Россия, 2023

13. Плешаков Г.А., Калинин И.А., Росляков И.В., Напольский К.С. *Коллоидный синтез наночастиц палладия в качестве катализатора для термокаталитических сенсоров метана. XXXIII Менделеевская школа-конференция молодых ученых*, сборник тезисов, с. 49, Иваново, Россия, 2023

14. Плешаков Г.А., Калинин И.А., Росляков И.В., Напольский К.С. *Рекристаллизация плёнок Pt₈₁Rh₁₉/ZrO₂ при термической обработке. XXX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов»*, электронный ресурс, Москва, Россия, 2023

15. Плешаков Г.А., Калинин И.А., Росляков И.В., Напольский К.С. *Разработка программы отжига тонких плёнок Pt₈₁Rh₁₉/ZrO₂ для повышения их высокотемпературной устойчивости. XIII Конференция молодых ученых по общей и неорганической химии*, сборник тезисов, с. 53, Москва, Россия, 2023

16. Плешаков Г.А., Калинин И.А., Росляков И.В., Напольский К.С. *Повышение термической стабильности плёнок сплава Pt-Rh путём внедрения ZrO₂. XXI Всероссийская школа-конференция «Актуальные проблемы неорганической химии: синхротронные и нейтронные методы в химии современных материалов»*, сборник тезисов, с. 165-166, Красновидово, Россия, 2022

17. Плешаков Г.А., Калинин И.А., Росляков И.В., Напольский К.С. *Повышение термической стабильности плёнок Pt/Rh путём создания промежуточных слоёв из термостойких оксидов. XXIX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов»*, электронный ресурс, Москва, Россия, 2022

18. Плешаков Г.А., Калинин И.А., Росляков И.В., Напольский К.С. *Создание микронагревателей на основе тонких плёнок сплава платины с родием, модифицированных термостойкими оксидами. XII Конференция молодых ученых по общей и неорганической химии*, сборник тезисов, с. 213, Москва, Россия, 2022

Нановолокна (La,Ba)FeO₃ как материалы для полупроводниковых газовых сенсоров

Малинин Н.М.

Руководитель: к.х.н., м.н.с. Платонов В.Б.

На данный момент все большее применение в науке и технике находят перовскитные материалы благодаря возможности замещения атомов в широких пределах в рамках одного структурного типа, что позволяет контролируемым образом менять химические, электрофизические, сенсорные и каталитические свойства материалов. Перовскиты на основе LaFeO₃ находят свое применение в качестве материалов чувствительных к различным газам-аналитам, однако в литературе не объясняется связь замещения в А-позиции с проявлением определенных газочувствительных свойств. В рамках данной работы было проведено комплексное исследование нановолокон (La,Ba)FeO₃, полученных методом электроспиннинга, для выявления взаимосвязи состава и структуры с электрофизическими, сенсорными и каталитическими свойствами данных материалов.

Таким образом, целью работы стал синтез нановолокон LaFeO_3 и $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0.02, 0.04, 0.06$) методом электроспиннинга (ЭС) и исследование их структуры, состава, электрофизических свойств и реакционной способности при взаимодействии с газами. Для достижения данной цели необходимо было выполнить следующие задачи: провести синтез материалов, изучить их фазовый состав, морфологию, состав поверхности, определить зарядовое состояние элементов, исследовать реакционную способность по отношению к ряду газов, предложить модель формирования сенсорного сигнала.

Для синтеза материалов был использован метод электроспиннинга. В ходе исследования были использованы следующие методы: рентгенофлуоресцентный и рентгенофазовый анализ (РФА и РФА), ИК-спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), мёссбауэровская спектроскопия, термопрограммируемая десорбция ацетона, сопряженная с масс-спектрометрией (ТПД-МС), изучены сенсорные свойства *in situ* методом измерения электропроводности толстых плёнок.

Проведён синтез нановолокон $(\text{La,Ba})\text{FeO}_3$, имеющих губчатую структуру со средним диаметром волокон 250 нм, методом электроспиннинга. Однофазность образцов свидетельствует об успешном гетеровалентном замещении La на Ba. Исследования зарядового состояния элементов показали, что введение Ba привело к увеличению доли хемосорбированных форм кислорода на поверхности материала и увеличению степени окисления катионов железа. Неоднородность зарядового состояния Fe была подтверждена Мёссбауэровской спектроскопией. Увеличение доли хемосорбированного кислорода и степени окисления катионов железа связаны с зарядовой компенсацией, возникающей в ходе гетеровалентного замещения La на Ba. Полученные материалы продемонстрировали высокую чувствительность материалов к летучим органическим соединениям, в особенности к ацетону, что можно объяснить «многоэлектронностью» процесса окисления органических молекул хемосорбированным кислородом. Подобной чувствительности также может способствовать высокая каталитическая активность Fe^{+3} и повышенное содержание хемосорбированного кислорода. Исследования процесса окисления ацетона на поверхности материала методами DRIFTS и ТПД-МС позволили выявить взаимосвязь поэтапного окисления ацетона с высоким сенсорным сигналом.

Таким образом, в рамках данной работы был изучен фазовый состав, морфология образцов, состав поверхности, реакционную способность нановолокон $(\text{La,Ba})\text{FeO}_3$ по отношению к ряду газов-аналитов, предложена модель формирования сенсорного сигнала и изучен процесс окисления ацетона на поверхности материалов.

Публикации студента (<https://istina.msu.ru/profile/Nikolay1264/>):

1. Platonov V., Malinin N., Filatova D., Sapkov I., Rumyantseva M. *Electrospun (La,Ba)FeO₃ Nanofibers as Materials for Highly Sensitive VOC Gas Sensors*. **Sensors**, 2025, 25, 9
2. Филатова Д.Г., Платонов В.Б., Малинин Н.М., Троицкий А.А., Румянцева М.Н. *Изучение замещения лантана стронцием в ферритах лантана для газочувствительных сенсоров методом рентгенофлуоресцентного анализа с полным внешним отражением*. **Заводская лаборатория. Диагностика материалов**, 2025, 91, 4, с. 5-11
3. Платонов В.Б., Малинин Н.М., Сапков И.В., Румянцева М.Н. *Нановолокна LaFeO₃ как материалы для газовых сенсоров*. **Журнал общей химии**, 2024, 94, 11-12, с. 1121-1132
4. Platonov V., Malinin N., Vasiliev R., Rumyantseva M. *Room Temperature UV-Activated NO₂ and NO Detection by ZnO/rGO Composites*. **Chemosensors**, 2023, 11, 4, p. 227
5. Малинин Н.М. *Синтез и исследование свойств LaFeO₃, модифицированного частицами благородных металлов, как материала для газовых сенсоров*. **Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2025»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2025
6. Малинин Н.М., Платонов В.Б. *Исследование свойств нановолокон La_{1-x}Ba_xFeO₃, синтезированных методом электроспиннинга, как материалов для газовых сенсоров*. **XXIII Всероссийская школа-конференция молодых учёных «Актуальные проблемы неорганической химии: химия и экология»**, сборник тезисов, с. 118-119, Красновидово, Россия, 2024

7. Малинин Н.М. Синтез и исследование свойств $LaFeO_3$, допированного барием, как материала для газовых сенсоров. **Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2024»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2024
8. Малинин Н.М., Платонов В.Б. Исследование свойств нановолокон $La_{1-x}Sr_xFeO_3$ как материалов для газовых сенсоров, синтезированных методом электроспиннинга. **XXII Всероссийская школа-конференция молодых учёных «Актуальные проблемы неорганической химии: энергия +»**, сборник тезисов, с. 87-88, Красновидово, Россия, 2023
9. Малинин Н.М. Синтез и исследование свойств $LaFeO_3$ и материалов на его основе как материалов для газовых сенсоров. **Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2023»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2023
10. Малинин Н.М., Платонов В.Б. Нанокмозиты ZnO/rGO для фотоактивируемого детектирования NO_2 . **XXI Всероссийская конференция молодых ученых «Актуальные проблемы неорганической химии: синхротронные и нейтронные методы в химии современных материалов»**, сборник тезисов, с. 99-100, Красновидово, Россия, 2022

Получение термически и механически стабильных пористых плёнок анодного оксида алюминия в фосфористой кислоте

Витковский В.В.

Руководители: к.х.н., в.н.с. Напольский К.С., инж.-иссл. Сотничук Е.О.

Пористые плёнки анодного оксида алюминия (АОА) обладают уникальной сотовидной структурой, обуславливающей их применение в различных областях науки и техники. Перспективным направлением является использование АОА в качестве несущей основы для различных устройств и материалов, функционирующих при повышенных температурах: газовых сенсоров, катализаторов и твердооксидных топливных элементов. Для обеспечения долговременной стабильности характеристик несущей основы АОА необходимо проведение отжига, обеспечивающего кристаллизацию исходно аморфного материала стенок пористой плёнки с сохранением пористой структуры до температур выше 1300 °С. Минимизировать спекание пор при высоких температурах возможно при использовании крупнопористого АОА. Для формирования таких структур перспективным электролитом является фосфористая кислота (H_3PO_3).

Целью работы являлась разработка методики формирования пористых плёнок АОА в 1,0 М растворе фосфористой кислоты, а также исследование их термических и механических свойств. Для достижения данной цели необходимо изучить кинетику анодного окисления алюминия в данном электролите и подобрать оптимальные условия получения АОА, разработать методику синтеза однородной по толщине пористой структуры, составить программу термической обработки АОА, обеспечивающую сохранение пористой структуры, и исследовать механические характеристики АОА в зависимости от параметров пористой структуры и условий термической обработки.

Для получения пористых плёнок АОА использовали следующие реактивы: алюминиевая фольга (99,999%, толщина 100 и 500 мкм), фосфористая кислота (х.ч.), оксид хрома (VI) (х.ч.), фосфорная кислота (о.с.ч.), бром (ч.), метанол (ч.). Исследование кинетики анодного окисления алюминия в различных условиях проводили путём анализа хроноамперограмм, регистрируемых в ходе анодирования. Морфологию АОА изучали с помощью растровой электронной микроскопии, термическое поведение – методом синхронного термического анализа.

Анодное окисление алюминия в 1,0 М фосфористой кислоте изучали путём снятия стационарных полярограмм при напряжениях 100–180 В и температуре токосъёмника 0–8 °С. Кажущаяся энергия активации для процессов, происходящих на дне пор, составила 67 ± 1 кДж/моль. Наиболее однородная упорядоченная пористая структура формируется при напряжении 170 В и температуре 0 °С, при этом скорость роста АОА достигает ~ 11 мкм/ч, расстояние между центрами соседних пор составляет 409 ± 21 нм, а диаметр пор можно контролируемо изменять от 159 ± 10 нм до 343 ± 9 нм. Для получения однородной по толщине пористой структуры при высоких напряжениях предложен подход, включающий стадию создания барьерного слоя анодного оксида путём развёртки напряжения в более слабой кислоте (например, лимонной) перед вторым анодированием. Исходный АОА является рентгеноаморфным материалом. На основании данных термического анализа была предложена программа отжига, позволяющая закристаллизовать АОА в смесь γ -, θ - и δ -фаз Al_2O_3 ($T_{\text{max.}} = 950$ °С) и в α - Al_2O_3 ($T_{\text{max.}} = 1310$ °С). При этом пористая структура сохраняется. Предел прочности и модуль Юнга исходного АОА толщиной 100 мкм составляют 93 ± 30 МПа и 15 ± 4 ГПа соответственно. Увеличение толщины и пористости АОА, а также его термическая обработка, приводят к уменьшению численных значений механических характеристик.

Таким образом, анодное окисление алюминия в 1,0 М H_3PO_3 позволяет с высокой скоростью формировать термически и механически стабильные пористые структуры, пригодные для использования в качестве несущей основы для различных применений.

Публикации студента (<https://istina.msu.ru/profile/daifal/>):

1. Gordeeva E.O., Vitkovskii V.V., Roslyakov I.V., Kostyukov I.A., Napolskii K.S. *New insights into aluminium anodizing in phosphonic acid*. **Electrochimica Acta**, 2024, 502, p. 144818, DOI 10.1016/j.electacta.2024.144818.

2. Витковский В.В., Гордеева Е.О., Филиппов Я.Ю., Росляков И.В., Напольский К.С. *Получение термически и механически стабильных пористых плёнок анодного оксида алюминия в фосфористой кислоте*. **XXIII Всероссийская школа-конференция молодых учёных «Актуальные проблемы неорганической химии: химия и экология»**, сборник тезисов, Красновидово, Россия, 2024

3. Витковский В.В., Гордеева Е.О., Филиппов Я.Ю., Росляков И.В., Напольский К.С. *Механические свойства пористых пленок анодного оксида алюминия, полученных в фосфористой кислоте*. **XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии**, сборник тезисов, «Сириус», Россия, 2024

4. Витковский В.В., Гордеева Е.О., Росляков И.В., Напольский К.С. *Механическая и термическая устойчивость пористых пленок анодного оксида алюминия, формируемых в электролите на основе фосфористой кислоты*. **Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2024»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2024

5. Витковский В.В., Гордеева Е.О., Росляков И.В., Напольский К.С. *Получение термически стабильных пористых пленок путем анодирования алюминия в 1 М H_3PO_3* . **XIV Конференция молодых ученых по общей и неорганической химии**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2024

6. Витковский В.В., Гордеева Е.О., Росляков И.В., Напольский К.С. *Получение термически стабильной пористой несущей основы путем анодного окисления алюминия в фосфористой кислоте*. **XXII Всероссийская конференция «Актуальные проблемы неорганической химии: энергия+»**, сборник тезисов, Красновидово, Россия, 2023

7. Витковский В.В., Гордеева Е.О., Росляков И.В., Напольский К.С. *Получение термостойких пористых пленок анодного оксида алюминия в электролите на основе фосфористой кислоты*. **XIII Конференция молодых ученых по общей и неорганической химии**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2023

8. Витковский В.В., Гордеева Е.О., Росляков И.В., Напольский К.С. *Синтез термостойких пористых пленок анодного оксида алюминия*. **Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2023»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2023

Синтез новых селенитов 3d-металлов (Mn, Ni, Cu) с низкоразмерными мотивами магнитной подсистемы

Астахов Н.В.

Руководитель: к.х.н., доц. Бердонос П.С.

В настоящее время среди исследований материалов, обладающих экзотическими свойствами, особое место занимают вещества обладающие низкоразмерным магнетизмом. Такие соединения обладают не только фундаментальной привлекательностью из-за схожести их физики с поведением сверххолодных газов и сверхпроводников, но и предполагают практическое использование в области квантовых компьютеров и для производства материалов, например, с управляемым теплопереносом. Перспективным является не просто хаотичный перебор, а направленный синтез фаз, обладающих низкоразмерным магнетизмом. В данном исследовании к рассмотрению было выбрано несколько семейств соединений сложных селенит-хлоридов $M_2M'(SeO_3)_2Cl_2$, $MM'_2(SeO_3)_3 \cdot 3H_2O$, $M_5M'(SeO_3)_4Cl_4$ (M -ЩЗМ, M' =3d-металл). Перспективным является также замена ЩЗМ на Pb из-за близкого ионного радиуса катионов Sr^{2+} и Pb^{2+} . Отдельно рассматривается поиск новых фаз имеющих структурный фрагмент $M'(HSeO_3)Cl \cdot 2H_2O$ (M' =Cu, Co) и одновременно содержащие катионы ЩЗ металла. Селенитная группа обладает неподеленной, стереохимически активной парой электронов, способствующей образованию «рыхлых» структур, имеющих каналы, полости или слои. Хлорид-ионы, проявляющие небольшие координационные числа в соединениях, водородные связи и молекулы кристаллизационной воды дополнительно способствуют формированию таких систем.

