

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Российское химическое общество имени Д.И. Менделеева

Научный совет РАН по аналитической химии

Тезисы докладов
"Оптические хемо-и биосенсоры"
в рамках ежегодной международной
конференции
Saratov Fall Meeting - 2025

г. Саратов

29 сентября – 3 октября 2025 г.

УДК 620.3(082)
ББК 30.600.3я 43
Т 29

Тезисы докладов "Оптические хемо- и биосенсоры" в рамках ежегодной международной конференции Saratov Fall Meeting - 2025, 29 сентября – 3 октября 2025 г., г. Саратов. – Саратов: изд-во Саратовский источник, 2025. – 62 с.

ISBN 978-5-6054750-7-1

Приведены результаты научных исследований по тематике актуальных проблем и результатов в области оптических сенсоров с особым вниманием к био- и нанотехнологиям, системам распознавания и современным подходам к обработке данных, обзору современных достижений в области применения сенсоров в живых системах.

Для специалистов и научных работников, занимающихся исследованиями в области оптической, био- и наносенсорики, аспирантов и студентов соответствующих направлений.

Тезисы докладов приводятся в авторской редакции.

Программный комитет:

И.Ю. Горячева, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского (СГУ имени Н.Г. Чернышевского), сопредседатель

Т.Ю. Русанова, СГУ имени Н.Г. Чернышевского, сопредседатель

А.Ю. Богомолов, Самарский государственный технический университет

Н.А. Бурмистрова, СГУ имени Н.Г. Чернышевского

Б.Б. Дзантиев, Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН

М.А. Проскурнин, Московский государственный университет

Д.О. Кирсанов, Санкт-Петербургский государственный университет

А.В. Маркин, СГУ имени Н.Г. Чернышевского

Ю.Б. Монахова, FH Aachen - University of Applied Sciences

С. Н. Штыков, СГУ имени Н.Г. Чернышевского

Секретари конференции:

Д.Д. Дрозд

К.О. Андреева

Unifying Mitochondrial Epigenetic Signatures and Deep Learning-Driven Nanophotonic Sensing for Early Cardiovascular Risk Assessment in Aging Populations

Vikas Gurjar^{1,2}, Pradyumna Kumar Mishra^{1,2}

¹Division of Environmental Biotechnology, Genetics & Molecular Biology (EBGMB), ICMR-National Institute for Research in Environmental Health (NIREH), Bhopal, India;

²Faculty of Medical Research, Academy of Scientific and Innovative Research (AcSIR), Ghaziabad, India

This study presents a cohesive, multidisciplinary project that integrates advanced nanobiosensing, molecular profiling, and artificial intelligence to improve early diagnosis and risk assessment of cardiovascular diseases (CVDs), particularly among aging populations. Central to our approach is a novel quadruple-hybrid nano-photonic assay designed to simultaneously detect three critical circulating biomarkers: cell-free mitochondrial DNA (ccf-mtDNA), NT-proBNP, and exosomes. This innovative assay employs four sensing components: aminopyrene-tethered and PLL-functionalized carbon nanodots for ccf-mtDNA and ccf-NAs, alongside antibody-conjugated graphene nanodots for NT-proBNP and exosomes. The platform demonstrated exceptional sensitivity (LOD: 0.369 fg) and operational stability while eliminating the need for nucleic acid amplification. Combined with a long short-term memory deep learning model, the biosensor achieved an impressive 99.86% classification accuracy in distinguishing between CVD and non-CVD samples. We complemented this technological advancement with a cross-sectional pilot study investigating mitochondrial-associated epigenetic stress signatures in two age groups: younger adults (18-38 years, n = 154) and older adults (39-65 years, n = 105). Findings indicated that older participants exhibited increased mtDNA methylation, elevated mtDNA copy number, and heightened NT-proBNP levels, all of which were correlated with reduced telomerase activity and increased inflammatory responses. These molecular insights were seamlessly integrated with biosensor data and analyzed using four machine learning models, with Random Forest achieving the highest prediction accuracy (0.984) for CVD risk. Collectively, this project exemplifies a powerful integration of biosensing technology, molecular diagnostics, and AI-analytics, providing a non-invasive, scalable, and precise strategy for early detection of CVD and personalized risk assessment, particularly relevant for age-related vulnerabilities.

Surface-Enhanced Spectroscopy in Modern Chemical Analysis: Achievements and Prospects

Irina A. Veselova

*Analytical Chemistry Division, Faculty of Chemistry,
Moscow State University named after M.V. Lomonosov, 119991, Moscow, Leninskie Gory
no. 1 building 3, irina.veselova@mail.ru*

Surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) is today a highly sensitive and selective method of chemical analysis for the determination (including multiplex) of a wide range of biologically active substances and ecotoxicants.

At the same time, the classical SERS sensors, widely known today, based on the noble metals silver and gold, despite their sometimes unique analytical characteristics, have a number of disadvantages, namely 1) a limited range of analyzed compounds due to the mismatch of the spectral characteristics of the surface and the analyte, 2) lack of affinity of analytes to the surface of metal nanostructures, 3) low reproducibility of the analytical signal, which in some cases leads to the impossibility of performing quantitative analysis, 4) instability during storage of sensor elements in air and during operation, 5) photocatalytic ability to degrade components of indicator systems and themselves determined analytes, 6) toxicity of SERS-active surfaces based on metal nanoparticles in relation to a number of biological objects if it is necessary to perform *ex vivo* or *in vivo* analysis, 7) difficulties in applying the method to ensure continuous monitoring.

According to the authors of the report, a promising approach to solve the problems described above, including significantly expanding the analytical capabilities of the SERS method, is the development of fundamental approaches to the creation of indicator systems and surfaces structured at the nanoscale that have specified (required for actual analytes) optical characteristics.

This report will primarily discuss the prospects of SERS sensing systems in the analysis of biological samples and samples of environmental monitoring.

The work was carried out with financial support by the Russian Science Foundation 23-13-00276.

Применение спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света для определения лекарств в биожидкостях человека

Маркин А.В.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Институт химии, Саратов, av_markin@mail.ru

Хотя спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР) находится под пристальным вниманием учёных уже более полувека, это относительно новый метод, предложенный для терапевтического лекарственного мониторинга и определения лекарственных препаратов с узким «терапевтическим окном» в биожидкостях человека. Важным преимуществом ГКР-сигнала является его многополосная структура, которая позволяет более детально сравнивать спектральные профили целевого analyта и мешающих соединений при ГКР-анализе. Эта особенность облегчает выявление ложноположительных результатов, вызванных присутствием эндогенных компонентов биожидкостей или нецелевых препаратов.

Однако низкая селективность прямого ГКР ограничивает его применение для точного определения лекарственных препаратов в биожидкостях, поскольку при этом на ГКР-подложке адсорбируются не только молекулы analyта, но и другие компоненты анализируемого объекта. Для контроля конкурентных взаимодействий и повышения селективности ГКР-анализа сложных смесей (включая биожидкости человека) чаще всего используют следующие подходы (от простого к сложному): (1) разбавление, (2) корректировка pH, (3) удаление примесей путем фильтрации или осаждения, (4) разделение молекул analyта и примесей с помощью хроматографии или экстракции.

Выбор пробоподготовки образца зависит от сложности состава объекта и сродства компонентов смеси (аналитов и примесей) к ГКР-активной поверхности. Смеси, содержащие analyт с высоким сродством (например, тиольные соединения) и концентрацией, требуют простейшей пробоподготовки образца. В дополнение к простым способам пробоподготовки (например, разбавление и корректировка pH), детектирование analyтов с умеренным или слабым сродством к ГКР-подложке в образцах со сложным составом часто требует предварительного отделения analyта от примесей с использованием более длительных и трудоемких способов пробоподготовки, таких как экстракция и хроматография. Определение таких analyтов может быть также улучшено с использованием модифицированных ГКР-подложек, которые позволяют одновременно отделять analyт от компонентов биожидкостей и/или концентрировать его и проводить ГКР-детектирование. В этом случае улучшение селективности достигается за счет модифицирующего слоя, способного к отделению analyта/примесей согласно их размеру и/или заряду. Более того, несмотря на сложность и уникальность структуры ГКР-сигнала, структурно-родственные analyты (например, антибиотики одного класса) могут иметь значительное сходство спектральных профилей, что технически позволяет упростить ГКР-анализ, разработать более универсальные методики анализа и повысить эффективность метода в экспрессном биомедицинском анализе.

Таким образом, в данном докладе представлены результаты использования ГКР для точного определения лекарственных препаратов в биожидкостях человека (моче, плазме и сыворотке крови, слюне) с учетом сложности объекта анализа и преодоления конкурентных взаимодействий на поверхности ГКР-подложки.

Плазмонные чернила на основе наночастиц золота для обнаружения пиоцианина как маркера инфекции, вызванной *Pseudomonas*

*Афонюшкина Е.Ю.¹, Завидовский И.А.², Новиков С.М.², Капитанова О.О.¹,
Веселова И.А.¹*

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва,
afonyushkina@yandex.ru

Важными аспектами современных методов анализа биологических объектов, а именно развитие новых эффективных подходов к диагностике социально-значимых заболеваний, контролю качества пищевых, фармацевтических продуктов, растительного сырья являются сочетание высокой чувствительности, селективности и экспрессности.

В настоящее время одним из таких перспективных методов, который во многом позволяет достичь поставленных задач, является спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния (ГКР), которая основана на усилении комбинационного (рамановского) рассеяния от молекул, расположенных вблизи плазмонных наноструктур, вплоть до 10^{12} .

Развитие метода ГКР тесно связано с прогрессом в области нанотехнологий. Размер и форма наночастиц непосредственно влияют на напряжённость локального электрического поля на их поверхности, что напрямую связано с усилением комбинационного рассеяния.

Современные тенденции в сенсорике демонстрируют возрастающий интерес к созданию гибких элементов, легко адаптируемые под разные типы оборудования, объекты и условия проведения анализа. Основными задачами в развитии гибкой сенсорике являются разработка новых материалов (включая плазмонные наночернила и адаптивные подложки) и совершенствование их методов нанесения. Разработка состава наночернил играет важную роль, так как их свойства и характеристики непосредственно влияют на производительность и надежность сенсорных элементов. Наночастицы звёздочкоподобной морфологии обладают одним из самых высоких коэффициентов усиления рамановского сигнала за счет наличия острых лучей, на концах которых происходит концентрирование электромагнитных полей. Благодаря длинноволновой полосе плазмонного резонанса в области 650–900 нм можно настраивать плазмонные свойства нанозвёзд в красной и ИК областях.

В данной работе разработаны два типа гибких ГКР-субстратов, состоящих из медной фольги (толщиной 11 мкм) или бумаги (плотностью 180 г/м²) в качестве подложек и плазмонных наночернил на основе золотых нанозвёзд.

Разработаны методики определения пиоцианина, которые позволяют проводить его определение в биологических жидкостях с требуемой для диагностики заражения синегнойной палочкой (инфекции, вызванной *Pseudomonas*) чувствительностью. Для ГКР-субстрата на основе медной фольги ДОК 0,08–1 мкМ с C_{\min} 0,04 мкМ, а на основе бумаги – ДОК 0,1 – 100 мкМ с C_{\min} 0,02 мкМ.

Предложен «инвертированный» подход обнаружения пиоцианина на различных твердых поверхностях методом ГКР путем нанесения наночернил сверху на анализируемую поверхность, что позволяет проводить неинвазивный анализ *in situ* без разрушения матрицы объекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ 23-13-00276.

ИФА-подобный анализ микроРНК с применением изотермической амплификации

Бодулев О.Л., Соловьев А.М., Сахаров И.Ю.

Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, bodulevoleg@mail.ru

МикроРНК - РНК-олигонуклеотиды, принимающие участие в регуляции активности генов животных и растений. Обнаружена взаимосвязь между изменением концентрации различных микроРНК в биоматериалах человека и множеством заболеваний, в связи с чем микроРНК активно исследуются в качестве потенциальных биомаркеров. Концентрация микроРНК в биоматериалах низкая (фМ-пМ диапазон), при норме и патологии концентрации некоторых микроРНК могут отличаться слабо, а различные микроРНК высокочувствительны. Отсюда прослеживается потребность разрабатывать высокочувствительные и высокоспецифичные методы определения микроРНК. Для определения микроРНК в настоящее время чаще других применяется ПЦР в реальном времени. Однако данный метод не лишен недостатков, в связи с чем разрабатываются альтернативные с применением изотермических амплификаций различного типа, в том числе и без применения полимераз, что является экономически выгодным. Важным преимуществом изотермических методов амплификации является возможность сочетания многих из них с высокочувствительными детектирующими системами. Одной из таких систем можно по праву назвать микропланшетный анализ с применением пероксидазы хрена и реакции усиленной хемиллюминесценции. Такая система нашла широкое применение в ИФА, благодаря чему ее дополнительными преимуществами выступают коммерческая доступность и возможность автоматизации. С использованием данной детектирующей системы в сочетании с бесферментной изотермической реакцией каталитической сборки шпилек и амплификационной реакцией с полимеризацией и замещением (АМПЗ) нами были разработаны высокочувствительные методы определения кандидатов в онкомаркеры микроРНК-141 и микроРНК-155. Оба использованных метода амплификации основаны на взаимодействии микроРНК с захватывающим зондом шпилечной структуры, что делает разработанные нами методы также высокоспецифичными. Для метода определения микроРНК с применением АМПЗ проведено исследование выбора полимеразы с целью максимизации чувствительности анализа. Продемонстрирована применимость разработанных методов для анализа микроРНК в клетках раковых линий человека (MCF7, HeLa, HEPG2, CaCo2).

Благодарности

Данная работа поддержана Российским Научным Фондом (проект № 24-24-00123)

Выбор алгоритма формирования олигонуклеотидных кластеров при подготовке к массовому параллельному секвенированию ДНК

*Белов Д.А., Буляница А.Л., Алексеев Я.И., Евстапов А.А.
Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург,
antnulyan@yandex.ru*

Наиболее популярным методом высокопроизводительного секвенирования ДНК является метод массового параллельного секвенирования путем синтеза, реализуемый, в том числе, компанией Illumina [1]. Современная реализация метода заключается в предварительном формировании множества кластеров олигонуклеотидов в структурированных лунках на поверхности проточной ячейки, и последующем определении последовательностей олигонуклеотидов путем детектирования флуоресцентных меток.

При подготовке ячейки необходимо, чтобы максимальное количество лунок было занято единичными копиями олигонуклеотидов. Одноэтапное заполнение лунок предполагало бы использование сразу всех олигонуклеотидов числом N от сотен тысяч до миллиардов. При этом, например, отбор 10-й части пробы в случае исходного числа $N = 100000$ и более правомерно считать детерминированным процессом, хотя формально процесс описывается схемой Бернулли с вероятностью успеха $p = 0,1$. В приближении нормального закона практически достоверно отбирается 10000 ± 285 олигонуклеотидов.

Отбор пробы может осуществляться в несколько этапов [2]. Распределение числа частиц k , попавших в каждую из M лунок, описывается законом распределения Пуассона с параметром, равным средней заселенности, т.е. отношению NN/M , где NN – число олигонуклеотидов после разбавления пробы на определенном этапе заполнения.

Требуется подобрать схему анализа, обеспечивающую:

- i) минимизацию числа лунок, не заполняемых олигонуклеотидами ($k = 0$);
- ii) максимизацию числа лунок, содержащих только один олигонуклеотид ($k = 1$), который безошибочно расшифровывается;
- iii) с некоторыми ограничениями, возможна расшифровка при наличии второго «конкурирующего» олигонуклеотида при определенном соотношении площадей области, занимаемой копированными олигонуклеотидами (последнее требует решение задач геометрической вероятности);
- iv) по возможности уменьшение числа этапов отбора для сокращения времени.

Представлены решения, соответствующие схемам заполнения ячейки при различных интегральных показателях качества. На основе этих решений даны рекомендации по выбору алгоритма анализа в зависимости от относительной значимости характеристик: минимизация числа лунок M , минимизация доли «потерянных» олигонуклеотидов или/и использованных лунок, максимизация экспрессности анализа и различных комбинаций указанных требований.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00444-25-00.

1. Kumar K.R., Cowley M.J., Davis R.L. Next-generation sequencing and emerging technologies. Semin Thromb Hemost 2019; 45(07); p. 661–673.
2. US20220333178A1 Methods for improving nucleic acid cluster clonality.

ИК и ГКР сенсорные системы для экспрессного определения кофейной и хлорогеновой кислот в белке подсолнечника

*Вершинина Ю.С., Митин И.В., Самоделова М.В., Солонцов И.К., Капитанова О.О.,
Веселова И.А.*

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва,
yu.vrshn@gmail.com*

Одним из приоритетных направлений современной агротехнологии является извлечение биологически-активных соединений из недорогих растительных источников, в частности, продуктов переработки агропромышленного комплекса. Примером таких продуктов является подсолнечный шрот, образующийся в процессе производства масла. Он содержит около 40 масс.% сырого протеина, сбалансированного по аминокислотному составу, и среди альтернативных источников растительного белка представляет собой особый интерес в связи с широкой распространенностью и низкой стоимостью культуры.

Тем не менее, использование белка подсолнечного шрота в пищевой промышленности все еще ограничено. Одной из главных причин является наличие в нем фенольных соединений (1-4 масс.%), в основном, кофейной и хлорогеновой кислот. Даже следовые количества этих фенольных кислот в условиях высоких значений pH и температуры могут привести к изменению органолептических свойств конечного белкового продукта (темно-зеленое окрашивание, горьковатый вкус). В связи с этим, актуальной задачей является разработка экспрессных и высокочувствительных подходов к определению фенольных соединений как в исходном сырье, так и в продуктах его переработки.

Возможность проведения одновременного определения кофейной и хлорогеновой кислот методом ИК-спектроскопии зависит от наличия индивидуальных характеристических полос для каждого соединения. Так как экспериментальные ИК-спектры двух фенольных кислот накладываются друг на друга, а интенсивность характеристических полос хлорогеновой кислоты в области 1444 см^{-1} в 5 раз меньше относительно полосы кофейной кислоты в этой же области, можно сделать вывод о невозможности осуществления мультиплексного анализа данных соединений.

При этом, с помощью ИК-спектроскопии возможен неdestructивный экспресс-анализ исходного сырья на содержание в нем хлорогеновой кислоты как основного фенольного соединения в диапазоне концентраций 0.5-10 масс.%.

Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) обладает высокой точностью и чувствительностью при определении даже следовых количеств веществ, что может обеспечить определение фенольных соединений в белковых препаратах подсолнечника. В качестве субстрата для ГКР-активной сенсорной системы использовали медную фольгу, модифицированную наночастицами серебра. Для регистрации аналитического сигнала выбрали лазер с длиной волны 532 нм, так как положение полосы поверхностного плазмонного резонанса серебряных наночастиц соответствует 410 нм.

На полученных ГКР-спектрах характеристические полосы кофейной и хлорогеновой кислот в области 1251 и 1641 см^{-1} совпадают с модельными спектрами, рассчитанными с помощью DFT (теория функционала плотности), а также с литературными данными. Для кофейной кислоты наблюдали линейную зависимость интегрального значения интенсивности характеристического пика от десятичного логарифма концентрации аналита в диапазоне 0.09-0.36 мг/мл.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ 23-13-00276.

Акустоэлектронные биосенсоры на основе тонких пленок Ленгмюра-Блоджетт

*Горбачев И.А., Смирнов А.В., Колесов В.В., Кузнецова И.Е.
ИРЭ им.В.А. Котельникова РАН, Москва, ilyagor36@gmail.com*

Одним из способов повышения селективности и чувствительности сенсоров является разработка новых материалов с заданными свойствами. Перспективной технологией создания новых наноструктурированных материалов с заданными свойствами является технология Ленгмюра–Блоджетт (ЛБ). Она позволяет получать высокоструктурированные покрытия с настраиваемыми толщиной, составом и надмолекулярной организацией. Это позволяет создавать покрытия с заданными параметрами селективности и чувствительности к целевым веществам.

Работа посвящена исследованию сенсорных свойств пленок ЛБ с использованием акустоэлектронной технологии. Для этого на поверхности акустических линий задержек на волнах в пластинах и на поверхностных акустических волнах были сформированы ленгмюровские монослои 1,2-дипальмитоил-sn-глицеро-3-фосфоэтаноламина с иммобилизованным ферментом алкогольоксидазы и глюкозооксидазы. На рисунке 1 приведены отклики к парам спиртов и водному раствору глюкозы.

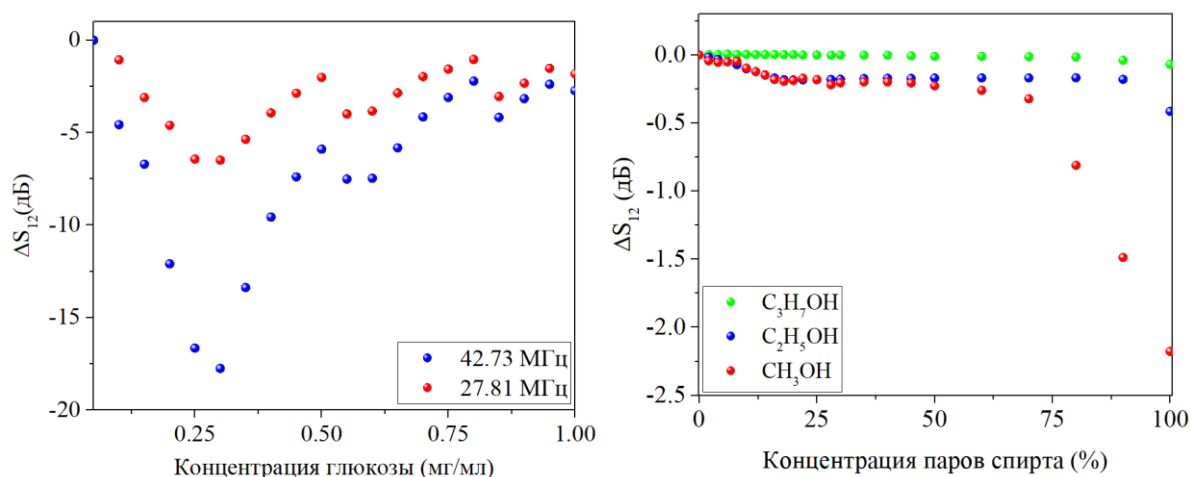


Рисунок 1 – амплитудный отклик мультислойных ЛБ пленок с иммобилизованным ферментом глюкозооксидазы (а) и алкогольоксидазы (б)

Из рисунка 1 видно, что сформированные пленки обладали сенсорным откликом к аналиту, специфичному для использованного фермента. Максимальный амплитудный отклик к глюкозе составил 17.5 дБ, а к парам метилового спирта 2.25 дБ. Таким образом была успешно продемонстрирована возможность использования пленок ЛБ в качестве селективных покрытий для акустоэлектронных датчиков, работающих на различных типах акустических волн.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема государственного задания FFWZ-2025-0001).

Бифункциональный импринтированный полианилин, синтезированный методом планирования эксперимента

Горло В.Д., Пиденко П.С., Бурмистрова Н.А.

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов
victoriya.gorlo@yandex.ru*

Молекулярно импринтированные полимеры открывают возможность разработки сенсорных систем с заданной специфичностью и являются перспективным направлением. Химическая и физическая стабильность, а также низкая себестоимость являются дополнительными преимуществами импринтированных материалов по сравнению с антителами и биологическими рецепторами. Анилин и его производные — популярные мономеры, используемые для формирования молекулярно импринтированных полимеров. Импринтированные материалы на основе полианилина, образующегося в процессе самоорганизации мономеров, широко используются для создания селективных сенсорных платформ, являются экологически безопасными [1].

В работе мы исследовали возможность создания импринтированного полианилина, обладающего селективностью к двум молекулам, используя кверцетин и пероксидазу хрена в качестве шаблонов. Для эффективного выбора оптимальных условий для сложной многофакторной системы использовали моделирование поверхностей отклика (Рис.1). Полученный материал обладает специфичностью как к низкомолекулярным, так и к высокомолекулярным соединениям (импринтинг фактор составил 2,3 для кверцетина и 24,6 для пероксидазы хрена соответственно).

Литература

1. Sharma, P.S., Pietrzyk-Le, A., D'Souza, F. et al. Electrochemically synthesized polymers in molecular imprinting for chemical sensing. //Anal Bioanal Chem. 2012. Т. 402, Р. 3177–3204.

Модификация квантовых точек для аналитических тест-методов

Горячева О.А., Дрозд Д.Д., Горячева И.Ю.

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов
olga.goryacheva.93@mail.ru*

Квантовые точки (КТ) представляют собой полупроводниковые нанокристаллы, обладающие уникальными оптико-электронными свойствами, такими как регулируемый спектр флуоресценции, высокая фотолюминесцентный квантовый выход и узкая полоса испускания. Ключевым аспектом их применения в аналитической химии является возможность направленной модификации поверхности, что позволяет адаптировать их для использования в качестве флуоресцентных сенсоров или компонентов в различных аналитических методах.

Стратегия функционализации поверхности определяется целевым методом детектирования. В иммунохимическом анализе применяются КТ с плотной толстой оболочкой, обеспечивающей высокую коллоидную стабильность и содержащей функциональные группы для ковалентной иммобилизации биополимеров, например, антител. Такая конфигурация обеспечивает селективное связывание целевого аналита. Оболочки могут состоять как из полимерных материалов, так и из силикатных оболочек.

Для реализации иммунохимических тест-методов, основанных на принципе резонансного переноса энергии требуются КТ с тонкими полимерными оболочками. Оптимизация толщины поверхностного слоя позволяет достичь эффективного диполь-дипольного взаимодействия между донором (КТ) и акцептором энергии, что является критическим условием для повышения чувствительности сенсора при детекции специфических биомолекулярных взаимодействий, таких как связывание антигена с меченым антителом.

Альтернативной стратегией является разработка сенсоров на основе прямого взаимодействия низкомолекулярного аналита с поверхностью КТ. В данном случае функционализация направлена на создание селективных сайтов адсорбции, что приводит к прямому изменению интенсивности флуоресценции нанокристаллов через приближение молекулы-аналита.

Таким образом, направленный дизайн и модификация поверхности квантовых точек являются определяющим фактором для их успешной интеграции в аналитические тест-системы, позволяя создавать высокочувствительные и селективные платформы для детекции широкого круга соединений.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-13-00380

Особенности сплавных квантовых точек как элемента оптических хемосенсоров

*Дрозд Д.Д., Корнилов Д.А., Цюпка Д.В., Коганова Д.Г., Горячева И.Ю.
Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов
drozddd@sgu.ru*

Фотолюминесцентные полупроводниковые квантовые точки (КТ) широко применяются в разработке новых аналитических методов. Большинство разработанных подходов пока не выходят за пределы лабораторных испытаний, что связано со сложностью многоэтапного синтеза и модификации большинства известных типов КТ. Для эффективного использования КТ в аналитических целях необходимо создать простой, воспроизводимый и масштабируемый метод получения нанокристаллов с заданными характеристиками. Особый интерес представляют сплавные КТ CdZnSeS. Синтез таких КТ осуществляется в одну стадию и позволяет посредством изменения параметров процесса получать нанокристаллы с фотолюминесценцией (ФЛ) в широком диапазоне видимого спектра. Сплавные КТ CdZnSeS могут быть модифицированы функциональными лигандами для эффективного связывания с целевыми аналитами.

Получена серия КТ состава CdZnSeS с длиной волны максимума ФЛ в диапазоне 530–620 нм. Представлены зависимости оптических и размерных свойств КТ от состава реакционной смеси и условий синтеза. Разработан комплекс простых методик модификации КТ CdZnSeS молекулами функциональных тиолов (содержащих карбоксильные или аминогруппы). Преимуществами разработанных методик являются простота, высокая воспроизводимость, полный количественный переход люминесцентного материала в водную фазу, длительный период коллоидной стабильности (более 16 месяцев). Представлены апробированные концепции применения полученных КТ в качестве оптических хемосенсорных элементов для определения цитостатических препаратов (на примере митоксантрона) и ферментов (на примере глюкозооксидазы).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-13-00380).

Неразрушающий контроль таблетированных лекарственных средств методами цифровой цветометрии и ближней ИК-спектроскопии

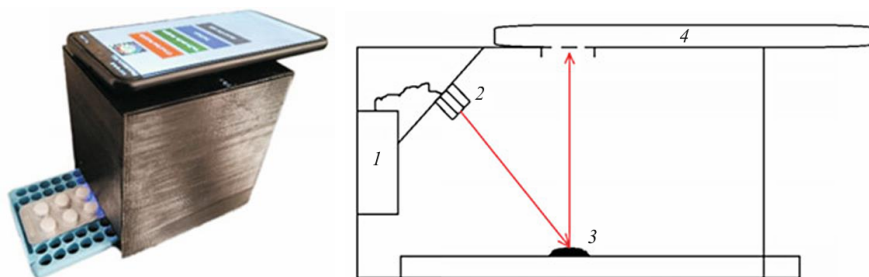
Емельянов О.Э.¹, Амелин В.Г.^{1,2}

- 1 Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир*
- 2 Всероссийский государственный центр качества и стандартизации лекарственных средств для животных и кормов, г. Москва*

Контроль качества и подлинности лекарственных средств остается приоритетной задачей фармацевтического анализа. Стандартные аналитические методы (ВЭЖХ, ГХ, ЯМР, капиллярный электрофорез, УФ- и флуоресцентная спектроскопия) требуют пробоподготовки, использования токсичных растворителей и дорогостоящего оборудования, что ограничивает их применение в экспресс-анализе и при входном контроле продукции в блистерах.

Рассмотрено применение неразрушающих методов цифровой цветометрии и ближней ИК-спектроскопии ($4000\text{--}10000\text{ см}^{-1}$) для оценки качества таблетированных форм без вскрытия блистерной упаковки. Цветометрический анализ выполнялся с использованием смартфона и 3D-печатного устройства с установленными ИК- и УФ-светодиодами (850 и 390 нм). В качестве аналитического сигнала флуоресцирующих препаратов (фторхинолоны, некоторые НПВС, макролиды) использовалась интенсивность как собственного свечения, так и диффузное отражение ИК-излучения, тогда как для нефлуоресцирующих - диффузное отражение ИК-излучения. Обработка полученных данных осуществлялась с применением хемометрических алгоритмов.

Показана высокая степень согласования результатов, полученных цифровой цветометрией, с данными ближней ИК-спектроскопии при идентификации производителя и определении содержания действующего вещества в таблетках.



Устройство и блок-схема для цветометрического анализа: 1 – блок питания, 2 – светодиоды, 3 – анализируемый образец, 4 - смартфон

Закономерности взаимодействий в иммунохроматографических тест-системах: поиск слабых звеньев для повышения чувствительности

Жердев А.В., Бызова Н.А., Сафенкова И.В., Дзантиев Б.Б.

Институт биохимии им. А.Н. Баха, ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва,
zherdev@inbi.ras.ru

Иммунохроматографические тест-системы (ИХТС) широко используются для решения различных практических задач благодаря простоте применения и скорости получения результатов. Однако лежащие в их основе быстрые взаимодействия реагентов при движении вдоль тест-полоски и непосредственная регистрация образующихся комплексов по собственным свойствам метки ограничивают пределы обнаружения таких тест-систем, что препятствует их эффективному использованию для ряда новых анализов. В докладе представлен систематический анализ подходов, позволяющих обеспечить высокую чувствительность ИХТС, исходя из оценки факторов («слабых звеньев»), лимитирующих для конкретных реагентов минимально определяемые концентрации целевых соединений. Представлены разработанные математические модели, описывающие процессы образования детектируемых комплексов в разных форматах иммунохроматографии (конкурентное и неконкурентное определение антигенов, определение антител), следующие из этих моделей уравнения, отражающие пределы обнаружения. Показано, что используемые иммунореагенты в зависимости от кинетических параметров их взаимодействия могут быть в рамках иммунохроматографических процессов быстрыми (обеспечивающими приближение реакции к равновесию) или медленными, что влияет на возможности управления пределом обнаружения. Рассмотрены экспериментально подтвержденные способы варьирования чувствительности и рабочего диапазона тест-систем, основанные на предварительной инкубации реагентов, переносе части гетерогенных реакций в объем движущейся жидкости, смещении зон связывания, изменении скорости и геометрии потока, а также последовательности введения реагентов в систему. Как альтернативные модуляторы предела обнаружения характеризуются способы усиления регистрируемого сигнала посредством новых меток, комплексов меток и дополнительных химических реакций. Рассмотрено применение ИХТС в сочетании с реакциями изотермической амплификации и неамплификационными средствами селективного выявления определенных олигонуклеотидных участков. Демонстрируются разработанные с использованием предложенных подходов высокочувствительные иммунохимические и молекулярно-генетические системы контроля приоритетных бактериальных патогенных контаминант пищевой продукции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 23-46-10011).

Детектирование доксорубина в плазме крови с помощью люминесцентных наносенсоров

*Коганова Д.Г., Цюпка Д.В., Дрозд Д.Д., Пиденко П.С., Горячева О.А., Горячева И.Ю.
Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов
koganovadara43@gmail.com*

По данным Всемирной организации здравоохранения, онкологические заболевания являются второй ведущей причиной смертности в мире. Основным медикаментозным методом лечения онкологии является химиотерапия. Доксорубин (Докс) - препарат группы антрациклиновых антибиотиков, входит в перечень жизненно необходимых и важнейших лекарственных препаратов для медицинского применения для борьбы со злокачественными образованиями различного происхождения. Применение Докс имеет ряд недостатков, заключающихся в воздействии на злокачественные и здоровые клетки, а также обладает высокой кардио-, цито- и нейротоксичностью. В связи с этим необходимо постоянно контролировать концентрацию Докс в организме пациентов. Известны несколько методов количественного определения Докс в жидкостях и тканях организма, самым распространенным подходом является высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) с различными типами детекторов. Несмотря на широкое применение, метод ВЭЖХ имеет ряд недостатков, связанных прежде всего с длительностью проведения анализа, использованием дорогостоящего оборудования и высококвалифицированных специалистов.

В данной работе представлен простой, быстрый метод определения Докс в плазме крови, основанный на тушении люминесценции КТ, что позволит применять для корректировки химиотерапии. Установлено, что эффективность тушения люминесценции КТ в присутствии Докс зависит от различных параметров. Изучено, влияние концентрации КТ в воде и в плазме крови, наибольшая чувствительность к Докс достигается с КТ при оптической плотности 0,05. Для оценки влияния матричных компонентов плазмы крови было изучено несколько разбавлений плазмы. Оптимальное разбавление составило в 25 раз, значение предела обнаружения составило 0,02 мкг/мл, константа Штерна-Фольмера - $5,6 \text{ M}^{-1}$, что сопоставимо со значениями для определения в воде. Результаты определения Докс в образцах крови человека показывают, что разработанный метод имеет хорошую повторяемость и точность. Достоверность предложенного метода была подтверждена сравнением результатов с методом ВЭЖХ-УФ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 23-13-00380).

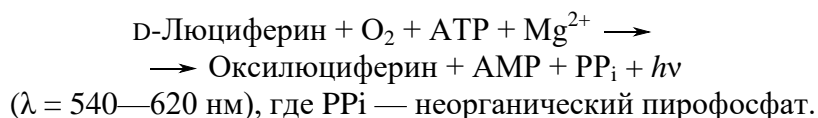
Билюминесцентный сенсор для изучения кинетики и механизма действия антибиотиков на клетки бактерий

Ломакина Г.Ю., Угарова Н.Н.

МГУ имени М.В. Ломоносова, химический факультет, Москва,

lotakinagalina@yahoo.com

Билюминесцентная система светляков основана на функционировании фермента люциферазы, принимающая конформацию, необходимую для специфического катализа реакции многоступенчатого окисления кислородом воздуха люциферина светляков:



В данной работе для создания билюминесцентного сенсора, предназначенного для изучения кинетики и механизма действия антибактериальных агентов, мы использовали живые клетки *E. coli*, продуцирующие рН-резистентную термостабильную люциферазу светляков (Luc), которая полностью сохраняет активность при 37 °С и рН выше 6,0. Внешние стимулы физической и химической природы могут влиять на функционирование и рост живых микроорганизмов, резко изменяя содержание внутриклеточных маркеров АТФ и Luc. Минимальные определяемые концентрации АТФ и Luc составляют $\sim 10^{-13}$ М, что дает возможность быстро регистрировать малейшие изменения их уровня даже в очень разбавленных клеточных суспензиях. Изучение кинетики изменения АТФ и Luc внутри и вне клеток в присутствии внешних эффекторов уже на начальной стадии процесса позволяет наблюдать за изменением жизнеспособности и численности микроорганизмов, скорости трансляции белков и проницаемости клеточной мембраны.