Проблематика данного направления заключается в том, что до сих пор не разработана единая теория, описывающая закономерности в зависимости «состав – структура - свойство», так как отсутствует достаточная база данных. Целью данной работы является синтез и установление магнитных свойств ранее неизвестных фаз: $Sr_2Mn(SeO_3)_2Cl_2$, $BaNi_2(SeO_3)_3 \cdot 3H_2O$, $SrCu(HSeO_3)_2Cl_2 \cdot 6H_2O$, $Pb_5Cu(SeO_3)_4Cl_4$, $Sr_5Cu(SeO_3)_4Cl_4$.

Для получения образцов использовали различные варианты твердофазного спекания, гидротермального синтеза и химического транспорта с применением прекурсоров и других необходимых исходных веществ. Фазовую чистоту образцов тестировали методом РФА. Образцы изучали комплексом физических методов, преимущество отдавалось исследованию температурной зависимости магнитной восприимчивости и теплоемкости.

Важнейшие выводы работы:

Синтезированы новые фазы – $BaNi_2(SeO_3)_3 \cdot 3H_2O$, $Sr_2Mn(SeO_3)_2Cl_2$, $SrCu(HSeO_3)_2Cl_2 \cdot 6H_2O$. Показано, что $BaNi_2(SeO_3)_3 \cdot 3H_2O$ принадлежит к структурному типу минерала земаннита, $Sr_2Mn(SeO_3)_2Cl_2$ изоструктурен другим фазам состава $Sr_2M'(SeO_3)_2Cl_2$, а новое соединение $SrCu(HSeO_3)_2Cl_2 \cdot 6H_2O$ не имеет структурных аналогов. Фазы $Pb_5Cu(SeO_3)_4Cl_4$ и $Sr_5Cu(SeO_3)_4Cl_4$ оказались производными от структуры минерала саррабусита, однако, их структуры отличаются.

В ходе работы было показано, что новые фазы $BaNi_2(SeO_3)_3 \cdot 3H_2O$, $Sr_2Mn(SeO_3)_2Cl_2$ и $SrCu(HSeO_3)_2Cl_2 \cdot 6H_2O$ проявляют поведение характерное для низкоразмерных магнитных систем. Прделанная работа действительно дополняет имеющиеся знания в данной области и способствует развитию представлений о низкоразмерных магнитных фазах, и выбранная группа смешаннокатионных селенитов обладает богатой кристаллохимией и перспективно для поиска магнитных подсистем пониженной размерности.

Публикации студента (https://istina.msu.ru/profile/Astakhov_Nikita/):

1. Астахов Н.В., Бердонос П.С. Многообразие топологий магнитной подсистемы на примере смешаннокатионных селенитов: $BaNi_2(SeO_3)_3 \cdot 3H_2O$, $Sr_2Mn(SeO_3)_2Cl_2$, $SrCu(HSeO_3)_2Cl_2 \cdot 6H_2O$. **Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2025»**, электронный ресурс, Москва, Россия, 2025

2. Астахов Н.В., Шванская Л.В., Бердоносков П.С. *Новый синтетический аналог минерала земаннита, $BaNi_2(SeO_3)_3 \cdot 3H_2O$: синтез, кристаллохимия и изучение магнитных свойств. Конференция «Минералы и минералоподобные соединения: кристаллохимия и перспективы применения», посвященная 270-летию МГУ имени М.В. Ломоносова и 75-летию кафедры кристаллографии и кристаллохимии Геологического факультета МГУ, сборник тезисов, с. 19-20, Москва, Россия, 2024*
3. Астахов Н.В., Бердоносков П.С. Нуль- и одномерный магнетизм на примере фаз $BaNi_2(SeO_3)_3 \cdot 3H_2O$, $A_2B(SeO_3)_2Cl_2$ ($A = Sr, Ba, Pb$, $B = Mn, Co, Cu$). XXIII Всероссийская школа-конференция молодых учёных «Актуальные проблемы неорганической химии: химия и экология», сборник тезисов, с. 218-219, Красновидово, Россия, 2024
4. Астахов Н.В., Бердоносков П.С. Сложные селенит-хлориды состава $A_2B(SeO_3)_2Cl_2$ и $A_5B(SeO_3)_4Cl_4$: поиск и изучение физических свойств. XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, сборник тезисов, 1, с. 79, «Сириус», Россия, 2024
5. Astakhov N.V., Berdonosov P.S. Mixed cation selenite chlorides with composition $A_2B(SeO_3)_2Cl_2$ and $A_5B(SeO_3)_4Cl_4$: search and study of physical properties. XXII Mendeleev congress on general and applied chemistry, book of abstracts, 1, p. 82, «Sirius», Russia, 2024
6. Astakhov N.V., Berdonosov P.S. Synthesis and investigation of the properties of new phases $A_2B(SeO_3)_2Cl_2$ and $A_5B(SeO_3)_4Cl_4$. XIII International conference on chemistry for young scientists «Mendeleev 2024», book of abstracts, p. 696, St Petersburg, Russia, 2024
7. Астахов Н.В., Бердоносков П.С., Моськин А.В., Козлякова Е.С. Квазиодномерные магнетики на примере кронкитоподобных структур $A_2B(SeO_3)_2Cl_2$. Всероссийская конференция с международным участием «Электронные, спиновые и квантовые процессы в молекулярных и кристаллических системах», сборник тезисов, с. 56, Уфа, Россия, 2024
8. Астахов Н.В., Бердоносков П.С. Новые смешаннокатионные селенит-хлориды: поиск и синтез. XXVII всероссийская конференция молодых учёных-химиков (с международным участием), сборник тезисов, с. 356, Нижний Новгород, Россия, 2024
9. Астахов Н.В., Бердоносков П.С. Селенит-хлориды состава $M_2M'(SeO_3)_2Cl_2$: поиск, синтез и исследование свойств. Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2024», электронный ресурс, Москва, Россия, 2024
10. Астахов Н.В., Бердоносков П.С. Новые синтетические аналоги природного минерала саррабусита. XXII Всероссийская конференция «Актуальные проблемы неорганической химии: энергия+», сборник тезисов, с. 218-219, Красновидово, Россия, 2023
11. Астахов Н.В., Бердоносков П.С., Козлякова Е.С. Новые селенит-хлориды состава $M_2D(SeO_3)_2Cl_2$ ($M = \text{ЦЗМ}$, $D = 3d\text{-металл}$) с возможным низкоразмерным магнетизмом. XIII конференция молодых ученых по общей и неорганической химии, сборник тезисов, с. 80, Москва, Россия, 2023
12. Астахов Н.В., Бердоносков П.С., Козлякова Е.С. Новые селенит-хлориды состава $M_2D(SeO_3)_2Cl_2$ ($M = \text{цзм}$, $D = 3d\text{ металл}$) как возможные низкоразмерные магнетики. XXXIII менделеевская школа-конференция молодых ученых, сборник тезисов, с. 36, Иваново, Россия, 2023
13. Астахов Н.В., Бердоносков П.С., Козлякова Е.С. Сложные селенит-хлориды состава $M_2D(SeO_3)_2Cl_2$: поиск и изучение физических свойств. Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2023», электронный ресурс, Москва, Россия, 2023
14. Астахов Н.В., Моськин А.В., Козлякова Е.С., Бердоносков П.С. Новый селенит-хлорид стронция марганца $Sr_2Mn(SeO_3)_2Cl_2$: синтез и магнитные свойства. XXI Всероссийская конференция молодых ученых «Актуальные проблемы неорганической химии: синхротронные и нейтронные методы в химии современных материалов», сборник тезисов, с. 188-189, Красновидово, Россия, 2022
15. Астахов Н.В., Бердоносков П.С. Поиск и синтез нового селенит хлорида $Sr_2Mn(SeO_3)_2Cl_2$. Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2022», электронный ресурс, Москва, Россия, 2022

16. Астахов Н.В., Моськин А.В., Козлякова Е.С., Бердоносков П.С. *Синтез и исследование магнитных свойств $Sr_2Co(SeO_3)_2Cl_2$. II Школа-конференция студентов бакалавриата «Современные функциональные материалы и наноматериалы», сборник тезисов, с. 11-12, Дубна, Россия, 2022*

Аэрогели на основе германатов аммония и оксида германия (IV): синтез, допирование и люминесценция

Хвощевская Д.А.

Руководители: к.х.н., н.с. Веселова В.О., к.х.н., с.н.с. Евдокимов П.В.

Оксид германия является самоактивированным люминофором, а также служит отличной матрицей для легирования, что позволяет получать на его основе люминофоры с диапазоном высвечивания от УФ-синего до ближнего ИК диапазона. Люминесцентные свойства нано- GeO_2 изучены мало, но вызывают большой интерес, так как ранее на примере некоторых других люминофоров было установлено, что переход к нано-размеру может привести к существенному изменению характеристик люминесценции, например, к изменению длительности высвечивания. Подходы к получению нанодисперсного оксида германия на данный момент развиты мало, как правило в качестве прекурсоров используют дорогостоящие и нестабильные алкоксиды германия, а синтез проводят в неводной среде.

Целью данной работы является разработка методики получения GeO_2 -аэрогелей с использованием германата аммония в качестве прекурсора, выявление зависимости характеристик продукта от параметров синтеза, разработка методики получения аэрогелей $GeO_2:REE^{3+}$ путем пропитки лиогелей раствором соли иона допанта на этапе замены растворителя, а также разработка методики получения аэрогелей путем сушки при атмосферном давлении (СПАД).

Для получения аэрогелей на основе GeO_2 было предложено проводить гелеобразование в системе $GeO_2-NH_3-H_2O$. В ходе данной работы разработан синтетический подход к получению монолитных аэрогелей $(NH_4)_3H(Ge_7O_{16})(H_2O)_x$, $(NH_4)_2Ge_7O_{15}$ и GeO_2 . $S_{ВЕТ}$ образцов составила 210, 420 и 40 m^2/g соответственно, объемная пористость достигала 96%. Впервые сообщается о получении аэрогелей с германатной цеолитоподобной структурой и описаны люминесцентные свойства $(NH_4)_3H(Ge_7O_{16})(H_2O)_x$ и $(NH_4)_2Ge_7O_{15}$. Показана зависимость характеристик люминесценции всех полученных аэрогелей от длины волны возбуждения: образцы способны проявлять голубую, желто-зеленую и красную люминесценцию.

Исследована возможность более экономичного получения GeO_2 -аэрогелей методом СПАД. Модификация поверхности осуществляется путем замачивания гелей в растворе силилирующего агента. Тип и концентрация модификатора оптимизированы для достижения наибольшей $S_{ВЕТ}$ (140 m^2/g). Описано влияние модификации поверхности на фазовый состав, термическую стабильность и размер частиц аэрогелей.

Предложена простая в исполнении и не требующая дополнительных дорогостоящих реагентов методика получения легированных GeO_2 -аэрогелей путем пропитки аквагелей раствором соли РЗЭ в ДМСО. Были определены оптимальные условия синтеза (концентрация GeO_2 в лиогеле, концентрация пропиточного раствора и длительность пропитки), позволяющие достичь равномерного распределения иона-допанта в матрице. Данная методика позволяет вводить различные ионы, например, были успешно получены образцы, допированные ионами Pr^{3+} , Eu^{3+} , Nd^{3+} , Tb^{3+} . Для аэрогелей $GeO_2:Pr^{3+}$ установлено влияние концентрации иона-допанта и температуры отжига на люминесцентные характеристики GeO_2 -аэрогелей при возбуждении излучением с $\lambda_{ex} = 240, 255$ и 390 нм. Показано, что легирование празеодимом приводит к

увеличению интенсивности зеленой люминесценции GeO_2 -аэрогелей, кроме того, наблюдается появление слабо интенсивной полосы, характерной для ионов празеодима в германатных матрицах.

Таким образом, была разработана методика получения аэрогелей различных составов, в том числе допированных ионами РЗЭ с высокими удельными поверхностями, разработана методика, позволяющая проводить сушку гелей при атмосферном давлении с сохранением высокой удельной поверхности и изучены люминесцентные свойства этих материалов.

Публикации студентки (https://istina.msu.ru/profile/daria_khvoshchevskaya/):

1. Хвощевская Д.А., Веселова В.О., Голодухина С.В., Котцов С.Ю., Сон А.Г., Гайтко О.М. *Синтез GeO_2 -аэрогелей, легированных празеодимом, методом пропитки. Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика*, 2024, 19, 2, с. 44-58, DOI 10.34984/SCFTP.2023.19.2.004
2. Veselova V.O., Kottsov S.Yu., Golodukhina S.V., Khvoshchevskaya D.A., Gajtko O.M. *Hydrophilic and Hydrophobic: Modified GeO_2 Aerogels by Ambient Pressure Drying. Nanomaterials*, 2024, 14, 18, p. 1511-1523, DOI 10.3390/nano14181511
3. Veselova V.O., Khvoshchevskaya D.A., Golodukhina S.V., Kottsov S.Yu., Gajtko O.M. *One simple approach to novel germania and germanate aerogels. Microporous and Mesoporous Materials*, 2024, 379, DOI 10.1016/j.micromeso.2024.113282
4. Гайтко О.М., Веселова В.О., Хвощевская Д.А., Котцов С.Ю. *Способ получения аэрогеля на основе аморфного диоксида германия. Патент РФ № 2796091*, 16.05.2023
5. Хвощевская Д.А., Веселова В.О. *Аэрогели $(\text{NH}_4)_3\text{H}(\text{Ge}_7\text{O}_{16})(\text{H}_2\text{O})_x$ и GeO_2 : синтез, термическое поведение, допирование и люминесценция. XV Конференция молодых учёных по общей и неорганической химии*, сборник тезисов, с. 220, Москва, Россия, 2025
6. Хвощевская Д.А., Веселова В.О. *Аэрогели $(\text{NH}_4)_3\text{H}(\text{Ge}_7\text{O}_{16})(\text{H}_2\text{O})_x$: термическая стабильность, допирование и люминесценция. Всероссийская молодежная научная конференция с международным участием «Функциональные материалы: Синтез. Свойства. Применение» YOUNG ISC 2024*, сборник тезисов, с. 156-158, Санкт-Петербург, Россия, 2024
7. Хвощевская Д.А., Веселова В.О. *$(\text{NH}_4)_3\text{H}(\text{Ge}_7\text{O}_{16})(\text{H}_2\text{O})_x$ - прекурсор для аэрогелей GeO_2 и $\text{GeO}_2:\text{PZ}^{3+}$. Всероссийская конференция с международным участием: XXXIV Менделеевская школа-конференция молодых учёных*, сборник тезисов, с. 25, Казань, Россия, 2024
8. Хвощевская Д.А., Веселова В.О. *Аэрогели $\text{GeO}_2:\text{Pr}^{3+}$ для люминесцентных применений. XXII Всероссийская конференция «Актуальные проблемы неорганической химии: энергия+»*, сборник тезисов, с. 160, Красновидово, Россия, 2023
9. Хвощевская Д.А., Веселова В.О. *Модификация поверхности GeO_2 -гелей для проведения сушки при атмосферном давлении. Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов»*, сборник тезисов, с. 295-297, Москва, Россия, 2023
10. Хвощевская Д.А., Веселова В.О. *Получение аэрогелей $\text{GeO}_2:\text{Pr}^{3+}$. XXX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023»*, сборник тезисов, с. 1131, Москва, Россия, 2023
11. Хвощевская Д.А., Веселова В.О. *Синтез GeO_2 -аэрогеля, легированного ионами РЗЭ. XIII Конференция молодых ученых по общей и неорганической химии*, сборник тезисов, с. 348, Москва, Россия, 2023
12. Хвощевская Д.А., Веселова В.О. *$(\text{NH}_4)_3\text{H}(\text{Ge}_7\text{O}_{16})(\text{H}_2\text{O})_{2,72}$ как прекурсор для монолитных GeO_2 -аэрогелей. XXIX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2022»*, сборник тезисов, с. 895, Москва, Россия, 2022
13. Хвощевская Д.А., Веселова В.О. *Получение монолитных аэрогелей на основе оксида германия с использованием эпоксид-индуцированного золь-гель процесса. XII Конференция молодых ученых по общей и неорганической химии*, сборник тезисов, с. 224, Москва, Россия, 2022

Трёхкомпонентные медиаторные биосенсоры на основе оксидаз для анализа биологических жидкостей

Соловьёв И.Д.