Проведено сравнение антибиотиков полимиксинового ряда и аминогликозидов на клетки *E. coli*, которое показало, что полимиксины проявляют мощный бактерицидный эффект, воздействуя прежде всего на АТФ-синтазу - наблюдалось резкое снижение ATP_{in} до нулевых значений, а также накопление Luc_{ex} вне клеток, что свидетельствует о протекании необратимых изменений в клетке и ее гибели. В присутствии аминогликозидов, напротив, наблюдался бактериостатический эффект – в клетках сохранялся высокий остаточный уровень ATP_{in} и Luc_{in} даже при высоких концентрациях антибиотика – часть клеток сохранила жизнеспособность, которые при подходящих условиях могут вернуть способность к делению, что подтверждено данными микробиологического теста. Кроме того, данная тест-система позволяет выявлять отличия среди антибиотиков одной группы по скорости ингибирования рибосом и эффективности их действия, что было продемонстрировано на примере соединений гентамицин, неомицин и канамицин.

Высокая чувствительность билюминесцентной системы, удобство регистрации сигнала и экспрессность анализа дает возможность конструирования биосенсоров или микрофлюидных устройств на основе живых клеток. Разработанный подход удобен для проведения быстрого скрининга лекарственных средств, оценки эффективности их действия и определения МИК.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова (тема № 121041500039-8).

Белковые носители лекарственных средств под действием экстранизкочастотного переменного магнитного поля для тераностики рака

Ломова М.В., Анисимов Р.А., Калинова А.Е., Садовников А.В.,
Гаранин Ф.Е., Гетманов С.А.

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, lomovamv85@mail.ru*

Развитие генетических технологий для борьбы с социально значимыми заболеваниями человека должно идти параллельно с физико-химическими методами воздействия на опухоли. Фармацевтическая отрасль эволюционирует в сторону создания всё более сложных систем доставки лекарств при сохранении тех же активных фармацевтических субстанций, что обусловлено прогрессом в генотипировании заболеваний. Таргетная доставка лекарств, настраиваемые профили высвобождения и сниженная токсичность приводят к разработке sophisticated лекарственных форм. Наномасштабный размер этих платформ достигается за счёт использования различных типов наночастиц, белков, полимеров, аминокислот и т.д.

Система обратной связи между носителем лекарственного средства и внешним управляемым триггером может быть основана на электромагнитных взаимодействиях, которые обладают высокой проникающей способностью в биологические ткани без значительного ослабления. Это позволяет осуществлять неинвазивное воздействие на глубоко расположенные опухоли, в отличие от УФ- или ближнего ИК-излучения, имеющего ограниченную глубину проникновения. Переход к бесметочным технологиям для мониторинга прогрессии и супрессии клеточных линий является ещё одним важным приоритетом проекта.

Спектроскопия Манделъштама – Бриллюэна (МБС), хотя в основном используется в традиционной физике, позволяет проводить неинвазивную бесметочную оценку жёсткости клеточных линий *in vitro* без разрушения клеток или сфероидов. Этот подход позволяет создавать карты жёсткости на поверхности клеток и отслеживать их изменения во времени. Таким образом, исследование механизма разрушения клеток под действием низкочастотных переменных магнитных полей с инкапсулированными формами противоопухолевых препаратов или без них представляется перспективной технологией будущего для лечения социально значимых заболеваний.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, РНФ 23-13-00373 "Механизм противоопухолевого действия переменного негреющего магнитного поля *in vitro* и *in vivo*".

Спектроскопические методы и хеометрия для количественного определения фосфолипидов в детском питании

Монахова Ю.Б.

*Университет прикладных наук Аахен, Факультет химии и биотехнологии, ул.
Хайнриха-Муссмана, 1, D-52428 Юлих, Германия*

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов,
yul-monakhova@mail.ru*

Фосфолипиды представляют собой особый класс липидов, состоящих из гидрофильной «головки» и гидрофобных хвостов жирных кислот. Благодаря своей структуре они обладают амфифильными свойствами, образуют в водной среде липидные бислои и являются основным компонентом биологических мембран. Фосфолипиды играют важную роль в эмульгировании жиров в кишечнике младенца и способствуют процессам пищеварения, абсорбции и транспорта. Определение фосфолипидов в детских молочных смесях необходимо, чтобы, например, отслеживать влияние промышленных процессов, таких как пастеризация или распылительная сушка, на фосфолипиды и выявлять возможные изменения. Их количественное определение также помогает приблизить состав детского питания к составу грудного молока.

В данной работе рассматриваются различные спектроскопические методы — ближняя инфракрасная спектроскопия (NIR), спектроскопия полного внутреннего отражения в ИК-области (ATR-FTIR) и протонная ядерно-магнитная резонансная спектроскопия (^1H NMR), — позволяющие анализировать фосфолипиды в детском питании. Для обработки всех измеренных спектральных данных и разработки соответствующих калибровочных моделей применялись хеометрические методы PCA (метод главных компонент) и PLS (метод частичных наименьших квадратов).

С помощью PLS-анализа ATR-FTIR и NIR спектров можно с высокой точностью количественно определять основные классы фосфолипидов, включая фосфатидилхолин (PC), фосфатидилэтаноламин (PE), фосфатидилинозитол (PI), сфингомиелин (SPH) и фосфатидилсерин (PS), а также общее содержание фосфора (коэффициент корреляции $R^2 > 0,87$; $\text{RMSE} < 0,22\%$ для всех исследованных фосфолипидов). Полученные калибровки демонстрируют высокую степень согласованности между прогнозируемыми и эталонными значениями.

В целом работа подтверждает, что спектроскопические методы в сочетании с хеометрическими подходами являются эффективными инструментами для качественного и количественного анализа фосфолипидов в детском питании.

Наночастицы с ферментативной активностью в биоаналитических системах

Панфёров В.Г., Жердев А.В., Дзантиев Б.Б.

Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии»
РАН, Москва, *vaspanferov@gmail.com*

Наночастицы, обладающие каталитической активностью, сходной с ферментативной, находят широкое применение в аналитических и биомедицинских исследованиях. Такие наноматериалы получили название «нанозимы», что подчёркивает их наноразмерные характеристики и способность имитировать ферментативную активность.

Во многих случаях нанозимы рассматриваются как полные функциональные аналоги природных ферментов. Однако на основе собственных экспериментальных данных и анализа литературных источников авторы подчёркивают принципиальные отличия между ферментативным и нанозимным катализом, которые необходимо учитывать при разработке биоаналитических систем.

В работе проведена сравнительная оценка кинетических параметров нанозимов и ферментов с оксидоредуктазной активностью. Показано, что нанозимы обладают высокой стабильностью при экстремальных значениях pH и температуры. Эти особенности были использованы при разработке ряда высокочувствительных и специфичных иммуноаналитических систем. Проведён анализ кинетических параметров каталитических реакций нанозимов различного состава (моно- и мультиметаллические частицы), структуры (частицы типа ядро@оболочка, пористые наноструктуры, металлоорганические каркасные соединения) и морфологии. Установлено, что в ряде случаев наночастицы изменяют свой состав в процессе взаимодействия с субстратом. Для некоторых нанозимов экспериментально подтверждена мультиферментативная активность.

В заключение кратко рассмотрены ключевые направления развития биоаналитических платформ на основе нанозимов, а также дана оценка текущего уровня их коммерциализации и перспектив дальнейшего внедрения.

Исследование проведено в рамках контракта на выполнение НИР от 13 мая 2025 г. № 92А/2025.

Определение аминокислоты и циклических гептапептидов с использованием импринтированных белков

*Пресняков К.Ю., Ильичева П.М., Решетник И.А., Пожаров М.В., Бурмистрова Н.А.,
Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов,
kirillpresnyakov1999@ya.ru*

Впервые продемонстрирован новый подход к определению аминокислот (аргинина) и гептапептидов (микроцистина—LR) с использованием импринтированных белков в качестве элементов молекулярного распознавания в конкурентном флуоресцентном твердофазном анализе. В качестве матричных белков применяли бычий сывороточный альбумин и овальбумин. Подтверждена эффективность использования фиктивных шаблонов, в частности производного аминокислоты, в процессе импринтинга.

Полученные импринтированные белки использовали для модификации лунок микротитровального планшета и поверхности аминированных наночастиц диоксида кремния (IV). Применение конкурентного флуоресцентного твердофазного анализа позволило достичь линейного диапазона определения аргинина 0,7—10 нг/мл с пределом количественного определения — 0,5 нг/мл, и микроцистина—LR 4—60 нг/мл с пределом количественного определения — 2 нг/мл. Наночастицы диоксида кремния (IV), модифицированные импринтированными белками, продемонстрировали высокую сорбционную ёмкость, равную 7,8 мг/г, по отношению к аргинину. Разработанный аналитический метод успешно применён для определения аргинина в биологически активных добавках, продемонстрировав высокую селективность и минимальную перекрёстную реактивность с другими аминокислотами. Установлена степень извлечения аргинина, среднее значение составило 103%, что свидетельствует о высокой точности и хорошей сходимости с концентрациями, заявленными производителями добавок.

Кроме того, импринтированные белки, синтезированные в присутствии производного аргинина, успешно применялись для обнаружения микроцистина—LR в стандартных образцах. Предложенный метод, сочетающий импринтированные белки и конкурентный флуоресцентный твердофазный анализ, представляет собой перспективный, чувствительный и селективный подход для определения аминокислот и токсичных пептидов в биологических и пищевых матрицах.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 24–73–00250).

Применение методов машинного обучения для более точного анализа данных спектроскопии комбинационного рассеяния

Прихожденко Е.С.

*Лаборатория медицинского оборудования в области *in vitro* диагностики, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Московская обл., prikhozhenko.es@mipt.ru*

Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) — универсальный метод определения химического состава [1]. Однако при анализе макромолекул со схожими свойствами (например, белков и жирных кислот) или компонентов в низкой концентрации традиционные методы, основанные на аппроксимации полос, не всегда применимы. В таких случаях для углубленного анализа могут быть использованы алгоритмы машинного обучения, такие как ансамблевые модели: случайный лес (СЛ), градиентный (ГБ) и адаптивный (АБ) бустинг [2, 3], которые повышают точность классификации и коэффициент детерминации R^2 с увеличением количества индивидуальных прогнозаторов (рис. 1). Для анализа использовались спектры КР (по 600 спектров на образец) изолята сывороточного белка (ИСБ) и его комплексов с гиалуроновой кислотой (ГК) в разной пропорции (ИСБ:ГК, 50:1, 20:1, 10:1). Данные были поделены на обучающую и испытательную выборки в соотношении 3:1. В качестве индивидуальных прогнозаторов использовались деревья принятия решений с глубиной 3. Последовательность количества индивидуальных прогнозаторов была равна (1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 и 200).

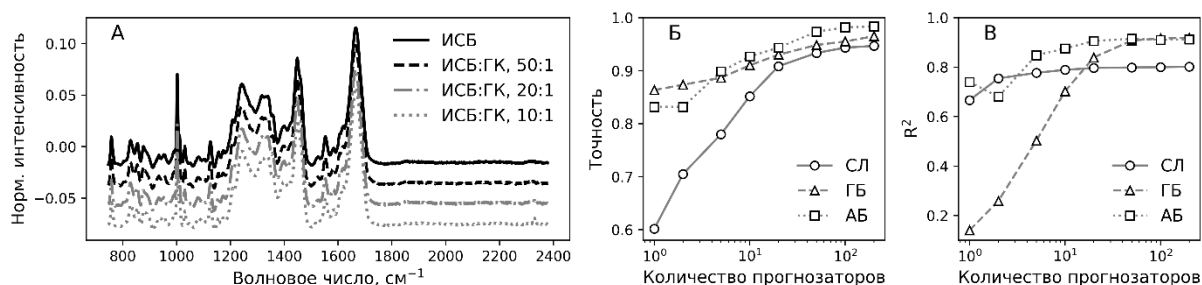


Рис. 1. (А) Усреднённые нормированные спектры ИСБ и ИСБ:ГК в пропорциях 50:1, 20:1, 10:1; зависимость точности (Б) и R^2 (В) от количества индивидуальных прогнозаторов в ансамблевой модели.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема государственного задания FSMG-2025-0054)

Список используемых источников:

1. Chandra A. et al. Unveiling the molecular secrets: a comprehensive review of Raman spectroscopy in biological research // ACS omega. – 2024. – Т. 9. – №. 51. – С. 50049-50063.
2. Mayorova O. A. et al. Combination of Machine Learning and Raman Spectroscopy for Determination of the Complex of Whey Protein Isolate with Hyaluronic Acid // Polymers. – 2024. – Т. 16. – №. 5. – С. 666.
3. Шевцова С. А. и др. Влияние малых концентраций гиалуроновой кислоты на структуру изолята сывороточного протеина при конъюгировании: разработка и оптимизация моделей машинного обучения на основе адаптивного бустинга для анализа спектроскопических данных // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. – 2025. – Т. 25. – №. 3. – С. 305-315.

Сенсорные ГКР-системы для определения ряда актуальных аналитов в объектах окружающей среды и биологических образцах: возникающие проблемы и пути их решения

*Самоделова М.В., Солонцов И.К., Капитанова О.О., Веселова И.А.
Химический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва,
mariya.basowa@yandex.ru*

Разработка сенсорных систем, способных избирательно извлекать определяемые компоненты из сложных биологических образцов и объектов окружающей среды, а также обеспечивать их высокочувствительное детектирование на фоне матричных интерференций, может существенно повысить доступность метода спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния для использования в экологическом мониторинге и клинических исследованиях.

Предложены сенсорные системы для определения загрязняющих веществ различной природы в водных объектах с помощью спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния. Чувствительность анализа обеспечивалась использованием гибридных плазмонных структур на основе металлических наночастиц и природного полимера и связыванием аналитов в окрашенные комплексные соединения для реализации эффекта резонансного рамановского рассеяния. Добавление графеноподобных материалов в систему не только увеличило сорбционную способность, но и снизило матричную флуоресценцию природных образцов, что в свою очередь сделало возможным использование высокоэнергетичных коротковолновых рамановских лазеров. Также разработан подход для сорбции из газовой фазы и удержания на гибридной сенсорной поверхности летучих аналитов на примере модельного соединения пиридина с последующим детектированием с помощью спектроскопии ГКР.

Для ускорения процесса разработки эффективных методов определения вирусов, предложена синтетическая модель вирусоподобных частиц, имитирующих размер и поверхность вирионов SARS-CoV-2. Разработана безамплификационная система для высокоспецифичного связывания вирусоподобных частиц и формирования сэндвич-комплексов на гибридной плазмонной поверхности, которая позволила детектировать вирусные частицы с использованием коротковолнового высокоэнергетичного лазерного излучения (532 нм).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ 23-13-00276.

Распознавание онкологических заболеваний путем анализа плазмы крови методами индикаторных реакций и рентгенофлуоресцентного анализа с полным внешним отражением

Устюжанин А.О.¹, Скоробогатов Е.В.¹, Бабаева Г.², Беклемишев М.К.¹

¹ МГУ, Химический факультет, ² Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н. Н. Блохина, Москва, skoregy@gmail.com

Методы «отпечатков пальцев» позволяют сравнивать и классифицировать объекты близкого состава, используя небольшие различия их химического состава. Мы развиваем кинетический оптический вариант метода «отпечатков пальцев», основанный на проведении индикаторных реакций в присутствии объекта (например, реакций окисления карбоцианиновых красителей). Сигнал в этом случае измеряют путем периодической регистрации поглощения и флуоресценции реакционной смеси. Кроме того, для получения «отпечатков пальцев» объектов применяют спектроскопические методы элементного анализа, такие как рентгенофлуоресцентный анализ с полным внешним отражением (РФА-ПВО). Полученные данные обрабатывают методами хемометрики, что позволяет различать образцы за счет небольших изменений аналитического сигнала и определить правильность различения образцов. В качестве метрики для оценки качества модели использовали правильность, т.е. отношение числа правильно отнесенных наблюдений валидационной выборки к общему числу наблюдений валидационной выборки.

Целью работы было изучение возможности использования упомянутых методов «отпечатков пальцев» для распознавания онкологических заболеваний путем сравнения свойств плазмы крови лабораторных мышей с различными трансплантированными опухолями, и здоровых особей.

Использование индикаторных реакций для распознавания образцов плазмы лабораторных мышей линии BALB/c, здоровых и больных карциномой молочной железы в течение 2 недель (EMT6), дало довольно низкие правильности (81% и 77%). Однако образцы плазмы здоровых и больных в течение 3 недель мышей (EMT6) можно различить со 100%-ной правильностью (при использовании метода логистической регрессии). Объединение данных РФА-ПВО и индикаторной реакции окисления карбоцианинового красителя пероксидом водорода в присутствии образцов плазмы позволило улучшить правильность распознавания рака на 3 неделе заражения с 80% до 100% (при использовании метода ЛДА). Плазму мышей линии BDS, больных карциномой Льюиса в течение 1 и 2 недель (LLC1 и LLC2), удалось распознать с правильностью 100% при использовании реакции окисления карбоцианинового красителя H_2O_2 в присутствии образцов плазмы. Использование метода РФА-ПВО позволило в дополнение к этому распознать образцы LLC1 и LLC2 одновременно (используя сигналы 10 элементов), а также меланому B16 (с помощью 5 факторов метода главных компонент для полного спектра РФА). Сочетание метода индикаторных реакций и РФА-ПВО в этом случае не улучшило результаты. Образцы мышей больных меланомой B16 в течение 2 недель (мыши BDS) удалось распознать с правильностью 100% с помощью метода РФА-ПВО, который позволил также одновременно распознать контрольные образцы и образцы больных LLC на 1 и 2 неделе с правильностью 100% при использовании в качестве входных данных концентрации 10 элементов. Таким образом, кинетический метод «отпечатков пальцев» является перспективным подходом для выявления онкологических заболеваний.

Оценка структуры и свойств водорастворимого графт-сополимера ксантана с акриламидом оптическими методами

Смирнов А.К., Поминов В.В., Шиповская А.Б.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, anton.smirnov.98@yandex.ru

В настоящее время неорганические наночастицы вследствие их чрезвычайно высокой чувствительностью к целевым анализам являются доминирующим материалом для создания оптических сенсоров [1]. Наряду с этим возрастает интерес к полимерным наночастицам и нанокомпозитам как перспективной альтернативе традиционным нанообъектам из низкомолекулярных веществ. При этом, высоким потенциалом для самоорганизации *in situ* в уплотнённые наноструктуры обладают графт-сополимеры природных полисахаридов с привитыми макроцепями из акриловых мономеров [2]. Материалы на их основе могут обладать широкими возможностями для решения прецензионных задач хемо- и биосенсорики.

В данной работе по модифицированной методике синтезирован графт-сополимер ксантана с акриламидом. Образцы различались количеством и длиной полиакриламидных боковых ответвлений. Свойства графт-сополимера изучены комплексом оптических и физико-химических методов анализа.

Радикальной полимеризацией, инициированной микроволновым воздействием и веществом-инициатором, получены образцы привитого сополимера ксантана с акриламидом, отличающиеся длиной и плотностью боковых ответвлений. Инфракрасная спектроскопия образцов обнаруживает характерные сигналы обоих типов полимеров: уширенный пик в области $1500\text{--}1700\text{ см}^{-1}$ (карбонильные группы полиакриламида) и полоса при 1400 см^{-1} (C-N связь амидного фрагмента при деформационном колебании связей COOH группы ксантана), подтверждающие синтез графт-сополимера. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) выявляет высокоразвитую поверхность образцов с размером пор $1\text{--}30\text{ мкм}$ и их преобладающей фракцией $1\text{--}4\text{ мкм}$. В опытах по вискозиметрии обнаружено, что водные растворы графт-сополимера не проявляют полиэлектролитный эффект, характеризуются аномально низкой вязкостью, практически не изменяющейся при введении сильного электролита. Динамическое светорассеяние в сочетании с СЭМ показывают, что при растворении в водной среде макромолекулы графт-сополимера образуют сферические наночастицы со средним диаметром $10\text{--}50\text{ нм}$ (доминирующая фракция), а также их агрегаты размером $500\text{--}1500\text{ нм}$. Увеличение доли полиакриламида в графт-сополимере приводит к возрастанию коэффициента диффузии частиц, снижению модуля отрицательного ζ -потенциала и удельной электропроводности системы.

Учитывая, что водорастворимый графт-сополимер ксантана с акриламидом формирует *in situ* наноразмерные сферические частицы с высокой плотностью заряда, высказано предположение о перспективности его применения в качестве чувствительного элемента при создании сенсорных устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФСИ, программа «Студенческий стартап», договор №3735ГССС15-L/99397

1. Ng S. M., Koneswaran M., Narayanaswamy R. A review on fluorescent inorganic nanoparticles for optical sensing applications //RSC advances. – 2016. – Т. 6. – №. 26. – С. 21624-21661.

2. Смирнов А. К., Шиповская А. Б. Синтез и свойства привитых сополимеров ксантана и глюкоманнана с акриловыми мономерами //Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Химия. Биология. Экология. – 2023. – Т. 23. – №. 2. – С. 185-196.

Использование аспарагината хитозана для оптического просветления стекла

Ушакова О.С., Шиповская А.Б.

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов,
olgakol4ina777@yandex.ru*

Среди многообразия методов нанесения чувствительного слоя хемосенсора на подложку (трафаретная, литографическая печать и т.д.) наибольшим преимуществом обладает капельный метод, позволяющий получать структурно однородные и стабильные планарные покрытия [1]. В этом случае чувствительный слой представляет собой тонкопленочную матрицу из синтетического полимера, воздушно-сухого гидрозоль коллоидных частиц или ПАВ с включённым активным веществом. Для создания нетоксичных, биосовместимых и биodeградируемых сенсоров медицинского и пищевого назначения перспективны матрицы из природных и биополимеров, например, биodeградируемого аминополисахарида хитозана (CS).

В этой связи целью работы является исследование оптических свойств и морфологии поверхности тонкопленочных глицерогидрогелевых золь-гель-пластин на основе L- и D-аспарагината хитозана (CS·L-(D-)AspA) методами коллиммированного рассеяния света и атомно-силовой микроскопии.

Объектами исследования выбраны гибридные глицерогидрогелевые пластины толщиной 500 ± 30 мкм. Их получали из смесевой композиции, включающей водные растворы CS·L-(D-)AspA, глюкоманнана и глицериновый раствор $\text{Si}(\text{OGly})_4$ в массовом соотношении компонентов 1:1:(0.5–1). Состав наносили на горизонтальную стеклянную подложку и выдерживали при $22 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 3 сут до завершения гелеобразования.

Установлено, что золь-гель-пластины поглощают зондирующее излучение в ближней УФ-, видимой и ближней ИК-области спектра. При этом, входящие в состав пластин полиолат кремния (золь-гель сетка) и глюкоманнан (структурирующая сетка) являются одновременно поглощающими и рассеивающими компонентами, а CS·L-(D-)AspA (ионная сетка) – только поглощающим, но с высокой пропускающей способностью (близкой к единице) падающего света. Обнаружено также, что пленки индивидуальных CS·L-AspA и CS·D-AspA демонстрируют эффект оптического просветления стеклянной подложки в области 300–320 нм [2]. Морфоструктура поверхности глицерогидрогелевых золь-гель-пластин характеризуется сложным «игольчатым» рельефом. Масштаб шероховатости снижается при понижении содержания аспарагината хитозана в составе глицерогидрогелевой системы.

Исследуемые тонкие золь-гель-пластины на основе L- и D-аспарагината хитозана перспективны для использования в медико-биологических приложениях, например, в оптическом биоимиджинге *in situ* и *in vivo* клеточных и организменных биообъектов и динамических биологических процессов, а также оптической диагностики и терапии, селективной УФ-стерилизации продуктов биотехнологических производств и т.д.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №24-16-00172, <https://rscf.ru/project/24-16-00172/>.

[1] Qian R.C., Long Y.T. Wearable chemosensors: A review of recent progress // *ChemistryOpen*. 2018. Vol. 7. No. 2. P. 118–130.

[2] Shipovskaya A.B., Ushakova O.S., Volchkov S.S., et al. Chiral Nanostructured Glycerohydrogel Sol–Gel Plates of Chitosan L- and D-Aspartate: Supramolecular Ordering and Optical Properties // *Gels*. 2024. Vol. 10. P. 427. <https://doi.org/10.3390/gels10070427>

Индикаторные системы на основе спектроскопии ГКР для молекулярной диагностики нейроэндокринных и нейродегенеративных заболеваний

Яренков Н.Р., Капитанова О.О., Веселова И.А.

Химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, kit-yar@mail.ru

Протекание патологических процессов можно оценить по отдельным маркерам или их группам. Визуализация этих маркеров и получение информации об их количестве из данных клинических исследований позволяет отслеживать прогрессирование нежелательных процессов и корректировать стратегии лечения. К сожалению, не все неврологические заболевания, особенно нейродегенеративные, в настоящее время могут быть диагностированы с высокой степенью достоверности на ранней стадии. Хотя пока невозможно достоверно определить полный патогенез этих заболеваний, выявлено несколько потенциальных маркеров, которые могут помочь оценить наличие и прогрессирование деменции, а также эффективность лечения. К ним относятся бета-амилоид, тау-белок и катехоламины, из которых особое значение имеет норадреналин. Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) на наночастицах благородных металлов позволяет избирательно определять патогенные соединения, такие как бета-амилоид, который является одной из основных причин болезни Альцгеймера (БА), и вспомогательные маркеры, катехоламины, на наномолярном уровне при минимальной подготовке образцов. Использование эффективных сенсорных поверхностей и индикаторных систем открывает возможности селективно усиливать определенные сигналы даже в сложных биологических матрицах, что делает спектроскопию ГКР перспективным инструментом для биоаналитических исследований и диагностики социально-значимых заболеваний.

В ходе работы синтезировано пять типов плазмонных сенсорных элементов для проведения анализа методом спектроскопии ГКР. Все полученные структуры обладали достаточно высокими КУ, воспроизводимостью и не вносили мешающего определению исследуемых соединений фонового сигнала. С помощью поверхностей AgNPs/CS и AgNPs/LID, а также метода Western blotting удалось изучить процесс индуцированной ионами металлов агрегации одного из важнейших маркеров БА, бета-амилоида, который предположительно запускает патологические процессы в мозге. Приведенные сенсорные поверхности использовали для определения бета-амилоида с пределами обнаружения 1,5 нМ и 15 пМ для AgNPs/CS и AgNPs/LID структур соответственно. Применение AgNPs/CS для проведения анализа методом спектроскопии ГКР с использованием рамановского спектрометра в полупортативном аппаратном оформлении позволило провести определение бета-амилоида на наномолярном уровне и точностью (98 ± 1) % в плазме крови человека. С помощью наноструктурированной плазмонной медной поверхности и предварительного связывания наночастиц серебра с тау-белком, удалось зарегистрировать рамановские спектры второго по значимости маркера БА. Данный подход позволил получить хорошо разрешенные спектры с узкими колебательными полосами, что повышает селективность анализа. Определение тау-белка проводили в диапазоне 50-504 нМ с ПО 20 нМ с использованием полупортативного рамановского спектрометра. С помощью индикаторных систем на основе 4-ААП и 4-ААП с ионами меди(II) на наноструктурированных сенсорных поверхностях, полученных пиролизным способом, удалось достичь чувствительности определения катехоламинов на наномолярном уровне. Использование медной наноструктурированной поверхности позволило не только повысить воспроизводимость анализа с сохранением чувствительности, но и провести определение дофамина в плазме крови здорового человека.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ 23-13-00276.

Биомеханическая реакция клеток при инкубации с магниточувствительными полимерными носителями лекарств

Анисимов Р.А., Абальмов А.А., Садовников А.В., Калинова А.Е., Ломова М.В.

^a*Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов*

^b*Фуданьский университет, Факультет материаловедения, 200437, Handan Rd, 220, Шанхай, Китай; roman.a.anisimov@gmail.com*

В настоящее время существует множество экспериментальных методов для определения механических свойств живых клеток. Среди них одними из наиболее распространенных являются контактные методики, такие как атомно-силовая микроскопия (АСМ). Однако в области биомеханики особый интерес представляют неинвазивные, бесметочные и бесконтактные методы. Одним из таких инновационных методов является спектроскопия Мандельштама-Бриллюэна (МБС), которая позволяет проводить трехмерную визуализацию механических свойств живых организмов.

Для исследования методом АСМ использовали линию клеток рака молочной железы мыши (4Т1) и линию фибробластов мыши (L929). Клетки инкубировали с магнитными носителями, имеющими структуру $\text{CaCO}_3/\text{MNP}/(\text{BSA}/\text{TA})_2$, в различных концентрациях. Для изучения жесткостных характеристик методом МБС также инкубировали культуры клеток HeLa с цитостатическими препаратами (доксорубицин) в летальной дозе. Значение жесткости раковых клеток было выше, чем у здоровых клеток. При добавлении субмикронных частиц ватерита в количестве 100 частиц на клетку жесткость увеличивалась во всех типах клеток. Для фибробластов, к которым добавляли частицы, содержащие магнетит, значение жесткости увеличилось на 21% (для чистого ватерита - на 9%). При концентрации 500 частиц на клетку жесткость клеток L929 также увеличивалась, однако для магнитных носителей она увеличилась на 13,5%, а для обычных - на 30,5%. Жесткость раковых клеток 4Т1 для обоих типов носителей снижалась при концентрации 500 частиц на клетку (на 10% для обычных и на 17% для магнитных). При добавлении магнитных носителей к раковым клеткам 4Т1 в концентрации 100 частиц на клетку жесткость клеток возрастает. Однако при дальнейшем увеличении концентрации носителей (в 5 раз) жесткость существенно снижается. Для фибробластов L929 при инкубации с носителями в концентрации 100 частиц на клетку жесткость также возрастает, но при более высокой концентрации 500 частиц на клетку жесткость снижается для клеток, обработанных наночастицами ватерита, в то время как для клеток, обработанных обычными носителями, она фактически возрастает.

С помощью метода МБС мы измерили эффект введения летальной дозы доксорубицина на клетки. Результаты показали увеличение частоты центрального пика, ширины пика на половине высоты и тангенса потерь по сравнению с интактными клетками. Однако не наблюдалось корреляции между плотностью популяции клеток на дне чашки и основными клеточными характеристиками. Увеличение частоты центрального пика МБС указывает на изменение жесткости клеток. Учитывая, что концентрация цитостатика была очень высокой, что приводило к гибели клеток, мы пришли к выводу, что увеличение центрального пика МБС указывает на гибель клеток. Нам удалось создать карту распределения частоты центрального пика МБС клеток, которая коррелирует с жесткостью клеток. Определение наиболее жестких частей клеток с использованием данных МБС высокого разрешения в настоящее время является сложным, но ясно, что клеточная мембрана и ее центральная область демонстрируют наивысшие значения для центрального пика в спектре МБС, что также подтверждает их повышенную жесткость.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 23-13-00373.

Определение флавоноидов на основе их комплексообразования с ионами Tb^{3+} методом поверхностно-усиленной Рамановской спектроскопии

*Бартошевич А. А., Яренков Н. Р., Капитанова О. О., Веселова И. А.
МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, nastenabarto@mail.ru*

Окислительный стресс является причиной развития многих серьезных заболеваний, таких как рак, атеросклероз, гипертония, ишемическая болезнь сердца, сахарный диабет и др. Флавоноиды, содержащиеся в различных растениях, являются природными антиоксидантами и способствуют ингибированию процесса свободно-радикального окисления, а также активируют ферментные антиоксидантные системы организма. В клинической практике назначение диет, богатых флавоноидами и другими антиоксидантами, применяется для профилактики и коррекции состояний, связанных с окислительным стрессом. В связи с этим, актуальным является контроль содержания флавоноидов, как в биологических жидкостях (кровь, моча), так и в растительном сырье, которое применяется для производства биологически активных добавок.

Для применения в вышеуказанных областях часто требуются быстрые и чувствительные методы, для которых пробоподготовка минимальна, либо отсутствует вовсе. Спектроскопические методы анализа, на основе которых возможно создание портативных приборов, подходят для массового скрининга биологических жидкостей и контроля качества растительного сырья. Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) или метод поверхностно-усиленной Рамановской спектроскопии является простым в исполнении и неразрушающим методом. Благодаря использованию металлических наноструктур, на поверхности которых реализуется плазмонный резонанс, происходит значительное усиление сигнала комбинационного рассеяния (типичные значения коэффициента усиления 10^4 - 10^6). Таким образом, метод спектроскопии ГКР, характеризующийся высокой селективностью и чувствительностью, является перспективным подходом для определения содержания флавоноидов. К тому же, применение портативных Рамановских спектрометров позволит проводить измерения на месте отбора проб, что, в свою очередь, способствует проведению экспрессного скрининга биообъектов.

Образование комплексов флавоноидов и редкоземельных металлов – известный подход к увеличению чувствительности определения растительных полифенолов за счет изменения спектральных характеристик близких по структуре соединений. Метод спектроскопии ГКР в сочетании с индикаторными реакциями комплексообразования может быть использован для определения флавоноидов в различных матрицах, благодаря усилению сигнала, которое обуславливается комбинацией применения плазмонных поверхностей и изменения спектральных свойств аналитов при координации с ионами Tb^{3+} .

В этой работе была изучена возможность определения рутина, кверцетина и дигидрокверцетина в водно-спиртовых растворах с помощью индикаторной реакции с ионами Tb^{3+} методом ГКР с использованием в качестве плазмонной поверхности медной фольги с нанесенными сферическими наночастицами серебра. Предел обнаружения рутина и кверцетина составил, соответственно, $8,5 \cdot 10^{-6}$ М и $5,7 \cdot 10^{-5}$ М.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ 23-13-00276.

Сопоставление возможностей поляризационного флуоресцентного иммуноанализа и амперометрических тирозиназных иммуносенсоров в определении хлорамфеникола

*Бейлинсон Р.М.¹, Явишева А.А.¹, Цуй Ичень¹, Ян Цыбо¹, Куксенюк А.А.¹,
Медянцева Э.П.¹, Заиров Р.Р.², Еремин С.А.³*

¹Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Казань,

²Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова, Казань,

³Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва,
rvarlamo@mail.ru

Предложены вариант ПФИА и амперометрического иммуносенсора с тирозиназой в качестве метки для чувствительного и селективного определения антибиотика хлорамфеникола

В качестве метки при разработке методики ПФИА использовали зеленый флуоресцентный комплекс тербия (III), который оказался чувствительным для определения хлорамфеникола.

Для обеспечения максимального значения аналитического сигнала были подобраны разведения трейсера - 1:10 и антител – 4×10^{-2} мг/мл. Оптимальное время инкубации иммунного комплекса: трейсер - антитело составило 5 мин. Линейный диапазон градуировочной зависимости поляризации флуоресценции от концентрации аналита наблюдался в области концентраций 1×10^{-7} – 1×10^{-11} М.

В качестве метки при разработке амперометрического ИФС для определения хлорамфеникола использовали фермент тирозиназу. Действие сенсора основано на сочетании иммунологической, ферментативной и электрохимической реакциях, приводящих к эффектам «квазиингибирования».

Разработанный амперометрический иммуносенсор для определения хлорамфеникола позволил определять его в более узкой области концентраций – от 1×10^{-9} М до 1×10^{-6} М, c_n 8×10^{-10} М. Условия проведения анализа : разведение Ат 1:200, время проведения анализа – 10 мин.

Разработанные методики для определения хлорамфеникола апробированы в анализе пищевых продуктов (молоко). Погрешность определения не превышает 0.075.

Силикатные наночастицы, допированные бипиридилными комплексами рутения, для определения амитриптилина поляризационным флуоресцентным иммуноанализом

*Брусницын Д.В.¹, Рамазанова Э.Р.¹, Медянцева Э.П.¹, Федоренко С.В.²,
Мустафина А.Р.², Улахович Н.А.¹, Еремин С.А.³*

¹Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Казань,

²Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова, Казань,

³Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва,
emedyant@gmail.com

Интерес к функциональным НЧ, полученным на основе оксида кремния в последние годы значительно возрос. Преимуществом таких НЧ является их большая стабильность по сравнению с органическими полимерными матрицами, возможностью функционализации внешней поверхности и защиты внутреннего содержимого от внешних воздействий.

В качестве флуоресцентной метки для поляризационного флуоресцентного иммуноанализа (ПФИА) были выбраны силикатные НЧ (диаметр – 46 нм), допированные высоколюминесцентными комплексами Ru (II) с бипиридилем, $[\text{Ru}(\text{dipy})_3]\text{Cl}_2@\text{SiO}_2$, которые обладают высокой интенсивностью флуоресценции, химической инертностью, наличием функциональных групп для связывания с антигенами, в роли которых могут выступать лекарственные вещества, в частности антидепрессанты. Мольное соотношение Si:Ru составило 1 : 100.