Руководители: к.х.н., с.н.с. Никитина В.Н., д.х.н., проф. Карякин А.А.

Электрохимические биосенсоры широко применяются в медицинской диагностике для определения содержания метаболитов в биологических жидкостях. Лактатные и глюкозные тест-полоски позволяют проводить экспрессный внелабораторный анализ цельной крови без пробоподготовки.

Цель работы: разработка лактатных и глюкозных биосенсоров на основе совместной иммобилизации медиатора и фермента в полиэлектrolитной матрице (хитозан) для анализа цельной крови. Для достижения этой цели необходимо 1) создать коллоидно-устойчивые трехкомпонентные мембранообразующие смеси, пригодные для одностадийной капельной модификации планарных печатных электродов; 2) изучить диффузионную подвижность медиаторов в зависимости от состава мембраны; 3) изготовить тест-полоски на основе разработанных смесей и исследовать их аналитические характеристики; 4) оптимизировать соотношение компонентов смеси для достижения оптимальных характеристик; 5) изучить стабильность тест-полосок при хранении; 6) проверить применимость для анализа цельной крови.

Хитозан является биосовместимым и водорастворимым полимером, являющимся подходящей матрицей для иммобилизации ферментов, поэтому он был выбран в качестве полиэлектrolита. Диффузионная подвижность медиаторов оценена электрохимически с помощью константы скорости высвобождения медиатора из мембраны. Получена зависимость между скоростью высвобождения медиатора и аналитическими характеристиками тест-полосок. Показано, что скорость высвобождения зависит от плотности мембраны и зарядов полиэлектrolита и медиатора, что позволяет регулировать аналитические характеристики сенсора путем изменения содержания хитозана в мембранообразующей смеси. Полученные глюкозные биосенсоры демонстрируют высокую чувствительность от 10 до 37 $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{M}^{-1}$ и широкий линейный диапазон отклика, от 1 до 30-50 мМ, что соответствует требованиям, предъявляемым к тест-полоскам для анализа цельной крови. Также показано, что чувствительность тест-полосок на основе трехкомпонентных мембранообразующих смесей сохраняется на 64-81% в матрице цельной крови, что значительно превышает показатель для коммерческих образцов (34%). Таким образом, предложенный способ одностадийной капельной модификации перспективен для коммерческого применения.

Универсальность способа изготовления тест-полосок путем одностадийной капельной модификации печатных электродов подтверждена на примере другого фермента: лактатоксидазы (ЛОД). Оптимизированный состав мембранообразующей смеси (хитозан, $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, ЛОД) обеспечивает рабочий диапазон биосенсоров (1-20 мМ), покрывающий диапазон концентраций лактата в цельной крови (1-4 мМ). Кроме того, высокая чувствительность ($67 \text{ mA} \cdot \text{M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$), сохраняется на 91% в матрице цельной крови по сравнению с модельными растворами, а линейный диапазон не изменяется. Кроме того, использование комплексов железа и рутения, соиммобилизованных с ферментами в хитозановой мембране, обеспечивает высокую стабильность глюкозных и лактатных тест-полосок: при хранении при комнатной температуре более месяца и при термическом воздействии (60 °C) более 3 часов.

Таким образом, предложенный способ изготовления тест-полосок на основе трехкомпонентных мембранообразующих смесей демонстрирует высокую эффективность и универсальность, обеспечивая стабильность и необходимые аналитические характеристики биосенсоров для анализа цельной крови.

Публикации студента (<https://istina.msu.ru/profile/SolovyevID/>):

1. Nikitina V.N, Daboss E.D., Vokhmyanina D.V., Solovyev I.D., Andreev E.A., Komkova M.A., Karyakin A.A. *The widest linear range of glucose test strips based on various mediators and membranes for whole blood analysis. Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2023, 938, DOI 10.1016/j.jelechem.2023.117445
2. Nikitina V.N., Solovyev I.D., Karyakin A.A. *Electrochemistry of freely diffusing mediators in polyelectrolyte membranes used for blood glucose test strips with a high upper limit of the linear range. Engineering Proceedings*, 2023, 35, p. 19, DOI 10.3390/iecb2023-14603
3. Соловьёв И.Д., Никитина В.Н., Карякин А.А. *Трёхкомпонентные медиаторные биосенсоры на основе оксидаз для анализа биологических жидкостей. XXXII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2025», сборник тезисов, Москва, Россия, 2025*
4. Соловьёв И.Д., Никитина В.Н., Карякин А.А. *Влияние состава мембранообразующей смеси на аналитические характеристики электрохимических тест-полосок при определении глюкозы в крови. XI Всероссийская конференция по электрохимическим методам анализа «ЭМА-2024», сборник тезисов, с. 92, Екатеринбург, Россия, 2024*
5. Соловьёв И.Д., Никитина В.Н. *Изучение аналитических характеристик глюкозных тест-полосок в зависимости от состава мембранообразующей смеси. XXXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2024», сборник тезисов, с. 96, Москва, Россия, 2024*
6. Соловьёв И.Д., Никитина В.Н. *Электрохимические тест-полоски для анализа глюкозы на основе трехкомпонентных мембранообразующих смесей. 13-я Международная научная конференция «Биокатализ. Фундаментальные Исследования и Применения» (БИОКАТАЛИЗ - 2023), сборник тезисов, с. 215, Суздаль, Россия, 2023*
7. Соловьёв И.Д., Никитина В.Н. *Электрохимические тест-полоски для анализа глюкозы на основе трехкомпонентных мембранообразующих смесей. XXX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2023», сборник тезисов, с. 75, Москва, Россия, 2023*

Электрохимические сенсоры на основе мембраны из оксида графена для экспресс-анализа выдыхаемого аэрозоля

Дубов Л.А.

Руководители: к.х.н., с.н.с. Комкова М.А., д.х.н., проф. Карякин А.А.

Разработка неинвазивных систем диагностики и мониторинга заболеваний является перспективным направлением современной медицины. Одним из важнейших объектов неинвазивной диагностики является конденсат выдыхаемого воздуха (КВВ). В КВВ содержатся как маркеры воспалительных процессов в дыхательных путях, так и ряд метаболитов, относительное изменение концентрации которых коррелирует с таковым в крови. В клинической практике при отборе КВВ используются громоздкие установки, охлаждающие выдыхаемый аэрозоль до -15°C , что приводит к его существенному разбавлению сконденсированным водяным паром.

Целью данной работы является разработка сенсорной системы экспресс-анализа аэрозоля в момент выдоха без дополнительного охлаждения. В качестве основы разработанной системы использованы электрохимические (био)сенсоры на основе берлинской лазури (БЛ) как наиболее селективные и чувствительные в своем классе.

Для конденсации выдыхаемого аэрозоля поверхность сенсора модифицировали слоем твердого гигроскопичного электролита и мембраной на основе аминированного оксида графена (ОГ). В условиях влажного воздуха ОГ обеспечивает улавливание и аккумуляцию аэрозоля за счет эффекта капиллярной конденсации, а твердый электролит – проводимость второго рода между электродами. Согласно данным циклической вольтамперометрии, при оптимальном составе конденсирующего слоя максимальная электроактивность БЛ достигается в течение 5 секунд пропускания аэрозоля, при этом расстояние между катодными и анодными пиками снижается с 0.3–0.4 В до <100 мВ.

Линейный диапазон определяемых с помощью разработанной электрохимической платформы содержаний H_2O_2 в модельных аэрозолях охватывает концентрации от 0.5 до 20 мкМ. При этом отклик практически не зависит от скорости потока аэрозоля через систему в диапазоне значений, которые могут создаваться в момент выдоха ($>80 \text{ мл} \cdot \text{с}^{-1}$). Такие характеристики позволяют детектировать физиологические концентрации H_2O_2 в выдохе. Генерируемый в момент выдоха отклик линейно зависит от концентрации H_2O_2 в сконденсированном без дополнительного охлаждения аэрозоле, определяемой спектрофотометрически с использованием пероксидазы. Установлено, что средняя концентрация H_2O_2 в выдохе курящих добровольцев статистически выше (на 40%).

Аналогично для детекции лактата в выдыхаемом аэрозоле адаптированы биосенсоры на основе БЛ и лактатоксидазы. Концентрация лактата в выдыхаемом аэрозоле до 100 раз выше, чем концентрация пероксида водорода, что делает возможным его определение в присутствии H_2O_2 . Продemonстрировано, что отклик биосенсора линейно зависит от концентрации лактата в выдыхаемом аэрозоле, определяемом независимым методом (проточно-инжекционной амперометрии разбавленного образца или кинетическим методом).

Таким образом, разработанная сенсорная система потенциально применима для неинвазивного экспресс-мониторинга воспалительных процессов в легких и состояний гипоксии.

Публикации студента (<https://istina.msu.ru/profile/Leonid+Dubov/>):

1. Вельянинова К.А., Дубов Л.А., Комкова М.А. *Электрокатализаторы восстановления H_2O_2 на основе оксида графена, интеркалированного ионами железа*. XXXII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2025», Москва, Россия, 2025

2. Казакова К.А., Дубов Л.А., Комкова М.А. *Наноструктуры электрокатализаторов восстановления H_2O_2 на основе берлинской лазури с управляемой микропористостью*. XXIII Всероссийская конференция молодых ученых «Актуальные проблемы неорганической химии: химия и экология», Красновидово, Россия, 2024

3. Dubov L.A., Karyakin A.A., Komkova M.A. *Electroanalytical system for direct H_2O_2 detection in exhaled aerosol*. XIII International Conference on Chemistry for Young Scientists «Mendeleev 2024», Санкт-Петербург, Россия, 2024

4. Дубов Л.А., Комкова М.А., Карякин А.А. *Электроанализатор H_2O_2 в выдыхаемом аэрозоле для неинвазивной диагностики пульмонологических заболеваний*. XXXIV Менделеевская школа-конференция молодых учёных, Казань, Россия, 2024

5. Казакова К.А., Дубов Л.А., Комкова М.А. *Электрокатализаторы восстановления H_2O_2 на основе берлинской лазури, синтезированной каталитически в присутствии органических гидропероксидов*. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2024», Москва, Россия, 2024

6. Дубов Л.А., Комкова М.А., Карякин А.А. *Сенсорная система для экспресс-детекции H_2O_2 в выдыхаемом аэрозоле*. XXII Всероссийская конференция молодых ученых «Актуальные проблемы неорганической химии: энергия+», Красновидово, Россия, 2023

7. Дубов Л.А., Комкова М.А., Карякин А.А. *Сенсорная система на основе электродов, объединенных слоем оксида графена, для неинвазивной экспресс-детекции H_2O_2 в выдыхаемом аэрозоле*. 13-я Международная научная конференция «Биокатализ. Фундаментальные исследования и применения», Суздаль, Россия, 2023

8. Дубов Л.А., Комкова М.А., Карякин А.А. *Высокоэффективные (био)сенсоры на основе электродов, объединенных слоем оксида графена, для неинвазивной экспресс-детекции метаболитов в выдыхаемом аэрозоле. XXX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023»*, Москва, Россия, 2023

9. Дубов Л.А., Комкова М.А., Карякин А.А. *Гальванические сенсоры на основе электродов, объединенных мембраной оксида графена, для анализа выдыхаемого аэрозоля. XXIX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2022»*, Москва, Россия, 2022

Биорезорбируемые остеокондуктивные керамические материалы на основе системы $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2\text{--Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ для регенерации костной ткани

Рассолова Ю.Р.

Руководители: к.х.н., доц. Филиппов Я.Ю., инж. Мурашко А.М.

В современной регенеративной медицине актуальными являются исследования по разработке биорезорбируемых (рассасывающихся) керамических материалов, обладающих остеокондуктивными и остеоиндуктивными свойствами. Биоматериалы на основе фосфатов магния могут быть рассмотрены в качестве альтернативы традиционно применяемым фосфатам кальция, благодаря способности к растворению *in vitro* и *in vivo* со скоростью, сопоставимой с образованием новой костной ткани организма, а также за счет непосредственного участия магния в костном метаболизме. В литературных источниках отсутствует информация, связанная с изучением физико-химических основ формирования биокерамики с индивидуальной формой и архитектурой порового пространства, в которой магний присутствует в виде единственного катиона.

Целью данной работы стала разработка биорезорбируемых остеокондуктивных керамических материалов на основе системы $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2\text{--Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ для медицинского применения. Для достижения поставленной цели необходимо подобрать оптимальный метод получения порошковых прекурсоров, провести изучение процессов уплотнения прессовок в различных режимах термообработки с дальнейшим исследованием микроструктуры, плотности и механических характеристик материалов, осуществить подбор параметров стереолитографической 3D-печати из фоточувствительных суспензий на основе фосфатов магния, а также провести *in vitro* исследования полученной керамики.

Порошковые прекурсоры фосфатов магния были получены методом пиролиза аэрозоля, с формированием субмикронных сферических частиц, с помощью золь-гель синтеза, приводящего к образованию агломератов из частиц размером порядка 10 мкм, а также твердофазным методом, характеризующимся более грубой морфологией. Термообработка составов после пиролиза при 700 °С приводит к разложению остаточных нитратов и удалению влаги в виде газообразных продуктов с сохранением размера частиц.