В спектрах поглощения дисперсии $[\text{Ru}(\text{dipy})_3]\text{Cl}_2@\text{SiO}_2$ имеются полосы при 244; 252; 285, 424; 451 нм, характеристичные для трис-бипиридила Ru (II). Данные динамического светорассеяния для $[\text{Ru}(\text{dipy})_3]\text{Cl}_2@\text{SiO}_2$, в частности относительно небольшой отрицательный дзета-потенциал (-20.7 мВ) по сравнению с аналогичными НЧ, не содержащими $[\text{Ru}(\text{dipy})_3]^{2+}$ (-48 мВ), подтверждают выход комплексов Ru (II) из полимерной матрицы и его частичную адсорбцию на силикатной поверхности.

Использовали Ат против трициклических антидепрессантов (ТЦА) и трейсер на основе нековалентно амитриптилин-модифицированных силикатных НЧ. Подтверждением адсорбции ТЦА могут служить данные динамического светорассеяния: изменение дзета-потенциала с -48 мВ до -37 мВ для недопированных и с -20.7 до -8 мВ для допированных силикатных НЧ. Установлено, что на фоне модельной урины возможно определение амитриптилина в области концентраций 1×10^{10} – 1×10^{-5} М с c_n 8×10^{-11} М. Поскольку возможна иммобилизация антител на поверхности ячеек полистирольных плашек, то систему Ат, трейсер на основе силикатных НЧ допированных высоколюминесцентными бидипиридилными комплексами Ru (II) – амитриптилин, амитриптилин в исследуемом образце, можно рассматривать как биосенсорную систему для определения антидепрессантов на примере определения амитриптилина.

Цветометрическое определение катехоламинов с использованием кремниевых наноточек

*Васильева А.А., Матяш М.В., Аняри В.В., Максимов С.В., Дмитриенко С.Г.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
химический факультет, Москва,
6490351@gmail.com*

Кремниевые наноточки за счет своих оптических свойств, хорошей стабильности и низкой токсичности находят всё большее применение в роли своеобразных сенсоров для определения различных веществ. Особый интерес представляет определение биологически активных веществ, в частности, катехоламинов (дофамин, норадреналин и адреналин), выполняющих ряд регуляторных функций в организме человека, актуальна разработка новых простых и доступных способов их определения.

Целью данной работы является разработка способа цветометрического определения катехоламинов с использованием кремниевых наноточек.

Ранее было показано, что взаимодействие катехоламинов с кремниевыми наноточками (SiNDs) приводит к изменению спектров люминесценции SiNDs: в случае дофамина уменьшается интенсивность люминесценции при 445 нм, в случае норадреналина и адреналина – помимо уменьшения интенсивности люминесценции при 445 нм наблюдается появление максимума при 500 или 510 нм, соответственно. Поскольку SiNDs и продукты их взаимодействия с катехоламинами обладают люминесценцией в видимой области спектра, целесообразно изучить возможность цветометрического определения катехоламинов с использованием SiNDs.

Показана возможность цветометрического определения катехоламинов с помощью цифрового фотоаппарата и смартфона. В качестве источников возбуждения использовали лампу и диод с длинами волн излучения 395 нм и 360 нм, соответственно. В качестве аналитических сигналов рассматривали координаты цвета в системах RGB, CMYK, Lab, а также некоторые их комбинации. Показано, что при использовании лампы в качестве источника ультрафиолетового излучения достигаются лучшие значения пределов обнаружения для всех трёх катехоламинов: при использовании фотоаппарата 7 мкМ, 0.1 мкМ и 1 мкМ, смартфона – 12 мкМ, 0.3 мкМ и 5 мкМ для дофамина, норадреналина и адреналина, соответственно. Данные получены для координаты евклидово расстояние в системе CMYK. При использовании фотоаппарата и других комбинаций координат в качестве аналитических сигналов можно снизить пределы обнаружения адреналина и дофамина: до 0.1 мкМ для адреналина (комбинация координат L-a+b) и до 1 мкМ для дофамина (комбинация координат R+G+B).

Проведен анализ лекарственных препаратов «Дофамин-Ферейн» (Брынцалов-А ЗАО, Россия), «Адреналина гидрохлорид – Виал» (ВИАЛ, Китай) и «Норадреналин» (ЗАО «ЭкоФармПлюс», Россия), результаты цветометрического определения хорошо согласуются с данными люминесцентного и ВЭЖХ анализа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №24-23-20004), <https://rscf.ru/project/24-23-20004/>.

Исследование проведено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета "Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды" при поддержке ЦКП МГУ «Нанохимия и наноматериалы».

Определение аспартама модифицированными амперометрическими сенсорами

Выборный А.Ю., Кузин А.А., Зяблов А.Н.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж,

alex-n-z@yandex.ru

Несомненно, на сегодняшний день сфера экспресс-детектирования является одной из наиболее перспективных областей аналитической химии. Однако особое внимание уделяется не только времени анализа, но и возможности проводить его в «полевых» условиях. Одним из интересных решений здесь является применение модифицированных сенсорных систем. Наиболее привлекательными модификаторами являются полимеры с молекулярными отпечатками (ПМО). Эти полимеры имеют ряд преимуществ перед другими модификаторами (например белками или антителами), они гораздо стабильнее в отношении температуры, pH или органических растворителей, а также большинство из них не требуют особых условий хранения.

В данной работе были разработаны амперометрические сенсоры, модифицированные полимером с молекулярным отпечатком для экспресс-определения аспартама. Данное вещество является широко распространенным подсластителем, также известное как пищевая добавка E951. Однако вопрос о его безопасности до сих пор является одним из самых обсуждаемых и противоречивых. Известно, что аспартам может негативно влиять на организм при превышении допустимых доз, особенно у людей с фенилкетонурией, а в 2023 году ВОЗ признала его возможным канцерогеном. Для изготовления сенсоров использовали метод термотрансфера, которые позволяет изготавливать двумерные электроды практически любой формы. В качестве подложки использовали медную фольгу толщиной 35 мкм на стеклотекстолите. Полученные двухэлектродные сенсоры модифицировали полимером с молекулярным отпечатком аспартама. Для этого предполимеризационную смесь, состоящую из сополимера 1,2,4,5-бензолтетракарбоновой кислоты с 4,4'-диаминодифенилоксидом смешивали со водно-спиртовым раствором аспартама. Полученную смесь наносили на поверхность электродов, а после проводили термоимидизацию для получения ПМО-пленки. Далее проводили анализ модельных растворов в статических условиях, на установке, разработанной на кафедре аналитической химии ВГУ. График зависимости аналитического сигнала от концентрации линейен ($R^2 > 0,98$) Правильность определения оценивали с помощью метода «введено-найдено». Рабочий диапазон концентраций составил 10^{-3} г/дм³ - 1 г/дм³) величина Sg не превышает 10%.

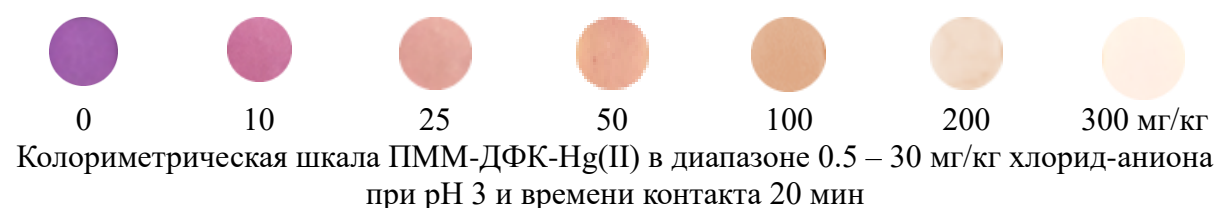
Цифровая колориметрия при определении неорганических хлоридов на полиметакрилатных сенсорах

*Заика А.А., Кожемякин Н.А., Серебряков К.В., Гавриленко М.А., Волгина Т.Н.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,
dce@mail.ru*

Для определения содержания неорганических хлоридов в сырой нефти и водно-нефтяных эмульсиях разработан способ, основанный на обработке цифрового изображения колориметрического сенсора. Прозрачный полиметакрилатный сенсор объединяет функции формирования цветового сигнала и концентрирования аниона хлорида в несколько раз, по сравнению с его содержанием в нефти. Изменение цвета от красно-фиолетового к светло-оранжевому основано на разрушении хлоридом окрашенного комплекса Hg(II) с дифенилкарбазоном в среде прозрачного полиметакрилатного сенсора. Сенсор соответствует требованиям направления «зеленая химия», поскольку катион ртути остается в объеме полимера и не поступает в окружающую среду.

Неорганический хлорид экстрагируют в объем сенсора с последующим колориметрическим определением количества по цифровому изображению. Цифровые изображения сенсора преобразуют в красные, зеленые и синие (RGB) каналы цветовых координат с помощью смартфона, затем используют алгоритм обработки цветного изображения, который вычисляет среднее значение цветовых координат RGB. Колориметрическая методика позволяет проводить определение неорганических анионов хлорида в диапазоне 2 – 300 мг/кг с пределом обнаружения 0.5 мг/кг.

Сочетание избирательной твердофазной экстракции хлоридов в прозрачную полиметакрилатную матрицу и цифровой колориметрии с использованием смартфона позволило создать простой в использовании и экологически чистый способ контроля неорганических хлоридов. В сравнении с лабораторными методиками, модифицированная полиметакрилатная матрица представляет собой готовую колориметрическую систему с быстрым получением результата для контроля неорганических хлоридов в сырой нефти непосредственно на месте отбора пробы.



Оптимальные условия определения СГ рассчитаны на основе графиков поверхности отклика, которые показали эффективность экстракции в диапазоне pH 2–4. По сравнению с традиционными протоколами и, главным образом, с условиями метода ASTM D 6470 (нагревание сырой нефти и смеси органических растворителей ксилола, ацетона и изопропилового спирта), предлагаемая экстракция позволяет сократить образование отходов, исключает миграцию катиона Hg(II) и избежать использования любых органических растворителей.

Прозрачный полиметакрилатный сенсор позволяет экстрагировать анионы из многокомпонентных образцов с минимальной пробоподготовкой и затем осуществлять их цифровое колориметрическое определение.

Наночастицы оксида Ce-La, оксида Ce-Yb

Горячева Е.А.¹, Строкин П.Д.¹, Горячева О.А.¹, Попова Н.Р.², Горячева И.Ю.¹
¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов,

²Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, Пущино, Москва,
6490351@gmail.com

Наночастицы (НЧ) на основе оксида Ce-La, Ce-Yb выделяются высокой термической стабильностью [1], кислородной нестехиометрией [2] и антиоксидантной активностью, что обеспечивает их широкий потенциал применения в различных областях науки и техники, включая твердооксидные топливные элементы, сенсорные устройства и фотокатализ [3]. На данный момент для синтеза НЧ Ce-La и Ce-Yb оксидов применяются различные методы, однако они довольно сложные и трудоёмкие. Аналогом существующим методам является метод высокотемпературного металлорганического синтеза, который позволяет получить НЧ с низкой дисперсией по размерам и высоким качеством кристаллической решетки.

В данной работе получены НЧ оксида Ce-La, оксида Ce-Yb, стабилизированные олеиновой кислотой, методом высокотемпературного металлорганического синтеза, а также проведена характеристика их оптических свойств, размера и морфологии с использованием спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии соответственно.

Работа выполнена при поддержке фонда (проект № 22–63–00082).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Si R, Zhang Y-W, Wang L-M, Li S-J, Lin B-X, Chu W-S, Wu Z-Y and Yan C-H Enhanced Thermal Stability and Oxygen Storage Capacity for Ce xZr1-xO2 (x = 0.4–0.6) Solid Solutions by Hydrothermally Homogenous Doping of Trivalent Rare Earths // J. Phys Chem. – 2007. – Т. 111 – С. 787–94
2. Иванов В. К., Баранчиков А. Е., Полежаева О. С., Копица Г. П., Третьяков Ю. Д. Кислородная нестехиометрия нанокристалла диоксида церия // Журнал неорганической химии – Т. 55. – № 3. – С. 364-367.
3. Santha N. I., Sebastian M. T., Mohanan P., Alford N. McN., Sarma K., Pullar R. C., Kamba S., Pashkin A., Samukhina P. and Petzelt Effect of Doping on the Dielectric Properties of Cerium Oxide in the Microwave and Far-Infrared Frequency Range // J of the American Ceramic Society – 2004. – Т. 87. – С. 1233–1237.

Синтез перовскитных квантовых точек *in situ* в электропряденых волокнах

*Демина П.А., Кожевников И.О., Сердобинцев А.А.
Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского,
Научный медицинский центр, Саратов, polina.a.demina@list.ru*

Гибкие материалы с перовскитными квантовыми точками широко используются в области фотоники и оптоэлектроники благодаря своим уникальным свойствам. Разработка новых материалов на основе этих наночастиц, включенных в состав гибких и легких нетканых материалов, продемонстрировала высокую фотопроводимость и эффективное преобразование световой энергии. В данном исследовании предлагается способ создания стабильного люминесцентного нетканого материала с использованием метода электроформования, в котором используются растворы неорганических солей без необходимости в дополнительных стабилизаторах. Эквимолярные растворы цезия и бромида свинца (II) смешивались с раствором формовочного полимера (фторопласт Ф42Л), в результате чего была получена серия образцов. Были получены люминесцентные материалы, содержащие перовскитные квантовые точки состава CsPbBr₃, с пиками эмиссии в диапазоне от 507 до 517 нм при длине волны возбуждения 365 нм. Было экспериментально установлено и теоретически подтверждено, что положение пика связано с размером частиц, образующихся в волокне при электроформовании, и зависит от времени процесса. Разработанные материалы демонстрируют стабильные люминесцентные свойства в течение 2.5 лет, что делает их перспективным кандидатом для разработки новых гибких оптоэлектронных устройств на основе перовскитных квантовых точек.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект 24-23-00481, <https://rscf.ru/project/24-23-00481/>.

Выявление фальсификации пищевых продуктов методами цифровой цветометрии и ближней ИК-спектроскопии

Емельянов О.Э.¹, Амелин В.Г.^{1,2}

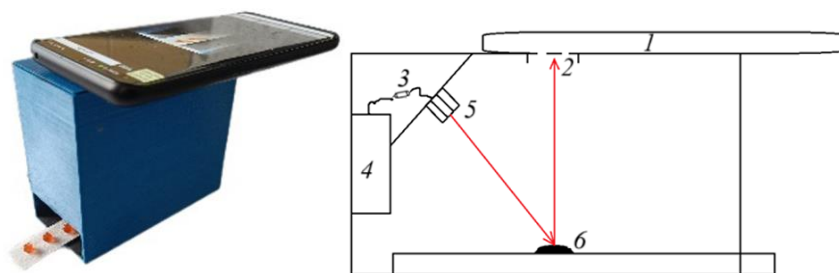
¹*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир*

²*Всероссийский государственный центр качества и стандартизации лекарственных средств для животных и кормов, г. Москва*

В последние годы наблюдается увеличение доли сбыта фальсифицируемых продуктов питания отечественного и импортного производства, что потенциально создает дополнительные риски для здоровья населения. Под фальсификацией понимается замена высококачественного сырья более дешевыми аналогами, добавление посторонних компонентов или искажение видового состава продукции.

Для выявления указанных видов фальсификации традиционно применяются физико-химические методы с использованием дорогостоящего аналитического оборудования. Несмотря на высокую точность, данные исследования требуют сложной пробоподготовки, значительных временных и материальных затрат, а также квалифицированного персонала.

В связи с этим представляют интерес неразрушающие экспресс-методы анализа: цифровая цветометрия и ближняя ИК-спектроскопия с преобразованием Фурье. Цифровая цветометрия основана на регистрации флуоресценции и диффузного отражения излучения различных диапазонов (УФ, видимый, ИК) с помощью цветометрического устройства и камеры смартфона. Ближняя ИК-спектроскопия позволяет получать спектральные "отпечатки" образцов без предварительной подготовки. Для обработки и интерпретации получаемых данных используются хемометрические алгоритмы. Применение данных подходов позволяет оперативно выявлять случаи фальсификации, обеспечивая высокую информативность и воспроизводимость результатов.



Внешний вид и блок-схема устройства для цветометрического анализа пищевых продуктов: 1 – смартфон, 2 – камера смартфона, 3 – резистор, 4 – источник питания, 5 – светодиоды, 6 – анализируемый образец

Исследование термической стабильности бычьего сывороточного альбумина под действием ненагревающего переменного магнитного поля

Калинова А.Е., Винокурова М.Д., Анисимов Р.А., Ломова М.В.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, s_kalinova03@mail.ru

Белки – высокомолекулярные органические соединения, участвующие в формировании клеточных и внеклеточных структур, передаче сигналов, иммунной защите и многих других фундаментальных процессах [1]. Функциональная целостность белков напрямую зависит от их структурной стабильности. Денатурация – это процесс потери белком своей нативной пространственной структуры под действием того или иного денатурирующего агента. Различают также обратимую и необратимую денатурацию [2]. Существует множество способов исследования стабильности белка. Различают физико-химические методы и теоретические методы.

К физико-химическим методам относятся: дифференциальная сканирующая микрокалориметрия, дифференциальная сканирующая флуориметрия и исследование влияния дисульфидных связей, а к теоретическим методам: компьютерное моделирование динамики белка и методы выделения жёстких фрагментов белка. О конформационной стабильности белка в исследовании можно судить с помощью собственной флуоресценции триптофана с максимумом возбуждения при 280 нм и максимумом эмиссии при 320-375 нм [3]. Флуоресценцию триптофана можно детектировать с помощью метода nanoDSF - нано-дифференциальной сканирующей флуориметрии [4]. Как правило, внутренние остатки триптофана в более гидрофобном окружении показывают заметный сдвиг красного края излучения с около 330 нм до 350 нм при разворачивании белка. Количественная оценка этих сдвигов длины волны флуоресценции в различных температурных диапазонах позволяет нам измерить температуру плавления, при которой 50% белка развернуто [5].

Объектами исследования являлись лизоцим и бычий сывороточный альбумин (БСА). В качестве буферов для белков использовались деионизированная вода, фосфатно-солевой буфер (PBS), ацетатный буфер, 4-(2-гидроксиэтил)-1-пиперазинэтансульфоновая кислота (HEPES). Концентрация белков в растворах во всех экспериментах составляла 0,5, 1,0 и 5,0 мг/мл. В качестве денатурирующего агента использовалась таниновая кислота. Исследование проводилось с использованием многофункционального анализатора стабильности белков PSA-16 (Bestscience&technology, Пекин, Китай).

Термическая стабильность лизоцима и БСА изучалась в различных буферах и при разных концентрациях белка в температурных диапазонах 23-90°C и 45-90°C. Из полученных данных можно сделать вывод, что лизоцим более стабилен в PBS и HEPES, БСА также более стабилен в PBS. БСА в концентрации 0,5 мг/мл денатурирует и разлагается медленнее, чем БСА 1,0 мг/мл. При добавлении к БСА таниновой кислоты в 16 различных концентрациях можно отметить, что температура плавления белка не изменяется. Термическая стабильность БСА анализировалась после воздействия переменного магнитного поля (100 мТл, 17, 34, 48, 95 Гц, 10 мин) и ультразвука (60% мощности, 15, 30, 45, 60 с). Температура плавления белка никак не изменяется в зависимости от условий воздействия. Образцы, подвергнутые магнитному воздействию, исследовались на изотермическую стабильность в течение 24 ч. При наличии

кратковременных участков пониженной флуоресценции кривые возвращались к прежнему значению интенсивности. Также моделировались ситуации использования и хранения белка в составе лекарственного препарата, т.е. приём препарата пациентом (резкое изменение температуры с 25 до 37 °С) и несколько циклов «холодильник-комнатная температура». Стабильность белка сохранялась в случае моделирования приёма препарата, однако в случае нескольких циклов белок начинал претерпевать необратимые изменения своей третичной структуры на этапах 4-5. Все исследования с БСА показали, что он является хорошим реагентом для использования в капсуле лекарственного носителя для таргетированной доставки с использованием ЭНЧ-ПМП.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, РНФ 23-13-00373 "Механизм противоопухолевого действия переменного негреющего магнитного поля *in vitro* и *in vivo*".

Список использованных источников:

1. Kuril, A. K. Differential Scanning Calorimetry: A Powerful and Versatile Tool for Analyzing Proteins and Peptides // *Journal of Pharmaceutical Research International*. –2024. – Vol. 36, No. 7. – pp. 179–187.
2. Recoulat Angelini, A. A.; Roman, E. A.; González Flecha, F. L. The Structural Stability of Membrane Proteins Revisited: Combined Thermodynamic and Spectral Phasor Analysis of SDS-Induced Denaturation of a Thermophilic Cu(I)-Transport ATPase // *Journal of Molecular Biology*. – 2024. – Vol. 436, No. 16. – p. 168689.
3. Gooran, N.; Kopra, K. Fluorescence-Based Protein Stability Monitoring—A Review // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2024. – Vol. 25, No. 3. – p. 1764.
4. Schmidt, D.; Wohlers, A.; Kuhnert, N. Promiscuity in Polyphenol–Protein Interactions—Monitoring Protein Conformational Change upon Polyphenol–Protein Binding by Nano-. Differential Fluorimetry (Nano-DSF) // *Molecules*. – 2025. – Vol. 30, No. 4. – p. 965.
5. Malicka, W.; Dai, Y.; Herrmann, A.; Haag, R.; Ballauff, M.; Pigaleva, M.; Risse, T.; Lauster, D.; Asakereh, I.; Khajehpour, M. Measuring the Thermal Unfolding of Lysozyme: A Critical Comparison of Differential Scanning Fluorimetry and Differential Scanning Calorimetry // *ChemistryOpen*. – 2025. – Vol. 14, No. 6. – e202400340.

**Выделение гомогенных люминофоров углеродных точек
из лимонной кислоты и этилендиамина:
связь их структуры и свойств с рН**

*Корепанова А.А., Лаптинский К.А., Доленко Т.А.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, Москва,
korepanova.aa20@physics.msu.ru*

Углеродные точки (УТ) являются одним из наиболее перспективных наноматериалов для применения в различных задачах биомедицины и наносенсорики. Углеродным точкам присуща уникальная совокупность свойств: стабильная интенсивная фотолюминесценция, химическая стабильность, биосовместимость, низкая токсичность, диспергируемость и чувствительность к изменению физико-химических параметров окружающей среды. УТ достаточно просты в получении и обладают широкой вариативностью структуры благодаря большому выбору методов синтеза и возможных прекурсоров, что позволяет оптимизировать их молекулярный состав для применения в конкретных задачах. В классическом представлении УТ описывают как квазисферические наночастицы, состоящие из углеродного ядра, покрытого различными функциональными группами. Однако при синтезе снизу-вверх (например, гидротермальный синтез) чётко оформленного углеродного ядра может не образовываться – частицы будут иметь полимерную структуру. В таком случае для эффективного применения УТ осуществляется их фракционирование.

Объектами исследования в данной работе являются 2 вида УТ, синтезированных гидротермальным методом из лимонной кислоты и этилендиамина. УТ отличались по концентрации этилендиамина в составе прекурсоров. Все синтезированные наночастицы были разделены на фракции при помощи горизонтального электрофореза. Каждая фракция была подробно исследована методами фотолюминесцентной (в том числе время-разрешённой) спектроскопии, спектроскопии оптического поглощения и ИК спектроскопии в трёх диапазонах значений рН. В результате анализа полученных данных были выделены фракции с наибольшим и наименьшим значениями квантового выхода люминесценции, обнаружены фракции, которые сохраняются в составе УТ при увеличении концентрации этилендиамина. На основе изменения спектральных характеристик УТ при протонировании/депротонировании их функциональных групп сделаны выводы о молекулярном составе люминофоров каждой фракции.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-12-00138-П, <https://rscf.ru/project/22-12-00138/>.

Изучение механизма тушения люминесценции сплавных квантовых точек CdZnSeS/ZnS доксорубицином

*Данила А. Корнилов, Дарья В. Цюпка, Даниил Д. Дрозд, Ирина Ю. Горячева.
Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов*

Разработка аналитических систем, основанных на тушении люминесценции, дает возможность получать высокочувствительные и селективные методы определения различных соединений. Важным этапом в разработке таких аналитических систем является понимание взаимодействия люминофора и тушителя, поскольку это позволяет лучше понять механизм тушения и, таким образом, повысить производительность аналитической системы. Тушение люминесценции происходит за счет межмолекулярных взаимодействий, образования химических связей или переноса энергии/электрона в зависимости от природы частиц. В первую очередь тушение люминесценции подразделяют на статическое, динамическое или при одновременном присутствии – комбинированный механизм. В нашей работе в качестве люминофора использовались квантовые точки CdZnSeS/ZnS, покрытые тиогликолевой и меркаптопропионовой кислотами. Квантовые точки, таким образом, выполняют функцию наносенсора в экспериментальной аналитической системе для определения тушителя – антрациклинового антибиотика доксорубицина.

Работа была выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект №23-13-00380.

Колориметрическое определение тетрациклина по собственной флуоресценции в полиметакрилатной матрице

*Кузнецова Д. Е., Саранчина Н. В., Гавриленко Н. А., Гавриленко М. А.
ХФ НИ ТГУ, Томск, Kuznetsova.Darya.2003@stud.tsu.ru*

Актуальность выбранной темы обусловлена необходимостью решения проблемы распространения антибиотикорезистентности, вызванной бесконтрольным применением тетрациклинов в медицине, ветеринарии и сельском хозяйстве. Эти соединения накапливаются в окружающей среде и пищевых продуктах, создавая серьезную угрозу для здоровья населения. В связи с этим разработка высокочувствительных и доступных методов детекции остаточных количеств тетрациклинов приобретает особое значение.

Классические методы анализа (ВЭЖХ, флуориметрия, капиллярный электрофорез), широко применяемые для определения тетрациклина, требуют дорогостоящего оборудования, сложной пробоподготовки и высокой квалификации персонала, что ограничивает их применение в рутинных исследованиях. В отличие от них, сорбционно-цветометрические методы на основе твердой фазы, сочетают простоту выполнения, низкую стоимость и возможность определения аналитов без использования сложной аппаратуры. Это делает их перспективными для разработки современных тест-систем. В условиях, когда требуется массовый анализ (например, мониторинг окружающей среды или контроль безопасности пищевой продукции), такие методы становятся оптимальным решением.

В работе предложено применение полиметакрилатной матрицы (ПММ) в качестве твердофазного экстрагента тетрациклина, которая позволяет проводить его концентрирование и выступает средой для формирования аналитического сигнала. Это дает возможность определять антибиотик непосредственно в твердой фазе матрицы, исключая стадию элюирования. ПММ получали радикальной блочной полимеризацией с использованием метилметакрилата с добавлением полиэтиленгликоля. Для работы из исходного образца были получены пластинки размером 4×4 мм и толщиной 0.5÷0.6 мм. Установлены оптимальные условия извлечения тетрациклина из растворов (рН 8–11, форма однозарядного аниона), обеспечивающие максимальную эффективность процесса. При взаимодействии анализируемого раствора с матрицей наблюдается изменение интенсивности собственной желто-зеленой флуоресценции тетрациклина в твердой фазе при облучении УФ-светом (365 нм). Интенсивность флуоресценции пропорциональна концентрации тетрациклина в анализируемом растворе. Определение проводили путем измерения колориметрических характеристик флуоресценции с помощью ультрафиолетового аналитического кабинета «УФК-НД» без использования дополнительных реагентов. В качестве аналитического сигнала использовали ΔE (цветовое различие) в системе RGB. Содержание тетрациклина определяли по градуировочной зависимости, построенной в аналогичных условиях.

Предлагаемый подход, основанный на применении твердой, прозрачной, химически устойчивой полиметакрилатной матрицы для экстракции, концентрирования и детекции тетрациклина, соответствует принципам «зеленой» аналитической химии и открывает новые возможности для создания портативных тест-систем, востребованных при контроле безопасности пищевой продукции и мониторинге окружающей среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту № 25-23-20058 и администрации Томской области.

Прозрачный композит на основе полиметилметакрилата с наночастицами золота для определения тетрациклина методами флуориметрии и колориметрии

*Кузнецова Д. Е., Саранчина Н. В., Гавриленко Н. А.
ХФ НИ ТГУ, Томск, Kuznetsova.Darya.2003@stud.tsu.ru*

В работе продемонстрировано применение композитного материала на основе полиметилметакрилата с наночастицами золота для определения тетрациклина методами твердофазной флуориметрии и колориметрии. Определение тетрациклина является актуальной задачей вследствие его широкого применения. Он используется в животноводстве, в качестве профилактики или лечения инфекционных заболеваний у животных, в сельском хозяйстве, а также для лечения инфекционных заболеваний у людей. Длительное или чрезмерное применение антибиотика приводит к его накоплению в продуктах питания животного происхождения, что может вызвать развитие устойчивых к антибиотику форм бактерий. Предложено множество подходов к определению тетрациклина, однако по-прежнему актуальной остается задача извлечения тетрациклина из различных по сложности состава объектов. Твердофазная экстракция позволяет проводить извлечение аналитов из жидкого образца с помощью твердого экстрагента, и, в отличие от жидкостной экстракции, не требует использования токсичных органических растворителей.

В настоящее время перспективным является флуоресцентный метод определения тетрациклина благодаря его низкой стоимости, простоте эксплуатации и небольшому количеству этапов пробоподготовки. Разработка новых флуоресцентных зондов на основе металлических наночастиц золота повышает чувствительность и селективность обнаружения различных аналитов за счет их уникальных оптических и плазмонных свойств.

Иммобилизацию Au(III) в ПММ проводили путем твердофазной экстракции из раствора золотохлористоводородной кислоты концентрации 2.5-25 мг/л в течение 3 минут. Далее пластины ПММ-Au(III) опускали в раствор восстановителя (0,01 % раствор NaBH₄ / 5 % раствор аскорбиновой кислоты) и перемешивали в течение 5 мин. Для определения содержания тетрациклина ПММ-Au⁰ опускали в растворы аналита с разным значением pH, объемом 4-40 мл и перемешивали в течение 30-60 минут с нагреванием до 60 °С и без него.

Количественное определение антибиотика проводили по его собственной флуоресценции при 520 нм, усиливающейся за счет наночастиц золота в полимерной матрице. Интенсивность сигнала линейно зависела от концентрации тетрациклина в растворе при pH 7,5–9,5. Исследовано влияние концентрации наночастиц золота в полиметакрилатной матрице, объема раствора тетрациклина и температуры нагревания раствора тетрациклина на величину аналитического сигнала. Также показана возможность количественного определения тетрациклина путем измерения цветометрических характеристик желтой флуоресценции с последующим установлением зависимости величины аналитического сигнала от содержания тетрациклина в анализируемом растворе и его оценкой. В качестве аналитического сигнала использовали рассчитанное значение ΔE (цветовое различие) в системе RGB. Такой подход сочетает простоту выполнения, низкую стоимость, возможность определения аналитов без использования сложной аппаратуры и является перспективным для разработки современных тест-систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту № 25-23-20058 и администрации Томской области.

Определение маркёров воспаления ЖКТ в слюне с применением простых тестов с люминофорами

Кучменко Т.А.^{1,2}, Вандышев Д.Ю.¹, Копалева А.Г.², Леденёва И.В.¹, Недикова Д.О.²

¹*Воронежский государственный университет,*

²*Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж
E-mail: Tak1907@mail.ru*

Простые тесты, по которым можно судить о работе организма для своевременного выявления развития провокации – один из вызовов аналитической химии. Ключом для возможности ранней диагностики заболевания и других задач персональной медицины являются биомаркёры, в частности ЛОС, которые можно применять как индикатор наличия/отсутствия сбоев, степени их тяжести. В практике наиболее приоритетны световые и цветовые изменения на маркеры, поэтому изучены возможности органических люминофоров класса азолотриазинов в качестве аналитических реагентов в простых тест-системах. Синтезированы органические люминофоры класса азолотриазинов с привитыми группами для целевой направленной реакции на аммиак и амины. Оценку взаимодействия водного раствора веществ-маркёров с люминофорами проводили на целлюлозной бумаге, пластинах «Silufol» и ватном тупфере. Изменение люминесценции реагента регистрировали при 365 нм. В качестве оптимальных поверхностей для проведения теста определены пластины для ТСХ и ватный тупфер. Выделены люминофоры для идентификации аммиака по усилению люминесценции, изо-, *n*-бутиламинов по уменьшению люминесценции. Люминофоры этил (*E*)-4-(2-(диметиламино)винил)пиразоло[5,1-*c*][1,2,4]триазин-3-карбоксилаты **A** (независимо от заместителей в пиразольном фрагменте) и 2-(6-оксоимидазо[1,2-*b*]пиридо[4,3-*e*][1,2,4]триазин-7(6*H*)-ил)уксусная кислота **B**, могут эффективно использоваться для обнаружения лёгких аминов в биопробах. В свою очередь, 2-(6-оксоимидазо[1,2-*b*]пиридо[4,3-*e*][1,2,4]триазин-7(6*H*)-ил)этан-1-сульфоная кислота **B** предназначена для выявления аммиака, а имидазо[1,2-*b*][1,2,4]триазин-2-карбоновая кислота **Г** функционирует как универсальный реагент. Положительно оценено применение 4х органических красителей с эффектом свечения для детектирования аммиака и лёгких аминов в жидкой фазе. Реагенты применены для детектирования маркёров воспаления ЖКТ по слюне (ротовой жидкости). Слюна отбиралась у испытуемых до и после принятия карбамида. Биопробу анализировали капельным способом с аммиак-селективным красителем **B**. Результаты теста фиксировали с помощью оптического денситометра при искусственном свете, в УФ-лучах оптического прибора и карманного фонарика. Установлена высокая корреляция с дыхательными тестами для добровольцев с доказанным поражением слизистой хеликобактерией. Быстрый и простой способ выявления аммиака и аминов с хорошей визуальной детекцией позволит существенно упростить контроль пролечивания и оценку воспаления в ротовой полости и желудочно-кишечном тракте.

Исследование выполнено при поддержке Российского Научного Фонда, проект № 25-16-00191, <https://rscf.ru/project/25-16-00191/>.

Определение локального воспаления в ротовой полости по визуальным следам летучих соединений

Кучменко Т.А.^{1,2}, Вандышев Д.Ю.¹, Умарханов Р.У.², Недикова Д.О.²

Солаиман Махер Анис³, Ипполитов Ю.А.³

¹Воронежский государственный университет,

²Воронежский государственный университет инженерных технологий,

³Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко

Tak1907@mail.ru

Воспаление десен – поверхностное / глубокое поражение тканей пародонта, в которые попадают бактерии или налет. Предшественники заболевания - гингивит, пародонтит, а также механическое повреждение слизистой. В полости рта большое количество бактерий, которые являются собственной микрофлорой человека, зависят от его состояния и работы желудочно-кишечного тракта. Если иммунитет ослаблен сильным стрессом, несбалансированным питанием, системными заболеваниями, при гормональных перестройках во время беременности, подросткового периода развивается патогенная микрофлора, которая вызывает воспалительный процесс в мягких тканях десны. Вызвать воспаление десен могут также брекеты, особенно у детей-подростков.

Наиболее информативными биопробами для мониторинга локального процесса в полости рта являются зубной налет, ротовая жидкость. Установлено, что при отборе эти пробы отражают состояние и возможные нарушения в работе слизистой и позволяют прогнозировать развитие кариеса и пародонтита. Для установления отклонений и индивидуальной особенности микробиоты ротовой полости у подростков и взрослых оценили перспективность выявления очаговых и общих воспалений с помощью портативного «носа-диагноста» на основе восьми наноструктурированных сенсоров. В качестве селективного слоя применяли фазы наногидроксиапатита, комбинированные фазы на основе квантовых точек (КТ) сульфида кадмия в хитозане с модификаторами разной природы. Капельные реакции на тупфере после локальных мазков слизистой и налета проводили с реагентами 2-(6-оксоимидазо[1,2-*b*]пиридо[4,3-*e*][1,2,4]триазин-7(6*H*)-ил)уксусная кислота (обнаружение лёгких аминов в биопробах) и 2-(6-оксоимидазо[1,2-*b*]пиридо[4,3-*e*][1,2,4]триазин-7(6*H*)-ил)этан-1-сульфоная кислота для детектирования аммиака, а также фазами КТ.

Установлено, что кинетические особенности сорбции летучих соединений на фазах-реагентах микромасс, нанесенных на пьезосенсоры, позволяет быстро и с высокой вероятностью предсказать поведение люминофоров в визуальных тест-системах, что существенно упрощает оптимизацию и подбор реагентов для них. Амины и аммиак вызывают заметное уменьшение выхода люминесценции на тупферах с мазками слизистой при ее воспалении и изменение окраски фаз на основе КТ.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 25-16-00191,

<https://rscf.ru/project/25-16-00191/>.