Метод пиролиза аэрозоля позволяет получать керамику с наибольшей плотностью во всем диапазоне составов. Наиболее эффективно процесс спекания протекает для образцов на основе эвтектической смеси ($3\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2/2\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$), что позволяет получать плотные (до 95 %) керамические материалы с наименьшим размером кристаллитов. Спекание ортофосфата магния сопровождается растрескиванием за счет неконтролируемого роста кристаллитов, что

возможно предотвратить при увеличении скорости нагрева и уменьшении времени выдержки. Для образцов на основе пирофосфата магния процессы уплотнения протекают хуже всего, однако использование более высоких температур обжига (от 1200 °С) или введение добавки ортофосфата магния приводит к значительному повышению плотности итоговой керамики. Исследованы фоточувствительные характеристики суспензий для 3D-печати, а также выбран режим термообработки напечатанных структур, позволяющий избежать растрескивания индивидуальных слоев после печати. По результатам *in vitro* тестов было показано отсутствие цитотоксичности керамических материалов, полученных с использованием метода пиролиза аэрозоля. Исследуемая керамика поддерживает адгезию и пролиферацию стволовых клеток на поверхности.

Таким образом, наиболее перспективным методом синтеза порошковых прекурсоров оказался метод пиролиза аэрозоля, который способствует получению плотной и прочной керамики, перспективной для дальнейшего применения в качестве имплантатов для регенерации костной ткани.

Публикации студентки (<https://istina.msu.ru/profile/RassolovaYR/>):

1. Рассолова Ю.Р., Мурашко А.М., Исаева В.Е., Климашина Е.С., Филиппов Я.Ю., Путляев В.И. *Остеокондуктивная керамика на основе системы $Mg_3(PO_4)_2$ – $Mg_2P_2O_7$ для остеопластики*. **XV Конференция молодых ученых по общей и неорганической химии**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2025

2. Рассолова Ю.Р., Мурашко А.М., Исаева В.Е., Климашина Е.С., Филиппов Я.Ю., Путляев В.И. *Биорезорбируемые остеокондуктивные керамические материалы на основе системы $Mg_3(PO_4)_2$ – $Mg_2P_2O_7$ для регенерации костной ткани*. **Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2025»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2025

3. Исаева В.Е., Рассолова Ю.Р., Филиппов Я.Ю., Мурашко А.М., Климашина Е.С., Путляев В.И. *Биорезорбируемые материалы на основе фосфатов магния, полученные золь-гель методом*. **Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2025»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2025

4. Исаева В.Е., Рассолова Ю.Р., Филиппов Я.Ю., Мурашко А.М., Климашина Е.С., Путляев В.И. *Биокерамика на основе фосфатов магния, полученных золь-гель методом, для костно-тканевой инженерии*. **67-я Всероссийская научная конференция МФТИ – 2025**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2025

5. Рассолова Ю.Р., Мурашко А.М., Исаева В.Е., Климашина Е.С., Филиппов Я.Ю. *Биокерамические материалы на основе системы $Mg_3(PO_4)_2$ – $Mg_2P_2O_7$* . **XXIII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Актуальные проблемы неорганической химии: химия и экология»**, сборник тезисов, Красновидово, Россия, 2024

6. Рассолова Ю.Р., Мурашко А.М., Филиппов Я.Ю., Климашина Е.С. *Биорезорбируемая керамика на основе фосфатов магния, полученных методом пиролиза аэрозоля*. **XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии**, сборник тезисов, «Сириус», Россия, 2024

7. Климашина Е.С., Рассолова Ю.Р., Бирюков А.С., Преображенский И.И., Евдокимов П.В., Путляев В.И. *Новые материалы на основе фосфатов магния, изготовленные методом 3D-печати, для биомедицинских применений*. **XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии**, сборник тезисов, «Сириус», Россия, 2024

8. Евдокимов П.В., Леонтьев Н.В., Голубчиков Д.О., Мурашко А.М., Битанова В.А., Рассолова Ю.Р., Ларионов Д.С., Филиппов Я.Ю., Климашина Е.С., Капитанова О.О., Гаршев А.В., Путляев В.И. *Персонализированные структурно неоднородные остеоиндуктивные биокерамические имплантаты сложного состава и архитектуры на основе стабилизированных глазеритоподобных фаз*. **XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии**, сборник тезисов, «Сириус», Россия, 2024

9. Мурашко А.М., Рассолова Ю.Р., Филиппов Я.Ю. *Керамические материалы в системе $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{--Ca}_{2.5}\text{Na}(\text{PO}_4)_2$ для применения в тканевой инженерии*. **XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии**, сборник тезисов, «Сириус», Россия, 2024
10. Климашина Е.С., Пупанова А.К., Рассолова Ю.Р., Бирюков А.С., Преображенский И.И., Мурашко А.М., Филиппов Я.Ю., Путляев В.И. *3D-печать керамических материалов из фосфатов магния, синтезированных современными методами, со специальными биомедицинскими свойствами*. **XXIII международная научно-техническая конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов»**, сборник тезисов, Обнинск, Россия, 2024
11. Рассолова Ю.Р., Мурашко А.М., Филиппов Я.Ю., Климашина Е.С. *Биорезорбируемые материалы на основе фосфатов магния, полученных с помощью метода пиролиза аэрозоля*. **XXIII международная научно-техническая конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов»**, сборник тезисов, Обнинск, Россия, 2024
12. Рассолова Ю.Р., Мурашко А.М., Филиппов Я.Ю. *Синтез высокотемпературных резорбируемых фаз состава $\text{Ca}_{7-(a+b+c+d)}\text{Mg}_a\text{Sr}_b\text{Na}_c\text{K}_d(\text{PO}_4)_{2+c+d}(\text{SiO}_4)_{2-(c+d+e)}(\text{GeO}_4)_e$ методом пиролиза аэрозоля*. **Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2024»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2024
13. Рассолова Ю.Р., Мурашко А.М., Филиппов Я.Ю. *Реакционно-связанные материалы на основе замещенного октакальциевого фосфата*. **XXII Всероссийская школа-конференция молодых учёных «Актуальные проблемы неорганической химии: энергия +»**, сборник тезисов, Красновидово, Россия, 2023
14. Рассолова Ю.Р., Мурашко А.М., Филиппов Я.Ю. *Реакционно-связанные материалы на основе октакальциевого фосфата, полученные в ацетатном и сукцинатном буферном растворе*. **Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2023»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2023
15. Рассолова Ю.Р., Мурашко А.М., Филиппов Я.Ю. *Биорезорбируемые материалы на основе октакальциевого фосфата для регенерации костной ткани*. **XXIV Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке»**, сборник тезисов, Томск, Россия, 2023
16. Рассолова Ю.Р., Мурашко А.М., Филиппов Я.Ю. *Реакционно-связанные материалы на основе октакальциевого фосфата, полученные в различных буферных системах*. **XIII Конференция молодых ученых по общей и неорганической химии**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2023
17. Рассолова Ю.Р., Мурашко А.М., Филиппов Я.Ю. *Получение и испытание in-vitro реакционно-связанных материалов на основе ОКФ*. **V Международная научно-техническая конференция молодых ученых «Инновационные материалы и технологии – 2023»**, сборник тезисов, Минск, Беларусь, 2023
18. Рассолова Ю.Р., Мурашко А.М., Филиппов Я.Ю. *Реакционно-связанные материалы на основе октакальциевого фосфата для остеопластики*. **XXXIII Менделеевская школа-конференция молодых ученых**, сборник тезисов, Иваново, Россия, 2023
19. Рассолова Ю.Р., Мурашко А.М., Филиппов Я.Ю. *Биорезорбируемые реакционно-связанные материалы на основе октакальциевого фосфата*. **XXI Всероссийская конференция молодых ученых «Актуальные проблемы неорганической химии: синхротронные и нейтронные методы в химии современных материалов»**, сборник тезисов, Красновидово, Россия, 2022

Бифазная керамика гидроксиапатит/трикальций фосфат: синтез и свойства

Подлягин В.А.

Руководители: к.х.н., доц. Путляев В.И., асп. 1 г/о Голубчиков Д.О.

Перед современной регенеративной медициной стоит проблема создания оптимального материала для костных имплантов, обладающего рядом свойств, в частности, определенной механической прочностью для поддержания костного каркаса в процессе регенерации кости. Немаловажно также принимать во внимание биологическую активность материала, определяющую степень вовлечения материала в естественный процесс костного ремоделирования. Кроме того, важно учитывать скорость биodeградации материала в организме для поддержания баланса между резорбцией материала и формированием нативной кости. В частности, возможность регулирования скорости биорезорбции является важным шагом на пути к персонализированной медицине. Перспективным материалом в рамках данной концепции является бифазная керамика (БФК) на основе гидроксиапатита (ГАП) и трикальцийфосфата (ТКФ) за счёт различной скорости резорбции компонентов. Путем варьирования параметров проведения синтеза, например, pH-раствора ($pH = (7-10,5)$), температуры проведения синтеза ($T = (40-80^{\circ}C)$) и изначального соотношения кальция к фосфору ($Ca/P_{нач.} = (1,5 - 1,67)$), возможно получение порошковых прекурсоров керамики с различным Ca/P -соотношением, что позволит варьировать соотношение компонентов в системе ГАП-ТКФ и получить керамику с определенной растворимостью и механическими параметрами.

Таким образом, целью данной работы стало получение БФК состава ГАП/ТКФ с варьируемым соотношением компонентов, построение регрессионной модели зависимости Ca/P -соотношения от условий синтеза. Для достижения цели были сформулированы следующие задачи: 1. Синтез нестехиометрического гидроксиапатита с варьированием условий осаждения с дальнейшим обжигом для получения БФК, уточнение фазового соотношения в полученных порошках; 2. Определение механических и функциональных свойств БФК; 3. Проведение регрессионного анализ (РА), расчёт модели, описывающей зависимость фазового состава полученной керамики от условий синтеза; механических и функциональных свойств от фазового состава керамики.

Для достижения цели была проведена серия экспериментов с варьируемыми параметрами pH, T, $Ca/P_{нач.}$ для получения порошков нестехиометрического ГАПа путём синтеза методом соосаждения. Для проведения испытаний были получены образцы в виде таблеток путём прессования при давлении близком к пределу прессования с целью получения максимально плотных образцов. В дальнейшем образцы были подвергнуты высокотемпературному обжигу для получения БФК с дальнейшими механическими испытаниями.

По итогам построения регрессионной модели было выявлено, что все параметры синтеза, а именно, pH раствора, изначальное Ca/P -соотношение, температура проведения синтеза оказывают близкое по значению влияние при данных условиях эксперимента. Коэффициент детерминации для полиномиальной зависимости 93% означает успешный подбор модели. Для модели спекания, с варьируемыми переменными в качестве температуры спекания, времени спекания, фазового состава и изначальной плотности образца коэффициент составил 56%, что говорит о том, что существенные факторы не были учтены.

Исходя из результатов эксперимента можно сделать ряд выводов: РА зависимости фазового состава порошка от условий синтеза показал, что учтено достаточно количество параметров; в ходе РА процесса спекания и формования выявлено, что количество параметров, описывающих поведение системы недостаточно.

Публикации студента (<https://istina.msu.ru/profile/Rivender/>):

1. Golubchikov D.O., Safronova T.V., Podlyagin V.A., Shatalova T.B., Kolesnik I.V., Putlayev V.I. *Silicate-substituted hydroxyapatite bioceramics fabrication from the amorphous powder precursor obtained from the silicate-containing solutions*. **Mendeleev Communications**, 2024, 34, 6, p. 847–849, DOI 10.1016/j.mencom.2024.10.025
2. Подлягин В.А., Голубчиков Д.О., Путляев В.И. *Исследование зависимости фазового состава порошков в системе $MgO-CaO-P_2O_5$ от условий синтеза для получения фазы витлокита*. **XXII Всероссийская конференция молодых учёных «Актуальные проблемы неорганической химии: энергия +»**, сборник тезисов, с. 141-142, Красновидово, Россия, 2023
3. Подлягин В.А., Голубчиков Д.О., Путляев В.И. *Синтез частиц феррита кобальта для создания магнитоэлектрических элементов в костных имплантах*. **XX Всероссийская конференция молодых учёных «Актуальные проблемы неорганической химии: материалы с функционально активной поверхностью»**, сборник тезисов, с. 185-186, Красновидово, Россия, 2021

Производные лигнина как источник неграфитизируемого углерода для натрий-ионных аккумуляторов

Мотовило Т.А.

Руководители: к.х.н., н.с. Бобылёва З.В., асп. 2 г/о Лакиенко Г.П.

Натрий-ионные аккумуляторы (НИА) представляют собой надежную технологию для хранения чистой энергии и рассматриваются как перспективная альтернатива литий-ионным аккумуляторам. Среди различных анодных материалов для натрий-ионных аккумуляторов особое внимание в последнее время привлекает неграфитизируемый углерод, обладающий структурой с разупорядоченными графеноподобными слоями. Это связано с его возможностью получения из экономически доступных возобновляемых источников, таких как биомасса, образующаяся в качестве побочного продукта в процессе производства. Одним из таких источников является лигнин, который составляет 15-40% массы древесины, а также лигносульфонат натрия, получаемый в процессе сульфитной варки целлюлозы.

Однако, существенной проблемой при использовании неграфитизируемого углерода в НИА остаётся низкая кулоновская эффективность на первом цикле и удельная емкость, а также неясная взаимосвязь между этими характеристиками и методом синтеза, а также исходным веществом. Основной целью данной работы является получение и исследование углеродных анодных материалов на основе производных лигнина для натрий-ионных аккумуляторов, а также установление зависимостей электрохимических характеристик и микроструктурных особенностей от выбора прекурсора и способа синтеза.

В качестве исходных материалов были использованы биополимеры со сходной структурой, но различными функциональными группами: коммерческий лигносульфонат натрия, полученный от разных производителей, и крафт-лигнин. Неграфитизируемый углерод получен при перерастворении исходного вещества и последующем отжиге в инертной атмосфере при 1300°C. Для улучшения электрохимических характеристик были испробованы различные подходы, направленные на изменение морфологии и пористости. Для первого случая подходит гидротермальный синтез, для второго – дополнительная предобработка на

воздухе. Образцы были проанализированы с помощью методов низкотемпературной адсорбции N_2 и CO_2 , гальваностатического циклирования, растровой электронной микроскопии (РЭМ), рентгеновской дифракции, CHNS/O элементного анализа.