Оценка возможности использования реакции восстановления Au(III) в полиметакрилатной матрице для определения содержания антиоксидантов

*Матвеев П.Д., Гавриленко Н.А., Саранчина Н.В.
Томский государственный университет, Томск, platonmatveyuk@gmail.com*

Одним из перспективных направлений в аналитической химии является использование наночастиц золота (НЧ Au) для определения различных аналитов благодаря их оптическим свойствам, проявляющимся в виде поверхностного плазмонного резонанса (ППР). В практике использования НЧ Au в анализе можно выделить несколько направлений, одно из которых основано на процессах формирования НЧ Au, приводящих к возникновению наносистем с ППР, свойства которых будут зависеть от факторов, оказывающих влияние на стадии их формирования. Такие системы могут быть использованы для определения восстановителей, участвующих в синтезе НЧ Au, например, антиоксидантов (АО).

Основной проблемой при работе с коллоидным раствором НЧ Au является многоэтапность и трудоемкость их синтеза, короткий период стабильности, для повышения которой используются поверхностно-активные вещества и стабилизирующие агенты. Преодолеть такие ограничения возможно путем иммобилизации золота в твердую фазу, преимуществами которой является как долговременная стабильность образующихся в результате восстановления НЧ Au, так и простота использования. В данной работе используется полиметакрилатная матрица (ПММ) в качестве твердофазного носителя Au(III) для получения НЧ Au. Целью работы являлось исследование возможности определения суммарного содержания антиоксидантов с использованием реакции восстановления Au(III) до НЧ Au в ПММ.

ПММ получали радикальной блочной полимеризацией с использованием метилметакрилата с добавлением полиэтиленгликоля. Для работы из исходного образца были получены пластинки размером 4×4 мм и толщиной 0.5÷0.6 мм. Иммобилизацию Au(III) в ПММ проводили путем твердофазной экстракции из раствора золотохлористоводородной кислоты концентрации 10 мг/л в течение 5 минут. Для определения содержания АО ПММ-Au(III) опускали в растворы АО с разным значением pH, разной концентрации объемом 3 мл и перемешивали в течение 20-30 минут с нагреванием до 50 °С и без нагревания.

Эксперимент показал следующие результаты: наиболее полное восстановление Au(III) до НЧ Au в ПММ наблюдалось в щелочной среде и при нагревании до 50°С. Реакция приводила к изменению окраски пластинок с бледно-жёлтой на серо-фиолетовую. На спектрах поглощения ПММ наблюдали полосу ППР, характерную для НЧ Au с максимумом поглощения, зависящим от природы АО, в области 520-580 нм.

Нами была рассмотрена возможность использования ПММ-Au(III) для определения содержания АО в зеленом чае методом колориметрической обработки цифрового изображения пластинок с использованием в качестве вещества-стандарта аскорбиновой кислоты. Полученные результаты суммарного содержания АО в чае сопоставимы с результатами, представленными в научной литературе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту № 25-23-20058 и администрации Томской области.

Молекулярно импринтированные материалы на основе органосиланов для молекулярного распознавания имазамокса

Меняйло И.Е., Пожаров М.В., Бурмистрова Н.А.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет

имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов

menyilo.ilya1997@gmail.com

Активное использование гербицидов в сельском хозяйстве, в частности имазамокса из группы имидазолинонов, позволяет эффективно бороться с сорняками и повышать урожайность культур. Однако способность данного гербицида накапливаться в почве и сельскохозяйственной продукции требует строгого контроля его остаточных количеств в пищевых продуктах и кормах. Традиционные методы анализа гербицидов, такие как хроматография с различным детектированием, отличаются высокой точностью, но требуют сложной пробоподготовки и дорогостоящего оборудования. Разработка селективных сенсоров для определения имазамокса вызывает определенные трудности. В связи с этим перспективным направлением является разработка сенсорных систем с использованием молекулярно-импринтированных полимеров (МИП). Функционализация различных поверхностей, в том числе наноматериалов, органосиланами и их дальнейшая модификация МИП является перспективным направлением при разработке сенсорных систем. Сочетание молекулярного импринтинга с различными сенсорами, например флуоресцентными или электрохимическими, позволяет создавать высокопроизводительные системы для обнаружения различных веществ с низким пределом обнаружения. Целью работы являлось получение наночастиц диоксида кремния, модифицированных импринтированным (3-аминопропил)триэтоксисиланом для селективного извлечения имазамокса и оценка возможности использования при создании селективного сенсора.

Сплавные квантовые точки как наносенсор для детекции доксорубицина в плазме крови

Мещерякова С.А., Дрозд Д.Д., Горячева О.А., Горячева И.Ю.

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов
meshceryakova.s.a@gmail.com*

Доксорубицин (Докс) – высокоэффективный фармацевтический препарат из группы антрациклиновых антибиотиков. Несмотря на свою высокую эффективность против многих видов раковых опухолей, Докс обладает значительным количеством побочных эффектов, включая высокую кардио-, цито- и нейротоксичность. Токсическое действие Докс обусловлено его способностью ингибировать синтез ДНК и РНК. Следовательно, необходимо постоянно мониторить концентрацию Докс в организме пациента, проходящего химиотерапию.

Склонность Докс к самоассоциации и изменению его свойств в зависимости от окружающей среды значительно изменяют его спектральные характеристики и делает мониторинг сложным, длительным и дорогостоящим. Разработали альтернативный метод определения Докс в плазме крови человека с использованием люминесцентного наносенсора на основе сплавных квантовых точек состава CdZnSeS/ZnS. В ходе исследования были подобраны оптимальные аналитические условия определения Докс, в частности концентрации наносенсора, диапазон концентраций препарата и разбавление плазмы. Расчетный предел обнаружения составил 0,02 мкг/мл. Определение Докс в плазме крови человека с использованием люминесцентного наносенсора на основе квантовых точек сравнили с классическими методами определения лекарственного препарата. Результаты разработанного метода хорошо сопоставимы с аналитическими характеристиками, полученными с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-13-00380.

Колориметрическое определение карбарила с помощью полиметакрилатной матрицы

*Митупов Б.Ц., Гага А.С., Елькин Е.С., Серебряков К.В., Гавриленко М.А., Волгина Т.Н.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск
dce@mail.ru*

Карбарил (КБР) — широко используемый карбаматный пестицид, который может представлять опасность для здоровья человека и окружающей среды. Традиционные методы его обнаружения, такие как газовая и жидкостная хроматография, требуют сложного оборудования и длительной подготовки проб. Колориметрические методы, основанные на изменении цвета, являются простой и экономичной альтернативой для быстрого обнаружения КБР. Разработан метод колориметрического определения карбарила с использованием полиметакрилатной матрицы, функционализированной наночастицами серебра (AgNP), что обеспечивает высокую чувствительность и визуальную детекцию.

Полиметакрилатная матрица синтезирована путем полимеризации метакриловой кислоты в присутствии перекиси бензоила. Для функционализации матрицы используются наночастицы серебра, синтезированные методом химического восстановления нитрата серебра (AgNO_3), экстрагированного из водного раствора, боргидридом натрия (NaBH_4). Полученный композит (ПММ-AgNP) охарактеризован методами УФ-видимой спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

При взаимодействии гидролизованного карбарила с ПММ-AgNP происходит изменение поверхностного плазмонного резонанса AgNP, что приводит к сдвигу максимума поглощения и видимому изменению цвета с желтого на оранжевый. Это изменение обусловлено образованием комплексов между карбарилом и функциональными группами матрицы, что вызывает вторичную функционализацию и, возможно, травление поверхности AgNP.

Образцы, содержащие карбарил, смешивают с ПММ-AgNP в буферном растворе (рН 7,0). Через 10 минут инкубации при комнатной температуре фиксируют изменение оптической плотности при 420 нм с помощью спектрофотометра или оценивают цвет цифровой колориметрией с использованием смартфона. Для количественного определения построена калибровочная кривая зависимости оптической плотности от концентрации КБР. Метод демонстрирует линейный отклик в диапазоне 1–50 мкМ с пределом обнаружения 0,5 мкМ.

Показано, что ПММ-AgNP проявляет селективность к карбарилу в присутствии ионов металлов (Cu^{2+} , Fe^{3+}) и других пестицидов.

Предложенный колориметрический метод на основе полиметакрилатной матрицы с AgNP позволяет определять карбарил в пищевых продуктах. Сочетание низкой стоимости, высокой чувствительности и портативности делает его перспективным для применения в полевых условиях и лабораториях контроля качества. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию матрицы для мультиплексного обнаружения других пестицидов и интеграцию с мобильными платформами для автоматизированного анализа.

Электрохимический сенсор на основе металлоорганического каркаса для определения трамадола

Шаброва Е.В., Бухаринова М.А., Стожко Н.Ю.

*ФГБОУ ВО Уральский государственный экономический университет, г. Екатеринбург
sny@usue.ru*

Трамадол является распространенным обезболивающим препаратом, используемым при сильной и умеренной боли. Чрезмерное и длительное употребление трамадола может вызвать зависимость и сопровождаться серьезными проблемами, связанными с центральной нервной системой и сердцем, затруднением дыхания. Для определения трамадола используют УФ-видимую спектроскопию, капиллярный электрофорез, различные варианты хроматографических методов (высокоэффективная жидкостная, тонкослойная, газовая), в том числе с масс-спектрометрическим детектированием. Несмотря на высокую чувствительность и точность, эти методы имеют ограничения. Хроматографические методы требуют использования дорогостоящего и сложного оборудования, вредных органических растворителей и больших временных затрат. Спектрофотометрические методы обладают невысокой селективностью из-за наложения спектров трамадола и других лекарственных средств в сложных образцах. Электрохимические методы лишены этих недостатков и характеризуются высокой точностью, чувствительностью, экспрессностью, широкими возможностями использования в полевых условиях благодаря применению модифицированных электродов. Перспективными материалами для целей модифицирования электродов являются металлоорганические каркасы (МОК) [1]. МОК представляют собой кристаллические пористые координационные полимеры с большой площадью поверхности [2]. Одним из известных МОК является ZIF-8. В узлах его трехмерной каркасной решетки находятся атомы цинка, соединенные метилимидазолатными органическими линкерами. ZIF-8 и графен использованы в составе композитного модификатора планарного углеродного электрода в данной работе. По хроноамперометрическим данным установлено, что модифицирование электродной поверхности сопровождается возрастанием площади электрода с 15 мм² до 24 мм², двукратным увеличением тока окисления трамадола и уменьшением его потенциала на 130 мВ по сравнению с немодифицированным электродом. Согласно кинетическим исследованиям электроокисление трамадола на электроде, модифицированном ZIF-8 и графеном, контролируется поверхностными процессами и является необратимым протонозависимым процессом с участием одного электрона. Аналитические характеристики разработанного сенсора включают линейный диапазон концентраций три порядка величины, предел обнаружения на уровне нМ и высокую селективность, что позволило использовать его при анализе лекарственных средств в виде таблеток и раствора для инъекций, искусственной сыворотки крови. Полученные результаты характеризуются хорошей воспроизводимостью и отсутствием систематической погрешности.

Литература:

1. Recent advances in metal-organic frameworks for electrochemical sensing applications / M. K. Muthukumar, M. Govindaraj, S. Kogularasu [et al.] // *Talanta Open*. – 2025. – Vol. 11. – P. 100396. – DOI 10.1016/j.talo.2024.100396.
2. Metal organic frameworks for electrochemical sensor applications: A review / N. Kajal, V. Singh, R. Gupta, S. Gautam // *Environmental Research*. – 2022. – Vol. 204, No. Part C. – P. 112320. – DOI 10.1016/j.envres.2021.112320.

Получение и характеристика наночастиц оксида церия-самария

*Строкин П.Д.¹, Горячева Е.А.¹, Горячева И.Ю.¹, Попова Н.Р.², Горячева О.А.¹,
¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов*

*²Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, Пущино, Москва
stropa99@mail.ru*

Люминесцентные наночастицы на основе оксидов редкоземельных элементов характеризуются низкой токсичностью и лёгкой функционализацией поверхности. Эти преимущества открывают возможности их применения в оптике, энергетике, биоанализе и других областях. Легирование наночастиц оксида церия редкоземельными элементами (в том числе самарием) открывает перспективы создания многомодовых сенсоров (с сочетанием фотолюминесцентного анализа и генерации контраста для МРТ). Однако к настоящему времени люминесцентные свойства оксида церия и варианты его легирования редкоземельными элементами остаются недостаточно изученными. Существует множество способов получения цериевых наночастиц. Большинство известных методов сложны, длительны, трудоёмки и практически не позволяют получить сверхмалые наночастицы. Альтернативой является высокотемпературный металлоорганический синтез. В данной работе наночастицы оксида церия-самария получены методом высокотемпературного металлоорганического синтеза. Подтверждена зависимость формы и размера кристаллов от условий синтеза, что согласуется с литературными данными. После очистки полученных наночастиц с использованием осадителей отмечено снижение квантового выхода фотолюминесценции. Наночастицы, очищенные без использования осадителей, сохраняют исходный квантовый выход. Эти частицы коллоидно стабильны и сохраняют потенциал для дальнейшей модификации и применения в биоанализе.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-63-00082).

Сорбционно-люминесцентное определение энрофлоксацина с использованием волокон, полученных методом электроформования

Сярдина А.В., Смирнова Т.Д., Русанова Т.Ю.

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов,
syardinaa@mail.ru*

Одним из часто используемых антибиотиков фторхинолонового ряда является энрофлоксацин (ЭФ), который обладает широким спектром антибактериального действия, подавляет бактериальную ДНК-гиразу, затрудняет рост и развитие бактерий. ЭФ широко используется в животноводстве, птицеводстве, рыбном хозяйстве, находит применение в качестве стимулятора роста и пищевых добавок. Однако, широкое и не всегда обоснованное использование препарата является причиной превышения допустимых значений остаточных содержаний в сырье пищевой промышленности и продуктах питания. Настоящая работа посвящена разработке способа сорбционно-люминесцентного определения ЭФ в водных растворах с использованием сенсibilизированной флуоресценции на поверхности нановолокна, полученного методом электроспиннинга. Изучено влияние природы полимерных волокон, концентрации ионов тербия, кислотности среды и природы поверхностно-активного вещества на степень извлечения ЭФ и интенсивность флуоресценции аналитической системы. В качестве лучшего сорбента выбрано полиакрилонитрильное волокно, сформированное из 13% раствора. Показано, что в присутствии ионов тербия степень извлечения фторхинолона возрастает в 5 раз и достигает 91%. Рост показателя связан с усилением электростатических, гидрофобных взаимодействий хелата с сорбентом, а также возможной реализацией координационного связывания ионов тербия с нитрильной группой ПАН. Добавки мицелл катионных, неионогенных и анионных ПАВ практически не влияют на степень извлечения ЭФ. Установлено оптимальное время сорбции 90 мин. Показано, что при увеличении концентрации ЭФ возможно формирование на поверхности волокна многослойных адсорбционных структур. Предлагаемый сорбционно-люминесцентный способ определения ЭФ отличается низким пределом обнаружения 1.2×10^{-7} М и широким диапазоном определяемых содержаний $3.7 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-4}$ М.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-23-00519.

Оптические зонды влияния мицелл поверхностно-активных веществ на таутомерные равновесия в растворах органических реагентов

Тюнина Ю.А., Шалабай С.А., Андреева К.О., Штыков С.Н.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, uliatunina8769@gmail.com

Таутомерией называют явление обратимой изомерии, при которой два или более изомера легко переходят друг в друга. Наиболее известным видом таутомерии является прототропная таутомерия, когда меняется положение подвижного протона в молекуле вещества и при этом меняется его структура. Изменение структуры, в свою очередь, влияет на протолитические, комплексообразующие, биохимические свойства этого вещества в живом организме и его электронный спектр в оптической области электромагнитных волн. Таким образом изменения в электронном спектре позволяют проследить изменения концентрации таутомеров в зависимости от природы растворителя, кислотности среды, температуры, концентрации, присутствия ионов металлов и других факторов. Длительное время основным способом влияния на таутомерное равновесие было изменение природы растворителя, который влиял как за счет дипольного момента его молекул (электростатический фактор), так и химических факторов (Н-связь, донорно-акцепторное взаимодействие).

Ранее нами на примере 1,3-дикетонов и некоторых азосоединений показано, что на таутомерное равновесие могут влиять также мицеллы поверхностно-активных веществ (ПАВ) за счет локального изменения микроокружения молекулы при её сольubilизации в мицеллах. Таким образом мицеллы ПАВ с одной стороны меняют таутомерное равновесие в молекулах органических соединений, с другой сами эти молекулы служат зондами перехода ПАВ от молекулярного раствора к мицеллярному.

Для изучения влияния природы мицеллярных систем на таутомерное равновесие использована серия фенилазонафтолов с кислотными (-COOH и -SO₃H) заместителями в *o*-положении к гидроксильной группе в нафталиновом цикле и в присутствии или при отсутствии сульфогруппы в бензольном кольце. Выбор данной группы азосоединений в качестве модельной для изучения таутомерии связан с хорошо различимыми максимумами спектров поглощения их азо- и хинонгидразонных таутомеров.

Изучение спектров поглощения при варьировании концентрации ПАВ показало, что азо-хинонгидразонное таутомерное равновесие до ККМ ПАВ, т.е. до появления мицелл, меняется только в присутствии катионных ПАВ, образующих ионные ассоциаты по сульфогруппе бензольного кольца азосоединения. Появление в растворе мицелл КПАВ дополнительно изменяет соотношения таутомеров в растворе и спектры. Анионные ПАВ из-за одинакового заряда с азосоединением его не сольubilизируют и не влияют на спектры и таутомерию. Спектры поглощения и таутомерное равновесие при появлении в растворе мицелл всех неионных ПАВ и увеличении их концентрации практически полностью повторяют изменения в водных растворах при увеличении концентрации этанола и несущественно зависят от природы ПАВ. Этот эффект позволил оценить значения эффективной диэлектрической проницаемости и параметра $E_T(30)$ Димрота-Райхардта в микроокружении сольubilизированных азореагентов в их мицеллах.