По результатам электрохимических испытаний в натрий-ионной полужайке, начальная кулоновская эффективность (ICE) для различных лигносульфонатов находится в диапазоне 81-85%, а разрядная емкость 260-360 мАч/г, при этом удельная площадь поверхности для лучшего образца достигает 65 м²/г по N_2 . Неграфитизируемый углерод на основе крафт-лигнина обладает высокой разрядной емкостью 330 мАч/г и ICE 83% с удельной площадью поверхности 5,5 м²/г. Дальнейший анализ показал, что морфологии частиц материалов характеризуется частицами неопределенной формы со средним размером в диапазоне 50-100 мкм, с большим количеством микропор. Согласно результатам низкотемпературной адсорбции CO_2 удельная площадь поверхности образцов из лигнина (369 м²/г) меньше, чем у образцов из лигносульфоната натрия (475 м²/г). Данное различие может объяснять разницу в удельной емкости материалов.

Таким образом, в результате данного исследования был оптимизирован подход к синтезу анодного материала с улучшенными электрохимическими характеристиками из дешевых и возобновляемых биополимеров, который потенциально можно применять в реальных аккумуляторах.

Публикации студентки (<https://istina.msu.ru/profile/tatulium/>):

1. Мотовило Т.А., Лакиенко Г.П., Бобылёва З.В. *Производные лигнина как источник неграфитизируемого углерода для натрий-ионных аккумуляторов. XXXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2025», сборник тезисов, Москва, Россия, 2025*
2. Мотовило Т.А., Лакиенко Г.П., Бобылёва З.В. *Неграфитизируемый углерод на основе производных лигнина как анодный материал для металл-ионных аккумуляторов. XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, сборник тезисов, Сочи, Россия, 2024*
3. Мотовило Т.А., Бобылёва З.В. *Неграфитизируемый углерод на основе производных лигнина как анодный материал для металл-ионных аккумуляторов. XXXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2024», сборник тезисов, Москва, Россия, 2024*
4. Motovilo T.A., Lakienko G.P., Bobyleva Z.V. *Hard carbon-based on lignin derivatives as anode material for metal-ion batteries. 8th International School-Conference of Young Scientists 2023 «Crystallography and Crystal Chemistry», book of abstracts, Skolkovo, Russia, 2023*
5. Мотовило Т.А., Лакиенко Г.П., Бобылёва З.В., Дрожжин О.А. *Неграфитизируемый углерод на основе производных лигнина как анодный материал для металл-ионных аккумуляторов. V Международная научно-практическая конференция «Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение» (GRS-2023), сборник тезисов, Тамбов, Россия, 2023*
6. Мотовило Т.А., Лакиенко Г.П., Бобылёва З.В., Дрожжин О.А. *Неграфитизируемый углерод как анодный материал для литий-ионных аккумуляторов. 15-я Международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология», сборник тезисов, Москва, Россия, 2023*

Применение наночастиц золота для улучшения электролюминесцентных свойств координационных соединений лантанидов

Гладких А.Ю.

Руководитель: д.х.н., проф. Уточникова В.В.

На сегодняшний день OLED лидирует на рынке дисплеев и источников света и находит новые применения. Однако нынешняя технология OLED имеет ряд нерешённых проблем, одной из которых является увеличение контрастности цвета. Перспективным классом соединений, который позволит существенно увеличить контрастность, являются координационные соединения (КС) лантанидов. Однако основы люминесценции лантанидов приводят к низкой эффективности OLED на их основе. В нашей исследовательской группе было выявлено, что ключевым фактором, влияющим на характеристики OLED, является длительное время жизни возбуждённого состояния КС лантанидов. Для решения данной проблемы был предложен новый подход введения наночастиц (НЧ) золота в гетероструктуру OLED для улучшения электролюминесценции органических светодиодов на основе лантанидов. Использование наночастиц золота способно повысить эффективность и стабильность OLED за счет улучшения инжекции и переноса носителей заряда, повышения эффективности вывода, а также благодаря эффекту локализованного поверхностного плазмонного резонанса, способному уменьшать время жизни возбужденного состояния эмиссионного материала, что является ключевым фактором для улучшения электролюминесцентных свойств OLED.

Целью данной работы стала разработка высокоэффективных органических светодиодов на основе координационных соединений тербия и европия с использованием наночастиц золота, обладающих эффектом плазмонного резонанса. Для выполнения данной цели были поставлены следующие задачи: 1) синтез интенсивно люминесцирующих координационных соединений тербия и европия, 2) оптимизация параметров синтеза наночастиц золота различных размеров и концентраций для их эффективного взаимодействия с эмиссионным слоем, 3) оптимизация параметров введения наночастиц золота в гетероструктуру OLED на основе координационных соединений тербия и европия для получения высокоэффективных OLED.

Для получения материалов эмиссионного слоя был проведён целенаправленный дизайн и синтез КС лантанидов, позволяющий увеличить подвижность носителей заряда и сенсibilизацию, за счет использования новых анионных и нейтральных лигандов из-за наличия электроноакцепторных функциональных групп. Для изучения влияния наночастиц золота на электролюминесцентные свойства OLED было предложено провести синтез сферических НЧ и нанопалочек золота, а также исследована эффективность эффекта от места внедрения в гетероструктуру OLED.

В результате проделанной работы были продемонстрированы рекордные значения максимальной яркости для OLED на основе комплексов тербия и европия, полученных растворными методами. Введение наночастиц в дырочно-инжекционный слой и в дырочно-транспортный слой приводит к значительному снижению напряжения включения устройства, за счет уменьшения энергетического барьера на границе раздела электрод/органический слой, в то время как использование наностержней в эмиссионном слое приводит к увеличению эффективности устройства OLED на 66%, что является на сегодняшний день наилучшим показателем улучшения электролюминесценции среди всех классов эмиссионных материалов с наночастицами золота.

Таким образом, использование наночастиц золота является многообещающим, но почти не изученным, подходом, который способен решить проблему длительного срока службы и низкой энергоэффективности OLED на основе комплексов тербия и европия.

Публикации студента (<https://istina.msu.ru/profile/GladkihAY/>):

1. Gladkikh A.Y., Kozlov M.I., Vashchenko A.A., Medved'ko A.V., Goloveshkin A.S., Bolshakova A.V., Latipov E.V., Utochnikova V.V. A 50% increase in the terbium-based OLED luminance through reducing the excited-state lifetime due to the introduction of gold nanoparticles. **Dalton Transactions**, 2022, 51, p. 16065-16069, DOI 10.1039/D2DT02446B
2. Уточникова В.В., Гладких А.Ю., Козлов М.И., Ващенко А.А., Кузмина Н.П. Органические светодиоды на основе координационных соединений лантанидов и способ их получения. Патент РФ № 2 804 718, 04.10.2023
3. Белов М.П., Гладких А.Ю., Попов В.В., Фролов А.Ю., Уточникова В.В., Федянин А.А. Усиление фотолюминесценции лантанидных комплексов с помощью плазмонных кристаллов. **XIV Международная конференция по фотонике и информационной оптике**, сборник тезисов, с. 69-70, Москва, Россия, 2025
4. Гладких А.Ю. Улучшение электролюминесцентных свойств OLED-дисплеев на основе комплексов европия с использованием наностержней золота. **Международная молодежная научная конференция «Современные тенденции развития функциональных материалов»**, сборник тезисов, с. 22, «Сириус», Россия, 2023
5. Гладких А.Ю., Козлов М.И., Уточникова В.В. OLED на основе координационных соединений тербия и европия с использованием наночастиц золота, обладающих эффектом плазмонного резонанса. **Всероссийская конференция «Фаворский-2023»**, сборник тезисов, с. 194, Санкт-Петербург, Россия, 2023
6. Гладких А.Ю., Козлов М.И. Синтез интенсивно люминесцирующих комплексов европия для OLED, допированных наночастицами золота. **XXX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2023»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2023
7. Гладких А.Ю., Козлов М.И., Ващенко А.А., Уточникова В.В. Увеличение яркости на 50% OLED на основе тербия благодаря введению наночастиц золота. **XXI Всероссийская конференция молодых ученых «Актуальные проблемы неорганической химии: синхротронные и нейтронные методы в химии современных материалов»**, сборник тезисов, с. 75, Красновидово, Россия, 2022
8. Гладких А.Ю., Уточникова В.В., Козлов М.И. Введение наночастиц золота для улучшения электролюминесцентных свойств комплексов тербия. **XXXII Менделеевский конкурс научно-исследовательских работ студентов-химиков**, сборник тезисов, I-19, Москва, Россия, 2022
9. Гладких А.Ю., Козлов М.И. Комплексы тербия в OLED: использования наночастиц золота для увеличения эффективности. **XXIX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2022»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2022
10. Гладких А.Ю., Козлов М.И., Ващенко А.А., Уточникова В.В. Использование эффекта плазмонного резонанса для увеличения электролюминесцентных свойств комплексов тербия. **Всероссийская конференция «VII Российский день редких земель»**, сборник тезисов, с. 108, Казань, Россия, 2021
11. Гладких А.Ю., Козлов М.И., Ващенко А.А., Уточникова В.В. Влияние эффекта плазмонного резонанса на электролюминесцентные свойства комплексов тербия. **XX Конференция молодых учёных «Актуальные проблемы неорганической химии: материалы с функционально активной поверхностью»**, сборник тезисов, с. 118, Красновидово, Россия, 2021

Высокотемпературная люминесцентная термометрия на основе координационных соединений европия и тербия

Родина Л.С.

Руководитель: д.х.н., проф. Уточникова В.В., м.н.с. Целых Л.О.

Точное измерение температуры в высокотемпературном диапазоне для некоторых применений должно быть удалённым, но большинство известных термометров не всегда удобны, например, для движущихся или малых объектов. Решением могут стать люминесцентные термометры, основой которых являются координационные соединения (КС) европия и тербия ввиду их исключительных фотофизических свойств. Применение биметаллических соединений либо смесей КС двух лантанидов позволяет реализовать ратиометрический принцип измерения (LIR): температурно-зависимый сигнал формируется отношением интенсивностей люминесценции ионов обоих металлов. Это даёт возможность исключить внешнюю калибровку за счёт эффекта «внутреннего стандарта». В качестве аналитического параметра можно так же использовать изменение времени жизни возбуждённого состояния КС.

Таким образом целью работы является получение термостабильных ярко люминесцирующих координационных соединений тербия и европия и создание композитных материалов на их основе с полимерными матрицами, а также изучение стабильности материалов при одновременном воздействии УФ излучения и высокой температуры.

Для достижения поставленной цели были синтезированы стабильные до 450 °С бензол-1,2,4,5-тетра (btcc⁴⁻) и -1,3,5-трикарбоксилаты (btcc³⁻) европия и тербия, 2,6-нафтилдикарбоксилат (nda²⁻) европия и разнолигандный комплекс с батофенантролином Eu₂(nda)₃(BPhen) по обменной реакции между смесью хлоридов лантанидов, взятой в стехиометрическом соотношении, и калиевой солью соответствующего лиганда. Композитные материалы были получены допированием полученных КС в матрицы: акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), полилактид (PLA), полистирол (PS), фотоотверждаемые полиимидные смолы (PI4050, PI4072, PI2050) и полиимид Р84. Для исследования температурно-зависимой люминесценции в диапазоне температур от 25 до 500 °С были исследованы моно-, биметаллические соединения и смеси: KEu(btcc)(H₂O), KTb(btcc), Eu_xTb_{1-x}(btcc)(H₂O)_n, xEu(btcc)(H₂O)_n + yTb(btcc)(H₂O)_n. Все полученные соединения были охарактеризованы по совокупности методов рентгенофазового, термогравиметрического анализа, инфракрасной спектроскопии и рентгеноспектрального микроанализа. Исследования стабильности материалов проводились при одновременном воздействии УФ лазера и различных температур.

Было показано, что после измерений 150 спектров люминесценции интенсивность Eu₂(nda)₃(BPhen) снижается, а время жизни остаётся постоянным. При этом 2,6-нафтилдикарбоксилаты координируют молекулы воды, которые тушат люминесценцию, при нахождении на воздухе, поэтому для дальнейшего исследования были выбраны более стабильные по составу MOF с лигандами btcc³⁻ и btcc⁴⁻. Полученные соединения и композитные материалы обладают интенсивной люминесценцией обоих лантанидов, и имеют высокие квантовые выходы (до 70%). Адаптирована методика получения композитного материала на основе полиимида Р84.

Исследование фотостабильности 1,3,5-трикарбоксилатов европия и тербия показало, что интенсивность спектров люминесценции КС уменьшается, при этом для тербия быстрее, что исключает использование параметра LIR в качестве сенсорного отклика для этих соединений. Поэтому было выбрано изучать зависимость времени жизни люминесценции от температуры. Разработаны воспроизводимые люминесцентные термометры на основе 1,2,4,5-тетракарбоксилатов и 1,3,5-трикарбоксилатов европия и тербия с высокой стабильностью и функциональностью до 400 °С.

Публикации студентки (<https://istina.msu.ru/profile/RodinaLS/>):

1. Tcelykh L.O., Goloveshkin A.S., Rodina L.S., Kolozhvari B.A., Latipov E.V., Kushnir S.E., Utochnikova V.V. *Europium and terbium benzene-1,2,4,5-tetracarboxylates: Synthesis peculiarities, crystal structures, and luminescent thermometry up to 400 °C*. **Inorganic Chemistry**, 2024, 63, 51, p. 24096-24103, DOI 10.1021/acs.inorgchem.4c03253
2. Родина, Л.С., Целых, Л.О., Уточникова, В.В. *Композитные материалы на основе карбоксилатов европия и тербия для высокотемпературной люминесцентной термометрии. XXXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2024»*, сборник тезисов, Москва, Россия, 2024
3. Родина Л.С., Целых Л.О., Уточникова В.В. *Синтез и исследование ароматических карбоксилатов европия и тербия и композитных материалов на их основе для высокотемпературной люминесцентной термометрии. XIII Конференция молодых ученых по общей и неорганической химии*, сборник тезисов, 1, с. 278, Москва, Россия, 2023
4. Родина Л.С., Целых Л.О., Уточникова В.В. *Синтез и исследование карбоксилатов европия и тербия, а также композитных материалов на их основе для высокотемпературной люминесцентной термометрии. XXII Конференция молодых ученых «Актуальные проблемы неорганической химии: энергия +»*, сборник тезисов, с. 151-152, Красновидово, Россия, 2023
5. Родина Л.С., Целых Л.О., Уточникова В.В. *Синтез и исследование карбоксилатов европия и тербия, а также композитных материалов на их основе для высокотемпературной люминесцентной термометрии. XXX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2023»*, сборник тезисов, Москва, Россия, 2023
6. Родина Л.С., Целых Л.О., Уточникова В.В. *Стабильность материалов на основе координационных соединений европия при одновременном воздействии температуры и УФ излучения. XXI Всероссийская конференция молодых ученых «Актуальные проблемы неорганической химии: синхротронные и нейтронные методы в химии современных материалов»*, сборник тезисов, с. 274-275, Красновидово, Россия, 2022
7. Родина Л.С., Целых Л.О., Уточникова В.В. *Стабильность материалов на основе координационных соединений европия при одновременном воздействии температуры и УФ излучения. XXIX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2022»*, сборник тезисов, Москва, Россия, 2022
8. Родина Л.С., Целых Л.О., Уточникова В.В. *Стабильность материалов на основе координационных соединений европия при одновременном воздействии температуры и УФ излучения. XII Конференция молодых ученых по общей и неорганической химии*, сборник тезисов, с. 106, Москва, Россия, 2022
9. Родина Л.С., Целых Л.О., Уточникова В.В. *Стабильность нафталин-2,6-дикарбоксилата европия при одновременном воздействии температуры и уф излучения. II Школа-конференция студентов бакалавриата «Современные функциональные материалы и наноматериалы»*, сборник тезисов, 1, с. 23-24, Дубна, Россия, 2022
10. Родина Л.С., Целых Л.О., Уточникова В.В. *Фотостабильность материалов на основе координационных соединений европия. XX Конференция молодых учёных «Актуальные проблемы неорганической химии: материалы с функционально активной поверхностью»*, сборник тезисов, с. 138-139, Москва, Россия, 2021

Влияние кинетики стадии нуклеации на мощностные характеристики электродов на основе гидроксида никеля

Лскавян Д.Н.

Руководитель: к.х.н., доц. Никитина В.А.

Электроды на основе $\text{Ni}(\text{OH})_2$ являются перспективными материалами для применения в зелёной энергетике благодаря способности обратимо окисляться до NiOOH в щелочной среде. Одна из областей потенциального использования – «разделённый» электролиз щелочных растворов, в котором гидроксид никеля может выполнять роль твёрдого редокс медиатора, что позволяет разделить процессы выделения кислорода и водорода в пространстве и времени. Ожидается, что подобное разделение позволит перейти к безмембранной конфигурации электролизера при сохранении высокой чистоты водорода, что будет способствовать удешевлению производства «зелёного» водорода. Однако существующие материалы на основе гидроксида никеля не способны к быстрому перезарядению, что делает их использование в «разделённых» электролизерах неэффективным.

К факторам, влияющим на кинетику редокс процесса $\text{Ni}(\text{OH})_2/\text{NiOOH}$, можно отнести электронную проводимость материала, скорость межфазного переноса заряда, а также скорость протекания электрохимически индуцированного фазового перехода, реализующегося в широкой области составов в ходе редокс превращений $\text{Ni}(\text{OH})_2/\text{NiOOH}$. В свою очередь, фазовый переход включает стадии зародышеобразования и стадию дальнейшего распространения фазовой границы внутри частицы. Однако кинетика зародышеобразования на сегодняшний день является наименее изученным аспектом редокс процессов, сопровождающихся протеканием обратимых фазовых переходов. В связи с этим, целью настоящей работы является выявление степени влияния изменения кинетики зародышеобразования на мощностные характеристики допированных материалов состава $\text{Ni}_{1-x}\text{Co}_x(\text{OH})_2$.

В ходе работы была проведена оптимизация методики катодного электроосаждения $\text{Ni}_{1-x}\text{Co}_x(\text{OH})_2$ на подложку из никелевой пены. Морфология, структура и элементный состав полученных материалов изучены методами рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии, локального рентгеноспектрального анализа и спектроскопии комбинационного рассеяния. Мощностные характеристики электродов определялись методами потенциодинамического и гальваностатического циклирования. Константы скорости нуклеации при протекании фазовых переходов определены методом высокоамплитудной хроноамперометрии.

Установлено, что проведение осаждения гидроксида никеля в проточном режиме способствует большему удержанию емкости при высоких тока разряда. Показано, что допирование кобальтом улучшает адгезию материала, что способствует большей стабильности при длительном циклировании. Согласно результатам хроноамперометрии, допирование кобальтом значительно снижает активационный барьер стадии нуклеации при протекании электрохимически индуцированных фазовых переходов в системе $\text{Ni}_{1-x}\text{Co}_x(\text{OH})_2/\text{Ni}_{1-x}\text{Co}_x\text{OOH}$. Полученный в проточном режиме электрод $\text{Ni}_{0.85}\text{Co}_{0.15}(\text{OH})_2$ продемонстрировал значительно более высокие мощностные характеристики, чем композитные электроды на основе коммерческого гидроксида никеля, сохраняя около 70 мАч/г ёмкости при плотности тока 60 А/г, что значительно превышает аналогичные величины для описанных в литературе материалов на основе $\text{Ni}(\text{OH})_2$.

Таким образом, в рамках проведенного исследования установлено, что допирование кобальтом способствует снижению нуклеационных барьеров при протекании обратимых фазовых переходов $\text{Ni}(\text{OH})_2/\text{NiOOH}$, что делает электроосажденные материалы состава $\text{Ni}_{1-x}\text{Co}_x(\text{OH})_2$ привлекательными для применения в устройствах для «разделенного» электролиза.

Публикации студента (<https://istina.msu.ru/profile/DavidLskavyan/>):

1. Лскавян Д.Н., Комайко А.И., Никитина В.А. *Электрохимически индуцированное осаждение гидроксида никеля для применения в устройствах для разделенного электролиза. XXII Всероссийская школа-конференция молодых учёных «Актуальные проблемы неорганической химии: химия и экология»*, сборник тезисов, с. 68, Красновидово, Россия, 2024
2. Лскавян Д.Н., Синицын П.А., Комайко А.И., Никитина В.А. *Влияние условий электрохимически индуцированного осаждения гидроксида никеля на скоростную способность в щелочных растворах. XXXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2024»*, сборник тезисов, электронный ресурс, Москва, Россия, 2024
3. Лскавян Д.Н., Ионидис Н.А., Порохин С.В., Никитина В.А. *Синтез углеродных композитов с наночастицами оксинитридов титана и ванадия для применения в качестве электрокатализаторов реакции восстановления азота. XXX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023»*, сборник тезисов, электронный ресурс, Москва, Россия, 2023

Синтез и исследование смешанного оксида $\text{Na}_{2/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{2/3}\text{O}_2$, допированного магнием, как материала катода для натрий-ионного аккумулятора

Погиба А.А.

Руководитель: д.х.н., в.н.с. Яшина Л.В., к.х.н. Захарченко Т.К.

Для развития альтернативных источников энергии необходимо развитие стационарных накопителей энергии. В качестве одной из возможных систем для этих целей, рассматриваются ячейки с распространённым и простым в добыче натрием, что делает актуальным вопрос поиска материалов для натрий-ионных аккумуляторов.

В качестве перспективного катодного материала рассматривается фаза $\text{Na}_{2/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{2/3}\text{O}_2$, демонстрирующая высокие показатели теоретической удельной ёмкости, составляющей 173 мАч/г. Однако, в процессе циклирования ёмкость фазы значительно снижается из-за окислительно-восстановительных процессов с участием кислорода, способствующих быстрой деградации структуры. Одним из предложенных методов решения проблемы является частичное замещение никеля на магний, что позволило бы стабилизировать данную структуру. Другой важной проблемой является безопасность материалов, одним из критериев которой, является высокая термическая устойчивость, которая была исследована для ряда перспективных катодных материалов, но не для фазы, рассматриваемой в данной работе.

В ходе работы был проведён твердофазный синтез образцов $\text{Na}_{2/3}\text{Ni}_{1/3-x}\text{Mg}_x\text{Mn}_{2/3}\text{O}_2$ с $x=(0; 1/9; 1/6; 2/9)$ по оптимизированной методике, фазовый состав образцов был подтверждён с помощью рентгенофазового анализа.

Для проведения электрохимических испытаний были собраны полужайки с анодом из металлического натрия, при использовании в качестве электролита растворов солей NaPF_6 и NaBF_4 в различных карбонатных и эфирных растворителях. Длительное гальваностатическое циклирование продемонстрировало высокую устойчивость состава $x=1/9$ по сравнению с прочими составами в диапазоне 2 -4.35 В при использовании 0.5М NaPF_6 в пропиленкарбонате, при стартовом значении ёмкости 120-125 мАч/г для $x=0, 1/9$ и 80-90 для более замещённых составов, для которых не реализуются характерные для материала высоковольтные зарядные

плато. При этом, при циклировании в диапазоне 2 -4.5 В наблюдается высокая скорость деградации для всех составов, а стартовое значение ёмкости составляет 125-135 мАч/г, при реализации высоковольтных плато во всех случаях.

С целью объяснения полученных результатов, было проведено исследование структурных изменений, происходящих в катодном материале в процессе денатрирования, путём рентгенофазового анализа. Было установлено, что при увеличении напряжения от 4,15 до 4,35В для $x=0$ происходит структурный переход, для $x=1/9$ при аналогичных напряжениях структурный переход в более устойчивую фазу, а для $x>1/9$ он происходит при напряжении превышающем 4,35В.

Гальваностатическое циклирование состава $x=1/9$ в электролитах на основе эфирных растворителей в полуячейках, показывает, что материал демонстрирует наилучшие электрохимические характеристики в 1М NaBF₄ в тетраглиме. При этом, при циклировании пропадает характерное для материала высоковольтное плато. Выполненный post-mortem рентгенофазовый анализ подтверждает, что причиной снижения удельной ёмкости является именно разложение электролита, а не деградация кристаллической структуры.

Дифференциальная сканирующая калориметрия с последующим рентгенофазовым анализом показала термическую устойчивость катодной смеси вплоть до 275°C. При этом, ДСК заряженных материалов, составов $x=0$ и $1/9$ показывает, что введение магния не способствует росту термохимической стабильности, как в смысле снижения теплового эффекта процесса, так и в смысле температуры его начала.

Публикации студента (https://istina.msu.ru/profile/Pogiba_Artem/):

1. Погиба А.А., Захарченко Т.К. Синтез и исследование смешанного оксида $Na_{2/3}Ni_{1/3}Mn_{2/3}O_2$, допированного магнием как материал катода для натрий-ионного аккумулятора. XXXII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2025», сборник тезисов, Москва, Россия, 2025
2. Погиба А.А., Захарченко Т.К. $Na_{2/3}Ni_{1/3-x}Mg_xMn_{2/3}O_2$ как катодный материал натрий-ионного аккумулятора. XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, сборник тезисов, «Сириус», Россия, 2024
3. Погиба А.А., Захарченко Т.К. Синтез и исследование свойств $Na_{2/3}Ni_{1/3-x}Mg_xMn_{2/3}O_2$ как материала катода натрий-ионного аккумулятора. X Всероссийская научная молодёжная школа-конференция «Химия, физика, биология: пути интеграции», сборник тезисов, Москва, Россия, 2024
4. Погиба А.А., Захарченко Т.К. Исследование высоковольтных фазовых переходов и термической стабильности $Na_{2/3}Ni_{1/3-x}Mg_xMn_{2/3}O_2$ стабилизированного магнием как катодного материала натрий-ионного аккумулятора. Школа-конференция «Мобильные накопители энергии», сборник тезисов, Долгопрудный, Россия, 2023
5. Погиба А.А., Захарченко Т.К. Исследование электрохимических свойств и термической устойчивости $Na_{2/3}Ni_{1/3-x}Mg_xMn_{2/3}O_2$. XXXIII Менделеевская школа-конференция молодых ученых, сборник тезисов, Москва, Россия, 2023
6. Погиба А.А., Захарченко Т.К. Исследование свойств фазы $Na_{2/3}Ni_{1/3-x}Mg_xMn_{2/3}O_2$ как катодного материала натрий-ионного аккумулятора. XXX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023», сборник тезисов, Москва, Россия, 2023
7. Погиба А.А., Захарченко Т.К. Исследование электрохимических свойств и термической устойчивости $Na_{2/3}Ni_{1/3-x}Mg_xMn_{2/3}O_2$. XIII Конференция молодых ученых по общей и неорганической химии, сборник тезисов, Москва, Россия, 2023
8. Погиба А.А., Захарченко Т.К. Исследование электрохимических свойств и термической устойчивости $Na_{2/3}Ni_{1/3-x}Mg_xMn_{2/3}O_2$. XXI Всероссийская конференция молодых ученых «Актуальные проблемы неорганической химии: синхротронные и нейтронные методы в химии современных материалов», сборник тезисов, с. 167-168, Москва, Россия, 2022

Термодинамические свойства и фазовые равновесия в системе оксид висмута (III) – оксид бора

Тосенко В.А.

Руководитель: к.т.н., в.н.с. Кондратьев А.В.

Стекла на основе системы $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3$ находят применение различных сферах таких как электроника в качестве как припойного стекла и в декоративном искусстве как хрусталь. Для оптимизации процесса приготовления стекол необходимы данные о фазовых равновесий и термодинамических свойствах в этой системе. В литературе представлена одна работа по экспериментальному построению равновесной фазовой диаграммы. Однако в других работах представлены метастабильные фазовые диаграммы с другими температурами ликвидуса и заявляющие о существовании метастабильных фаз состава BiVO_3 и $\text{Bi}_5\text{B}_3\text{O}_{12}$. Температурная область существования и термодинамические свойства этих фаз слабо представлены в литературе. Также неоднозначно определена область фазовой диаграммы в которой наблюдается стеклования при одной и той же скорости охлаждения.

Таким образом, целями этого исследования стали: исследования фазовых превращений в системе $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3$, исследование термодинамических свойств фазы $\text{BiVO}_3(\text{I})$ и определение температурной области её существования, определения температуры стеклования образцов в системе в зависимости от мольной доли B_2O_3 .

Для выполнения поставленных целей были синтезированы образцы состава $(1-x)\text{Bi}_2\text{O}_3 - x\text{B}_2\text{O}_3$ синтезом из расплава. Навеска H_3BO_3 и Bi_2O_3 смешивались в заданном стехиометрической соотношении и помещались в платиновый тигель. Затем образец нагревали до 800°C . После этого происходила закалка образца, путем выливания расплава на медную пластину при комнатной температуре или происходило медленное охлаждение для получения кристаллической фазы. Фазовые превращения полученных образцов были исследованы методом дифференциальной сканирующей калориметрии при скоростях нагрева и охлаждения 10 K/мин . Фазовый состав образцов содержащих предполагаемые метастабильные фазы BiVO_3 и $\text{Bi}_5\text{B}_3\text{O}_{12}$ был определен с помощью рентгенофазового анализа. Также с помощью метода ДСК была исследована теплоёмкость фазы BiVO_3 .

В результате были экспериментально определены температуры фазовых переходов для образцов состава $(1-x)\text{Bi}_2\text{O}_3 - x\text{B}_2\text{O}_3$, где $x = 0.1 - 0.85$. Фаза $\text{Bi}_5\text{B}_3\text{O}_{12}$ не была обнаружена методом РФА. Подтверждено существование фазы $\text{BiVO}_3(\text{I})$ при комнатной температуре. Определено, что при температуре 600°C это фаза распадется на две фазы: $\text{Bi}_4\text{B}_2\text{O}_9$ и $\text{Bi}_3\text{B}_5\text{O}_{12}$. Измерена теплоёмкость фазы $\text{BiVO}_3(\text{I})$ в интервале от 25 до 300°C . Определены температуры стеклования при температуре охлаждения 10 K/мин для образцов с мольной долей B_2O_3 больше 37.5% .

В результате была уточнена фазовая диаграмма системы $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3$ в области от 10 до 85 мол. % B_2O_3 . Фаза $\text{BiVO}_3(\text{I})$ существует в интервале температур от 25 до 600°C . Показано, что стеклование наблюдается только для стёкол с мольной долей B_2O_3 больше 37.5% и температура стеклования увеличивается с ростом содержания стеклообразующего оксида B_2O_3 .

Публикации студента (<https://istina.msu.ru/profile/TosenkoVA/>):

1. Nesterov A.V., Tosenko V.A., Uspenskaya I.A. *Thermodynamic modeling of the $\text{H}_2\text{O--NaCl--KCl--AlCl}_3$ system*. **Russian Journal of Physical Chemistry A**, 2025, 98, p. 3356-3364
2. Demchenko A.M., Nesterov A.V., Tosenko V.A. *Thermodynamic properties and phase equilibria in the $\text{Na-K-Al-SO}_4\text{--H}_2\text{O}$ system*. **XXIII International Conference on Chemical Thermodynamics in Russia**, сборник тезисов, с. 212, Казань, Россия, 2022

Разработка высоковольтных фотовольтаических преобразователей на основе органо-неорганических перовскитов

Жукова И.Н.

Руководители: к.х.н., н.с. Ивлев П.А., к.х.н., зав. лаб. Тарасов А.Б.

Перовскитные солнечные элементы (ПСЭ) – быстроразвивающаяся область фотовольтаики. Эффективность перовскитных солнечных элементов на данный момент достигла рекордного сертифицированного значения 26.7 %. Однако такие высокие значения КПД зарегистрированы для СЭ с активной площадью порядка 0.2 см^2 , в которых тонкая пленка гибридного галогенидного перовскита изготавливается растворными методами. Для того чтобы совершить переход к массовому производству перовскитных солнечных элементов, необходимо разработать технологии получения элементов большей площади с достаточной эффективностью и стабильностью. Основным препятствием к этому является значительное снижение однородности и качества перовскитных пленок на субстратах большой площади.

Целью данной работы стали разработка и оптимизация подхода к получению тонких пленок гибридного галогенидного перовскита на субстратах большой площади (от 16 до 36 см^2) методами двухстадийного гибридного синтеза и со-напыления, а также сборка перовскитного высоковольтного ($> 4 \text{ В}$) фотоэлектрического преобразователя (модуля) на основе полученных результатов.

В ходе работы был проведен двухстадийный гибридный синтез ряда тонких пленок перовскита с варьируемой толщиной начального слоя PbI_2 (термическое вакуумное напыление) и разными параметрами конверсии (спин-коатинг) в гибридный галогенидный перовскит. Условия отличались составом смеси органических галогенидов в растворе для конверсии и режимом отжига. Выявлено, что процесс напыления PbI_2/CsI требует контроля толщины получаемых пленок перед конверсией, а также контроля фазового состава перовскита после, до сборки фотоэлектрических устройств. По данным рентгеновской дифракции и растровой электронной микроскопии выбрана оптимальная методика получения перовскита двухстадийным методом: конверсия пленок PbI_2/CsI раствором FAI (йодид формамидиния, $\text{CH}(\text{NH}_2)_2\text{I}$): FABr (бромид формамидиния $\text{CH}(\text{NH}_2)_2\text{I}$): MACl (хлорид метиламмония $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Cl}$) = 49:21:30 в изопропанол с последующим отжигом в течение 30 минут при 150°C . Концентрация раствора органических галогенидов подбирается в соответствии с толщиной пленки PbI_2/CsI , определяемой методом атомно-силовой микроскопии.

На основании полученных результатов была осуществлена сборка серии перовскитных солнечных модулей архитектуры р-і-п типа: $\text{ITO}/\text{PTAA}/\text{перовскит}/\text{C}_{60}/\text{BCP}/\text{Cu}$ с последовательным соединением подэлементов на субстратах размерами 4 см x 4 см и 6 см x 6 см и активной площадью 6 см^2 и 17 см^2 соответственно. По результатам измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) ПСЭ рассчитаны значения КПД, напряжения холостого хода (V_{OC}), плотности тока короткого замыкания (J_{sc}) и фактора заполнения (FF). КПД солнечных модулей составили 8.3 (6 см^2) и 10.0 % (17 см^2), V_{OC} – 2.65 В и 4.28 В для устройств с активной площадью 6 см^2 и 17 см^2 соответственно.

Кроме того, показано, что метод со-напыления PbI_2 и MAI обладает низкой воспроизводимостью ввиду нестабильности процесса испарения MAI , невозможности точного контроля температурного режима его испарения и недостоверности показаний датчиков, поэтому в рамках настоящей работы не может быть применён для сборки солнечных элементов и солнечных модулей.

Таким образом, показано, что двухстадийный синтез перовскита имеет отличные перспективы для изготовления солнечных модулей.

Публикации студентки (<https://istina.msu.ru/profile/ZhukovaIN/>):

1. Zhukova I.N., Tatarenko A.Yu., Beltiukov A.N., Sadovnikov A.A., Boytsova O.V. A new photocatalyst based on layer-ordered anatase nanoparticles doped with manganese. **Mendeleev Communications**, 2024, 34, 2, p. 232-234, DOI 10.1016/j.mencom.2024.02.024
2. Boytsova O., Zhukova I., Tatarenko A., Shatalova T., Beltiukov A., Eliseev A., Sadovnikov A. The Anatase-to-Rutile Phase Transition in Highly Oriented Nanoparticles Array of Titania with Photocatalytic Response Changes. **Nanomaterials MDPI**, 2022, 12, 24, p. 4418, DOI 10.3390/nano12244418
3. Жукова И.Н. Полимеры класса политриариламинов в качестве дырочно-транспортных материалов для повышения эффективности перовскитных солнечных элементов инвертированной архитектуры. **Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2024»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2024
4. Жукова И.Н., Ивлев П.А. Новые полимеры класса политриариламинов в качестве дырочно-транспортных материалов для перовскитных солнечных элементов инвертированной архитектуры. **XXII Всероссийская конференция молодых ученых «Актуальные проблемы неорганической химии: энергия+»**, сборник тезисов, с. 45-46, Красновидово, Россия, 2023
5. Жукова И.Н. Тетраизоиндолные и тетрапиррольные макрогетероциклические соединения как дырочно-транспортные материалы для повышения термо- и фотостабильности перовскитных солнечных элементов. **Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2023»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2023
6. Татаренко А.Ю., Бойцова О.В., Жукова И.Н. Синтез эффективного фотокатализатора на основе углеродсодержащих слоистых метаструктур TiO_2 с использованием ПЭГ 400. **XXI Всероссийская конференция молодых ученых «Актуальные проблемы неорганической химии: синхротронные и нейтронные методы в химии современных материалов»**, сборник тезисов, с. 115-116, Москва, Россия, 2022
7. Жукова И.Н. Разработка метода получения фотокатализатора на основе упорядоченных наночастиц анатаза, допированного марганцем. **Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2022»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2022
8. Жукова И.Н., Бойцова О.В. Новый фотокатализатор на основе упорядоченных наночастиц анатаза, допированного марганцем. **II Школа-конференция студентов бакалавриата «Современные функциональные материалы и наноматериалы»**, сборник тезисов, с. 17-18, Дубна, Россия, 2022

Безмедиаторный биоэлектрокатализ глюкозодегидрогеназами, иммобилизованными на полиазилах

Александрович А.С.

Руководители: к.х.н., с.н.с. Комкова М.А., д.х.н., проф. Карякин А.А.

Среди наиболее эффективных подходов к включению ферментов в прямой биоэлектрокатализ можно выделить адсорбцию на развитой проводящей поверхности (в том числе реализуемую при со-иммобилизации фермента с проводящими наночастицами) и ориентацию на подложке, несущей фрагменты ко-субстратов фермента. Для включения в безмедиаторный биоэлектрокатализ глюкозодегидрогеназ в квалификационной работе предложено объединить эти подходы за счет адсорбции ферментов на наночастицах поли(метиленового зеленого), содержащего структуру дифениламина.

Предложен метод электрохимического синтеза коллоидных проводящих наноструктур поли(азиновых) красителей на примере поли(метиленового зеленого). Олигомерные

последовательности и наночастицы, электрополимеризованные на электроде в ходе длительного циклирования потенциала, удаляются с его поверхности в ходе ультразвуковой обработки и аккумулируются в реакционной смеси. Формирование полимерных наноструктур подтверждено методами электронной микроскопии, квадратноволновой вольтамперометрии и оптической спектроскопии с использованием интегрирующей сферы.

Адсорбированные на поверхности наноструктур поли(метиленового зеленого) пирролохинолинихинон- и флавинадениндинуклеотид-зависимые глюкозодегидрогеназы включены в прямой (безмедиаторный) биоэлектрокатализ. Для иммобилизованных ферментов потенциалы полуволн окисления глюкозы совпадают с потенциалами редокс-переходов кофакторов ферментов (-60 и 130 мВ для ПХХ ГДГ и -150 мВ для ФАД ГДГ) и не определяются электроактивностью полимера. За счет ориентации на поверхности проводящих наночастиц поли(метиленового зеленого), несущих фрагменты ко-субстратов ферментов, достигнуты рекордные эффективности прямого биоэлектрокатализа глюкозодегидрогеназами. Соотношение предельных токов окисления глюкозы в присутствии диффузионно-подвижного медиатора и в его отсутствие достигает 2 для ПХХ ГДГ и 4 для ФАД ГДГ, что более чем на порядок величины меньше, чем для известных биосенсоров на основе проводящих наноструктур.

С целью увеличения чувствительности для биосенсоров на основе ФАД ГДГ адаптирован гальваноимпульсный режим. При оптимальных параметрах регистрации сигнала ($t_{\text{зц}} = 100$ мс, $t_{\text{рц}} = 10$ с, $\tau = 0$ мс) такой режим обеспечивает в 100 раз более высокие предельные токи электрокаталитического окисления глюкозы и в 1000 раз более высокое соотношение сигнал/фон, чем в стационарном режиме.

Разработанные биосенсоры применимы для определения содержания глюкозы в физиологических жидкостях. Высокая селективность в присутствии восстановителей за счет работы при потенциале около 0.0 В и широкий линейный диапазон детектируемых содержаний (от 0.1 мкМ до 1 мМ) делают возможным прямое измерение физиологических содержаний глюкозы в неразбавленном поте и выдыхаемом аэрозоле, сконденсированном без дополнительного охлаждения. Показана принципиальная возможность неинвазивного онлайн мониторинга состояний гипо-/гипергликемии по анализу пота с помощью биосенсора на основе ФАД ГДГ, интегрированного в проточный потосборник.

Публикации студентки (<https://istina.msu.ru/profile/annalexandrovich/>):

1. Komkova M.A., Alexandrovich A.S., Karyakin A.A. Polyazine nanoparticles as anchors of PQQ glucose dehydrogenase for its most efficient Bioelectrocatalysis. **Talanta**, 2024, p. 125219, DOI 10.1016/j.talanta.2023.125219
2. Alexandrovich A.S., Komkova M.A., Karyakin A.A. Poly(Methylene Green) Nanoparticles as Anchors of PQQ Glucose Dehydrogenase for its Most Efficient Bioelectrocatalysis. **XIII International Conference on Chemistry for Young Scientists «Mendeleev-2024»**, сборник тезисов, с. 292, Санкт-Петербург, Россия, 2024
3. Александрович А.С., Комкова М.А. Включение глюкозодегидрогеназ в прямой биоэлектрокатализ с использованием наночастиц полиазинов для высокоэффективных биосенсоров. **XXIV Менделеевская школа-конференция молодых ученых**, сборник тезисов, с. 50, Казань, Россия, 2024
4. Александрович А.С., Комкова М.А., Карякин А.А. Высокочувствительные биосенсоры на основе глюкозодегидрогеназ, включенных в прямой биоэлектрокатализ с использованием наночастиц полиазинов. **Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2024»**, сборник тезисов, с. 11, Москва, Россия, 2024
5. Александрович А.С., Комкова М.А., Карякин А.А. Ориентация глюкозодегидрогеназ с помощью наночастиц полиазинов: на пути к предельной эффективности биоэлектрокатализа. **Молодёжная международная научная конференция «Современные тенденции развития функциональных материалов»**, сборник тезисов, с. 6, Сочи, Россия, 2023
6. Александрович А.С., Комкова М.А., Карякин А.А. Включение глюкозодегидрогеназ в прямой биоэлектрокатализ с использованием наночастиц полиазинов для высокоэффективных

биосенсоров. 13-я Международная научная конференция «Биокатализ. Фундаментальные исследования и применения» (БИОКАТАЛИЗ - 2023), сборник тезисов, с. 167, Суздаль, Россия, 2023

7. Александрович А.С., Комкова М.А., Карякин А.А. *Высокоэффективные биосенсоры на основе глюкозодегидрогеназ, включенных в прямой биоэлектрокатализ с использованием наноструктур поли(азинов).* Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023», сборник тезисов, с. 1150, Москва, Россия, 2023

8. Александрович А.С., Орлов А.К., Комкова М.А., Карякин А.А. *Проточный электросинтез рецепторных миметиков на основе полиаминофенилборной кислоты для сенсоров на сахара и гидроксикислоты.* IV Съезд аналитиков России, сборник тезисов, с. 316, Москва, Россия, 2022

9. Александрович А.С., Орлов А.К., Комкова М.А. *Проточный электросинтез синтетических рецепторов на основе боронат-замещённого полианилина для сенсоров на сахара и гидроксикислоты.* Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2022», сборник тезисов, с. 8, Москва, Россия, 2022

Мониторинг биологических жидкостей биосенсорами на основе берлинской лазури в гальваноимпульсном режиме

Касимовская В.С.

Руководители: к.х.н., с.н.с. Комкова М.А., д.х.н., проф. Карякин А.А.

Актуальной задачей современной биосенсорики является разработка новых и совершенствование существующих неинвазивных и малоинвазивных систем непрерывного контроля метаболитов. Наиболее перспективным решением является адаптация для этих задач биосенсоров на основе ферментов оксидаз и берлинской лазури. Такие биосенсоры обладают высокой селективностью в присутствии легкоокисляемых компонентов биологических жидкостей за счет работы при потенциале около 0.0 В и могут функционировать в режиме гальванической ячейки.

Целью квалификационной работы является разработка биосенсоров с рабочими диапазонами, охватывающими физиологические концентрации метаболитов в различных биологических жидкостях, для которых высокая чувствительность и операционная стабильность реализуются за счет гальваноимпульсного режима регистрации сигнала.

Содержание ключевых метаболитов (включая глюкозу и лактат) в различных биологических жидкостях (крови, межклеточной жидкости, диализате, поте) может отличаться на несколько порядков величины. Для «настройки» линейного диапазона биосенсора предложено варьировать содержание фермента в чувствительном слое. Показано, что снижение количества иммобилизованной оксидазы в 1000 раз позволяет до 2 порядков величины повысить кажущуюся константу Михаэлиса для глюкозных биосенсоров ($K_M^{\text{каж}} > 100$ мМ) и на порядок – для лактатных ($K_M^{\text{каж}} > 10$ мМ). Предложенный подход обеспечивает протекание каталитической реакции в условиях кинетического контроля, не ограниченной концентрацией растворённого кислорода даже при детекции миллимолярных концентраций.

Для компенсации падения чувствительности биосенсоров при снижении количества иммобилизованного фермента для них адаптирован гальваноимпульсный режим, реализуемый за счёт попеременного размыкания и замыкания цепи рабочего электрода и электрода сравнения. При оптимальных параметрах регистрации транзиентного сигнала за счет концентрирования на поверхности электрода H_2O_2 (продукта ферментативной реакции) в межимпульсном интервале удается повысить коэффициент чувствительности биосенсоров до 100 раз. Несмотря на высокую электроактивность берлинской лазури, подход также позволяет до 15 раз увеличить соотношение сигнал/фон.

За счет снижения количества образующихся гидроксид-ионов, а также частичного окисления берлинского белого до более устойчивой формы берлинской лазури в межимпульсном интервале, гальваноимпульсная регистрация обеспечивает существенное увеличение операционной стабильности (био)сенсоров на основе берлинской лазури. Так, по сравнению с характеристиками в стационарном режиме, операционная стабильность в ходе непрерывного гальваноимпульсного мониторинга 100 мкМ H_2O_2 увеличена в 15 раз, 5 мМ глюкозы – в 4 раза, 50 мМ лактата – в 3 раза.

В ходе непрерывного мониторинга метаболитов с помощью нательного проточного устройства на основе разработанных биосенсоров показано, что лактат в поте является более быстрым (до 15 мин) индикатором гипоксии, чем лактат в крови. При этом время задержки в том числе определяется типом подготовки спортсмена (спринтер/стайер). Такие устройства могут применяться для неинвазивного контроля состояний гипоксии по анализу пота в режиме реального времени.

Публикации студентки (<https://istina.msu.ru/profile/kasimovskaya.lera/>):

1. Komkova M.A., Eliseev A.A., Kasimovskaya V.S., Poyarkov A.A., Eliseev A.A., Karyakin A.A. *Pulse Power Generation Chronoamperometry as an Advanced Readout for (Bio)sensors: Application for Noninvasive Diabetes Monitoring*. **Analytical Chemistry**, 2023, 95, 19, p. 7528-7535, DOI 10.1021/acs.analchem.2c05746
2. Kasimovskaya V.S., Eliseev A.A., Karyakin A.A., Komkova M.A. *Pulse Power Generation Chronoamperometry for Highly Sensitive Glucose Monitoring*. **XIII International Conference on Chemistry for Young Scientists «Mendeleev 2024»**, book of abstracts, p. 326, St. Petersburg, Russia, 2024
3. Касимовская В.С., Елисеев А.А., Карякин А.А., Комкова М.А. *Высококчувствительные и высокостабильные биосенсоры на основе наноструктур берлинской лазури в режиме импульсной хроноамперометрии*. **Молодёжная международная научная конференция «Современные тенденции развития функциональных материалов»**, сборник тезисов, с. 31, «Сириус», Россия, 2023
4. Касимовская В.С., Елисеев А.А., Карякин А.А., Комкова М.А. *Импульсная хроноамперометрия: на пути к операционно стабильным и ультрачувствительным биосенсорам на основе берлинской лазури*. **13-ая Международная научная конференция «Биокатализ. Фундаментальные исследования и применения» (БИОКАТАЛИЗ - 2023)**, сборник тезисов, с. 184, Суздаль, Россия, 2023
5. Касимовская В.С., Елисеев А.А., Карякин А.А., Комкова М.А. *Импульсная хроноамперометрия для высококчувствительного и высокостабильного мониторинга метаболитов*. **XXX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2023»**, сборник тезисов, с. 31, Москва, Россия, 2023
6. Касимовская В.С., Зарочинцев А.А., Елисеев А.А., Комкова М.А., Карякин А.А. *Импульсная хроноамперометрия для высококчувствительного мониторинга лактата с помощью носимых биосенсорных устройств*. **IV Съезд аналитиков России**, с. 315, Москва, Россия, 2022
7. Zarochnikov A.A., Andreeva K.D., Kasimovskaya V.S., Komkova M.A., Karyakin A.A. *Electrocatalytic Properties of Prussian Blue Based Nanozymes: Towards Advanced (Bio)Sensor*. **Mátrafüred 2022 International Conference on Chemical Sensors**, Visegrád, Hungary, 2022
8. Касимовская В.С., Зарочинцев А.А., Комкова М.А. *Импульсная хроноамперометрия в режиме генерации мощности для носимых устройств мониторинга метаболитов*. **XXIX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2022»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2022
9. Зарочинцев А.А., Касимовская В.С., Елисеев А.А., Комкова М.А., Карякин А.А. *Импульсная хроноамперометрия в режиме генерации мощности для электрохимических (био)сенсоров*. **XXIX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2022»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2022

Влияние состава электролита на сохранение емкости натрий-ионных аккумуляторов при длительном циклировании

Сафиуллина А.Р.

Руководитель: к.х.н., н.с. Бобылёва З.В.

В условиях растущего глобального спроса на системы хранения энергии и необходимости перехода к устойчивым источникам, натрий-ионные аккумуляторы (НИА) привлекают все большее внимание как перспективная альтернатива литий-ионным аккумуляторам (ЛИА). Однако, для успешной коммерциализации НИА необходимо преодолеть ряд сложностей, связанных с улучшением их электрохимических характеристик, включая емкость, кулоновскую эффективность, стабильность циклирования и скорость заряда/разряда. Значительное влияние на характеристики НИА оказывают используемые электродные материалы и электролит. В частности, свойства анодного материала, такие как морфология и структура, играют ключевую роль в обеспечении эффективной интеркаляции/деинтеркаляции ионов натрия. Аналогично, состав катодного материала определяет потенциал ячейки и вклад в общую емкость. Кроме того, электролит, как проводящая среда, оказывает непосредственное влияние на ионную проводимость, стабильность межфазной границы и электрохимическую стабильность системы.

В связи с этим, настоящее исследование направлено на комплексное изучение влияния морфологии анодного материала, состава катодного материала, массового соотношения активных компонентов, а также состава электролита на электрохимические характеристики полных натрий-ионных ячеек. Использование полных ячеек, имитирующих конфигурацию реальных аккумуляторных прототипов, позволяет получить более релевантные результаты и приблизить исследования к практическому применению.

Целью данной работы является улучшение характеристик (емкости, кулоновской эффективности, сохранения емкости) натрий-ионных электрохимических ячеек. Задачи: выявление параметров, которые могут влиять на электрохимические характеристики полных ячеек, среди варьируемых параметров рассмотреть: состав электролита, тип сепаратора, тип катодного материала, морфологию неграфитизируемого углерода; исследование полных ячеек методом гальваностатического зарядно-разрядного циклирования и определение разрядной емкости, кулоновской эффективности и циклируемости; характеристика свойств электролитов на основе соли NaPF_6 и органических растворителей этиленкарбоната (EC), пропиленкарбоната (PC), диэтилкарбоната (DEC) и некоторых добавок методом электрохимической спектроскопии импеданса и спектроскопии комбинационного рассеяния.

В ходе работы были приготовлены электролиты с органическими карбонатами в качестве растворителей и различными концентрациями соли NaPF_6 . В качестве анодных материалов был использован неграфитизируемый углерод (HC), а в качестве катодного материала – $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ (NVP) и $\text{Na}_4\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2(\text{P}_2\text{O}_7)$ (NFPP).

Несмотря на теоретическую емкость смешанного фосфата NFPP, равную $129 \text{ мАч} \cdot \text{г}^{-1}$, практическая емкость оказывается меньше — $70\text{--}80 \text{ мАч} \cdot \text{г}^{-1}$ в полных ячейках с электролитом на основе EC:DEC (1:1) и с добавлением 1% FEC и $90\text{--}100 \text{ мАч} \cdot \text{г}^{-1}$ в полных ячейках с электролитом на основе EC:PC (1:1). Для долгого циклирования полных ячеек и прототипов аккумуляторов при комнатной подходят как электролиты на основе 1М р-ра NaPF_6 в двухкомпонентных (EC:DEC и EC:PC), так и трехкомпонентных системах растворителей (EC:PC:DEC в соотношении 1:1:2) и с использованием 1% FEC. Полная ячейка NFPP/HC с электролитом 1М NaPF_6 в EC:DEC(1:1)+1%FEC продемонстрировала сохранение емкости 78% на 200-м цикле.

Публикации студентки (<https://istina.msu.ru/profile/AlinaSafiullina/>):

1. Sultanova Y.V., Apostolova M.O., Maidan M.T., Zybina A.I., Fefelov M.A., Safiullina A.R., ... & Antipov E.V. *Optimizing Disorder: Pretreatment Strategies for Saccharide-Based Hard Carbon Anodes in Na-Ion Batteries*. **Journal of The Electrochemical Society**, 2024, 171, 12, p. 120533, DOI 10.1149/1945-7111/ada069
2. Shpalter D., Bobyleva Z.V., Lakienko G.P., Safiullina A.R., Jablanovic A., Lutsenko D.S., ... & Antipov E.V. *Hard carbon anode materials for hybrid sodium-ion/metal batteries with high energy density*. **Journal of Power Sources**, 2024, 624, p. 235547, DOI 10.1016/j.jpowsour.2024.235547
3. Сафиуллина А.Р., Бобылева З.В. *Влияние состава электролита на сохранение емкости натрий-ионных аккумуляторов при длительном циклировании*. **XXXII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2025»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2025
4. Сафиуллина А.Р., Бобылева З.В. *Влияние состава электролита на циклируемость натрий-ионных электрохимических ячеек*. **XXII Всероссийская школа-конференция молодых учёных «Актуальные проблемы неорганической химии: химия и экология»**, сборник тезисов, Красновидово, Россия, 2024
5. Сафиуллина А.Р., Бобылева З.В., Дрожжин О.А. *Влияние состава электролита на циклируемость натрий-ионных электрохимических ячеек*. **XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии**, сборник тезисов, «Сириус», Россия, 2024
6. Сафиуллина А.Р., Бобылева З.В. *Влияние состава электролита на циклируемость натрий-ионных электрохимических ячеек*. **Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2024»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2024
7. Сафиуллина А.Р. *Электролиты для натрий-ионных аккумуляторов*. **15-я Международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2023
8. Сафиуллина А.Р. *Электролиты для натрий-ионных аккумуляторов*. **XXX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023»**, сборник тезисов, Москва, Россия, 2023

Влияние дырочно-транспортного слоя на процесс кристаллизации пленок гибридных перовскитов для создания крупноформатных солнечных элементов

Шварцберг М.А.

Руководители: к.х.н., зав. лаб. Тарасов А.Б., ст.-иссл. Ординарцев А.А.

Перовскитные солнечные элементы (ПСЭ) представляют собой новый тип фотовольтаических устройств, в которых в качестве светопоглощающего слоя применяют гибридные органо-неорганические перовскиты. На сегодняшний день в большинстве случаев для получения тонких пленок перовскитов используют различные растворные методы. Чаще всего при разработке технологического процесса изготовления ПСЭ применяют метод дозирующего лезвия, который позволяет получать крупноформатные высокоэффективные перовскитные модули ($> 10 \text{ см}^2$).

Существенный вклад в КПД ПСЭ вносит состав дырочно-транспортного слоя (HTL). Несмотря на значимость данного параметра, существующие исследования демонстрируют большое количество разрозненных данных, не дающих полноценной картины взаимосвязи между составом HTL и итоговыми характеристиками устройств.

Таким образом, целью работы является установление влияния состава HTL на процесс кристаллизации пленок гибридных перовскитов смешанно-катионного состава для создания крупноформатных солнечных элементов. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи: 1) изучение влияния соотношения органических прекурсоров на фазовый состав получаемых пленок; 2) изучение влияния основных параметров нанесения (высоты дозирующего лезвия и скорости потока из газовой пушки) на морфологию получаемых пленок; 3) изучение влияния состава HTL на его характеристики; 4) выявление зависимости морфологии и оптоэлектронных характеристик пленок перовскита от состава HTL; 5) сборка тестовых ПСЭ; 6) тестирование операционной стабильности изготавливаемых ПСЭ.

В ходе работы получение тонких пленок перовскитов состава $(\text{FA}_{1-x}\text{MA}_x)\text{PbI}_3$ производилось методом дозирующего лезвия. Морфология и фазовый состав пленок перовскита исследовались методами рентгенофазового анализа (РФА) и растровой электронной микроскопии (РЭМ). В качестве материалов для HTL были выбраны 2PACz, Me-2PACz, MeO-2PACz, DYE, РТАА (PACz – семейство карбозольных соединений; DYE – тетраметил 5-(2-(4'-(дифениламино)-[1,1'-бифенил]-4-ил)гидразинелиден)циклопента-1,3-диен-1,2,3,4-тетракарбоксилат), а также их сочетание. Характеристики HTL оценивались методами ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС) и измерения краевого угла смачивания. Эффективность и стабильность ПСЭ оценивались путем измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и мониторинга изменения точки максимальной мощности устройств.

В результате оптимизации методики нанесения пленок перовскита и состава HTL были изготовлены прототипы ПСЭ с архитектурой ИТО/HTL/перовскит/C60/BCP/Cu/SiO₂/стекло и максимальным КПД 18,2 %. Продemonстрировано, что последовательное нанесение Me-2PACz и РТАА в качестве HTL приводит к сохранению более 80 % от изначальной эффективности в ходе 700 часов эксплуатации. ПСЭ с РТАА в качестве HTL, что наиболее часто встречается в опубликованных работах, сохраняют 80 % от изначальной эффективности в ходе лишь 150 часов, что свидетельствует об эффективности разработанной методики.

Полученные результаты вносят вклад в понимание процессов, происходящих при создании ПСЭ, и открывают перспективы для создания фотовольтаических устройств с повышенной эффективностью и стабильностью.

Публикации студента (<https://istina.msu.ru/profile/NovikovMA/>):

1. Шварцберг М.А., Ординарцев А.А., Тарасов А.Б. *Влияние дырочно-транспортного слоя на процесс кристаллизации пленок гибридных перовскитов для создания крупноформатных солнечных элементов. XV Конференция молодых ученых по общей и неорганической химии*, сборник тезисов, с. 136, Москва, Россия, 2025
2. Шварцберг М.А., Ординарцев А.А., Тарасов А.Б. *Получение тонких пленок гибридных перовскитов методом дозирующего лезвия для изготовления крупноформатных солнечных элементов. XXIII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Актуальные проблемы неорганической химии: химия и экология»*, сборник тезисов, с. 93-94, Красновидово, Россия, 2024
3. Шварцберг М.А., Каменева С.В. *Фотохромные композиты на основе наночастиц WO₃ для детектирования паров пероксида водорода. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023»*, сборник тезисов, Москва, Россия, 2023

This image shows a full page of white paper with horizontal dotted lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page, providing a guide for handwriting practice. There are no margins, text, or other markings on the page.

This image shows a full page of white paper with horizontal dashed lines, typical of primary school writing paper. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