Анализ поверхности пленок с молекулярными отпечатками неомидина сульфата

Фам Тхи Гам^{1,2}, Зяблов А.Н.¹, Конг Хонг Хань³

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», 394018, г. Воронеж;
Университетская пл., 1, e-mail: alex-n-z@yandex.ru

²Ханойский университет бизнеса и технологий, г. Ханой, Вьетнам

³Институт материаловедения, Вьетнамская академия наук и технологий, г. Ханой,
Вьетнам

Молекулярно-импринтированные полимеры (МИП) - это искусственные материалы, обладающие способностью избирательно распознавать и связываться с различными аналитами. Синтез МИП включает формирование комплекса шаблона с мономерами, полимеризацию и удаление шаблона, в результате чего образуются специфические полости. МИП обладают высокой селективностью, стабильностью и низкой стоимостью, что делает их перспективными для науки и технологий [1]. Однако неравномерность пленок МИП на электродах ограничивает их применение. Цель работы – анализ поверхности полимеров с молекулярными отпечатками неомидина сульфата (Neo) с использованием метода сканирующей силовой микроскопии (ССМ).

Для получения полимеров с отпечатками антибиотика неомидина сульфата готовили полимеризационную смесь, содержащую сополимер диангидрида 1,2,4,5-бензолтетракарбоновой кислоты с 4,4' диаминодифенилоксидом (ОАО МИПП НПО «Пластик», г. Москва) и антибиотика (шаблон). Синтез проводили по методике [2]. Также были получены пленки неимпринтированного полимера (НП).

Поверхность пленок исследовали на приборе «Solver P47 PRO», (ЗАО «Нанотехнология-МДТ»). Обработку результатов проводили с помощью программы Фемто Скан-001.

Для исследования морфологии поверхности полимерных пленок был использован метод ССМ. Пленки НП характеризуются высокой воспроизводимостью по толщине и однородной поверхностью с перепадом высот от 0.7 до 3.6 нм.

Анализ показал, что синтез МИП-антибиотика, приводит к изменениям в пористой структуре материала. Так, у полиимидной пленки без молекулы-шаблона содержание микропор составляет 81.07 %, тогда как в МИП-Neo этот показатель снижается до 77.14 %. При этом количество мезо- и макропор возрастает с 16.57 % до 17.14 % и с 2.37 % до 5.72 % соответственно. Эти изменения обусловлены структурной перестройкой полимерной матрицы МИП-Neo в процессе синтеза. После удаления шаблона (Neo) в МИП остаются пустоты, что увеличивает пористость по сравнению с НП. Уменьшение количества микропор и увеличения мезо-/макропор в МИП-Neo подтверждают успешное удаление Neo и формирование специфических молекулярных отпечатков в полимерной матрице.

Литература

1. Babaeipour V., Jabbari F. Pre-polymerization process simulation, synthesis and investigation the properties of dipicolinic acid molecularly imprinted polymers // Polymer Bulletin. 2024. Vol. 81. P. 1495-1512.
2. Ву Хоанг Иен, Зяблов А.Н. Определение сорбата калия и бензоата натрия в безалкогольных напитках пьезосенсорами на основе молекулярноимпринтированных полимеров // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2022. Т. 65, № 10. С. 14-20.

Люминесцентное определение аденозин-5'-трифосфата с использованием нанокластеров меди

Фурлетов А.А., Аняри В.В., Дмитриенко С.Г.

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Химический факультет, г. Москва, e-mail: aleksei_furletov@mail.ru*

Нанокластеры представляют собой ансамбли атомов или молекул, размеры которых находятся в пределах нескольких нанометров, а общее число атомов не превышает 1 000. Они состоят из ядра, включающего по меньшей мере два атома, связанных между собой металлическими, ионными или ковалентными связями, и внешней стабилизирующей оболочки. Оболочка может содержать в своем составе различные функциональные группы или лиганды, координированные к ядру. В последние годы люминесцентные нанокластеры металлов, в частности, нанокластеры меди, широко используются в медицине в роли флуоресцентных терапевтических агентов для лечения и профилактики различных заболеваний, а также для раннего выявления опухолей. Кроме того, они находят применение для таргетной доставки лекарственных средств в клетки и ткани, а также для повышения биодоступности труднорастворимых препаратов. Нанокластеры меди обладают достаточно высокой стабильностью и могут служить доступной альтернативой дорогостоящим люминофорам. Одним из перспективных направлений современной аналитической химии является расширение возможностей использования нанокластеров в качестве люминесцентных реагентов для целей химического анализа.

Количественное определение биологически активных соединений, не обладающих собственной люминесценцией, представляет собой актуальную и сложную задачу аналитической химии. Одним из важнейших биологически активных соединений является аденозин-5'-трифосфат (АТФ) — универсальный источник энергии для всех биохимических процессов в живых организмах. Определение содержания АТФ в органах и тканях человека позволяет оценивать энергетическое состояние клеток и диагностировать патологические процессы, включая неврологические расстройства и митохондриальные дисфункции. Кроме того, количество АТФ служит своеобразным индикатором при контроле чистоты поверхностей в медицинских учреждениях, качества пищевой продукции и в экологическом мониторинге.

Цель настоящего исследования заключалась в разработке простого, экспрессного и достаточно селективного способа определения аденозин-5'-трифосфата с использованием люминесцентных нанокластеров меди.

Осуществлен синтез нанокластеров меди путем восстановления сульфата меди(II) *L*-аскорбиновой кислотой при pH 4 в присутствии поли(*N*-винил-2-пирролидона). Предложен оригинальный способ определения аденозин-5'-трифосфата в водных средах, основанный на селективном ингибировании тушения люминесценции нанокластеров меди ионами Cu^{2+} , что обусловлено связыванием тушителя с фосфатными группами АТФ. Молярную концентрацию АТФ, вступившего во взаимодействие с тушителем, определяли по увеличению интенсивности люминесценции нанокластеров меди при длине волны 420 нм. Установлено, что максимальное значение аналитического сигнала достигается в диапазоне pH 7–9 через 5 мин после начала реакции. Предел обнаружения АТФ при выбранных условиях равен 10 мкМ, диапазон определяемых содержаний составляет от 30 мкМ до 2 мМ. Предложенный способ определения аденозин-5'-трифосфата успешно применен для анализа фармацевтических препаратов и модельных систем, имитирующих состав сточных вод и искусственной мочи.

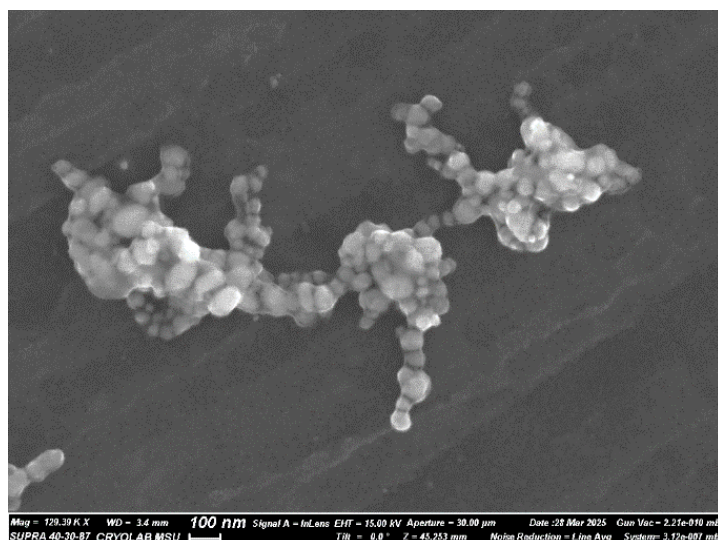
Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-23-20004, <https://rscf.ru/project/24-23-20004/>).

Новый тип агломератов наночастиц серебра индуцированных гидрофобным взаимодействием в практике ГКР

Хрущев А.Ю., Гуляева А.Ю., Кис И.В., Третьяков А.В.

Всероссийский государственный центр качества и стандартизации лекарственных средств для животных и кормов, Москва, khrushh@rambler.ru

В данной работе описан новый тип наноструктурированных комплексов - агломератов наночастиц серебра стабилизированных гидрофобными взаимодействиями. Данные комплексы отличаются по размеру, морфологии и по дзета-потенциалу от ранее известных агломератов, стабилизированных электростатическим взаимодействием. Важным свойством агломератов нового типа является способность к усилению напряженности электромагнитного поля в месте контакта наночастиц, что приводит к значительному усилению сигнала ГКР (SERS) в результате образования горячих точек (Для альбендазола $EF = 1,0 \cdot 10^7$).



В работе показано, что агломераты данного типа образуются в результате адсорбции альбендазола (ABZ) на поверхности наночастиц в узком диапазоне pH соответствующем его изоэлектрической точке. С помощью метода ГКР показано, что в кислой среде C-N связь карбоксильной группы альбендазола сближена с поверхностью серебра. При повышении pH происходит переориентация молекулы в адсорбционном комплексе – уменьшается расстояние между поверхностью серебра и C-S связью/карбонильной группой. При этом в кислой среде снижается стабильность комплекса ABZ-AgNP, что приводит к высвобождению альбендазола. Разница в связывании ABZ наночастицами при физиологическом значении pH и в кислых условиях отличается в 3-5 раз. Это свойство pH-зависимой адсорбции биологически активных соединений наночастицами может быть использовано при адресной доставке лекарственных средств.

Определение антрациклиновых антибиотиков на основе тушения люминесценции квантовых точек

*Цюпка Д.В., Худина Е.А., Дрозд Д.Д., Коганова Д.Г., Корнилов Д.А.,
Горячева О.А., Горячева И.Ю.*

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов,
tsyupkadv@mail.ru*

Митоксантрон (МТХ) является эффективным противораковым средством с меньшим количеством побочных эффектов, чем другие антрациклины, но требует тщательного мониторинга из-за его сложной фармакокинетики. Структурные особенности МТХ затрудняют его количественное определение, поскольку он образует самоассоциаты и прочно связывается с белками и ДНК. Это может быть сделано с помощью подхода, основанного на тушении люминесценции квантовых точек (КТ). Для этого необходимо отобрать КТ со значительным тушением их люминесценции в присутствии МТХ. Детальное изучение процесса их взаимодействия позволит оптимизировать анализ. Были изучены два типа полупроводниковых люминесцентных КТ в качестве детекторных систем, чувствительных к присутствию МТХ: (i) серия подобранных по размеру фракций некадмиевых КТ AgInS/ZnS с широким спектром излучения и длительным временем жизни и (ii) легированные КТ CdZnSeS и CdZnSeS/ZnS с узким спектром излучения и коротким временем жизни. Это позволило оценить влияние состава КТ на эффективность тушения люминесценции МТХ. Покрытие исходных полупроводниковых ядер (AgInS или CdZnSeS) слоем ZnS улучшает пассивацию и квантовый выход люминесцентного ядра. Для обоих типов КТ исследована зависимость интенсивности и времени жизни люминесценции от концентрации МТХ. Предположительно, процесс тушения происходит преимущественно по статическому механизму. Достигнуты пределы обнаружения МТХ 3 и 5 нМ для КТ AgInS/ZnS и CdZnSeS/ZnS соответственно. Таким образом, использование люминесцентных КТ в качестве прямой детекторной системы значительно ускоряет и упрощает детектирование антрациклинового цитостатика МТХ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 23-13-00380).

Синтез платформы доставки антрациклиновых антибиотиков и оценка замедленного высвобождения

Цюпка Д.В., Худина Е.А., Горячева И.Ю.

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов,
tsyupkadv@mail.ru*

Злокачественные новообразования остаются серьёзной проблемой во всём мире, требуя совершенствования подходов к химиотерапии. Цитостатические платформы доставки лекарственных средств обладают рядом преимуществ, включая контроль скорости высвобождения препарата и возможность повышения его концентрации в патологической зоне. Митоксантрон (МТХ) — синтетический цитостатический препарат, разработанный как аналог доксорубина в рамках исследований по поиску новых препаратов со схожим спектром действия, но со сниженной кардиотоксичностью. Отсутствие удобных методов контроля концентрации высвобождаемых веществ в биологических жидкостях существенно замедляет разработку, оптимизацию и тестирование новых систем пролонгированного высвобождения (в том числе в сочетании с таргетной доставкой, контролируемым высвобождением и т.д.). Разработка доступных и чувствительных методов контроля концентрации лекарственных средств является актуальной задачей для медицины.

Мы подобрали оптимальные условия для эффективной загрузки МТХ и оценили пролонгированное высвобождение из многослойных биodeградируемых плёнок на основе полигликолевой кислоты. Высвобождение МТХ изучалось в различных средах, включая биологические жидкости. Для оценки пролонгированного высвобождения в данной работе использован подход, основанный на тушении люминесценции квантовых точек. Показано, что данный метод позволяет с высокой чувствительностью и достоверностью определять высвобождение препарата в различных средах. Таким образом, предлагаемая платформа для доставки цитостатического препарата митоксантрон может быть перспективна для доставки лекарственных средств. Рассматривается использование удобного, простого в использовании и чувствительного метода мониторинга МТХ для изучения высвобождения из систем пролонгированного высвобождения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 23-13-00380).

Нановолокна как перспективные сенсорные платформы для определения мексидола

Шабунина А.Ю., Русанова Т.Ю.

*Институт химии, Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н.Г. Чернышевского
Саратов, kalinichenkoau@mail.ru*

Мексидол – отечественный препарат с широким спектром фармакологического действия. На сегодняшний день это едва ли не единственный эффективный аналог зарубежных препаратов в классе антигипоксантов и антиоксидантов. Качественный и количественный контроль данного препарата должен проводиться как на производстве, так и в медицинской практике. В связи с этим необходимо развивать новые, современные методы анализа – сенсорные инструменты, доступные для использования не только профессионалами, но и обычными потребителями. Нановолокна могут стать перспективной матрицей для создания таких инструментов, обеспечивая решение проблемы длительности анализа и сложности интерпретации результатов. Нановолокна имеют высокую удельную поверхность, пористость, высокую абсорбционную способность и малый вес. В связи с этим они проявляют фильтрующие способности, которые также могут быть использованы для очистки сточных вод фармацевтических производств.

Мексидол является соединением с амфотерными свойствами, гетероциклический атом азота проявляет основные свойства, а фенольный гидроксил – кислотные. Зарегистрированы спектры мексидола в кислой (рН=3) и в нейтральной средах. УФ-спектры в различных средах значительно отличаются: при рН=3 вещество находится в катионной форме и характеризуется наиболее интенсивной полосой поглощения с максимумом при 296 нм.

Сорбция мексидола в нейтральной среде на нановолокно (полиакрилонитрил (ПАН) и полиамид (ПА)) показала, что оптическая плотность раствора после сорбции возрастает, что может объясняться вымыванием примесей из волокна. Сорбция мексидола в кислой среде на ПАН и ПА показала, что оптическая плотность раствора после сорбции снижается, при этом большая степень извлечения наблюдается в случае ПАН, что говорит о возможности применения этого материала для сорбции и последующего определения мексидола.

Отмечено влияние мексидола на люминесцентные свойства квантовых точек (КТ). С увеличением концентрации препарата увеличивается интенсивность люминесценции КТ AgInS₂/ZnS с максимумом свечения 597 нм и 610 нм. Квадрат коэффициента аппроксимации зависимостей интенсивности люминесценции КТ от концентрации мексидола в растворе составил >0,9 для желтых КТ и ~0,5 для оранжевых КТ квантовые точки. После сорбции на нановолокно (ПАН) получили квадрат коэффициента аппроксимации ~0,8 для желтых КТ и ~0,4 для оранжевых КТ. Таким образом, желтые КТ ($\lambda=597$ нм) могут использоваться для дальнейшей работы по определению мексидола, однако требуется дальнейшая оптимизация условий анализа.

Показана перспектива применения полимерных наноматериалов на основе нановолокон с КТ для концентрирования и последующего люминесцентного определения мексидола, а также других биологически активные веществ.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда No 24-23-00519.

Моноазосоединения как чувствительные элементы оптодов на катионные поверхностно-активные вещества

*Шалабай С.А., Тюнина Ю.А., Андреева К.О., Юрасов Н.А., Штыков С.Н.
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени
Н.Г. Чернышевского, Саратов, sshalabay@gmail.com*

Катионные поверхностно-активные вещества (КПАВ), основным видом которых являются соли четвертичных аммониевых оснований, применяют в качестве ингибиторов коррозии, антистатических, флотореагентных, диспергирующих, бактерицидных, фунгицидных и дезинфицирующих средств, а также для увеличения нефтеотдачи пластов в нефтедобыче и обогащения руды, в металлообработке, теплоэнергетике, сельском хозяйстве, медицине, текстильной, бумажной промышленности и в химическом анализе. В водном растворе КПАВ ведут себя как сильные электролиты и диссоциируют с образованием положительно заряженных поверхностно-активных катионов.

Для контроля содержания КПАВ в растворах предложен тест-метод с индикатором трифенилметанового ряда бромфеноловым синим (БФС), нанесенным на индикаторную бумажку [1] или бисазосоединением сульфоназо, нанесенным на ткань [2]. Определение основано на образовании окрашенных ионных ассоциатов анионов этих красителей с катионом ПАВ.

Нами установлено, что анионы двух моноазосоединений магnezона ХС (МХС) и люмогаллиона (ЛГ) при взаимодействии с катионными ПАВ, например катионом цетилпиридиния (ЦП⁺) или цетилтриметиламмония (ЦТА⁺), приводят к необычно большому сдвигу в спектрах поглощения МХС и ЛГ, что может быть использовано для создания оптического сенсора или тест-метода определения КПАВ. Спектрофотометрическим методом установлено, что оптимальной областью рН является интервал 6 – 7, в котором образуются окрашенные ионные ассоциаты стехиометрического состава, а смещение в спектрах поглощения по отношению к исходным ионным формам азосоединений достигает 90 – 100 нм. Изучено влияние концентрации ЦП и ЦТА на изменения в спектрах поглощения, влияние ионной силы раствора, природы буферного раствора на величину смещения в спектрах и интенсивность поглощения света в области максимума поглощения ионных ассоциатов. Показано, что наиболее низкий предел обнаружения обеспечивает образование ионного ассоциата МХС с ЦП и ЦТА, который для обоих КПАВ равен 2.9 мг/л.

Список литературы

1. Шаока З.Ч., Амелин В.Г., Большаков Д.С. Тест-методы определения катионных и анионных ПАВ в дезинфицирующих и технологических растворах // Заводск. лаб. Диагностика матер. 2021. Т. 87(2). С. 13-18.
2. Гамзаева У.Г., Мирзаева Х.А., Зейналов Р.З. Определение цетилпиридиния хлорида в фармацевтических препаратах методом твердофазной спектрофотометрии // Аналитика и контроль. 2022. Т. 26(4). С. 276-283.

Оптические сенсоры на основе полимерных пленок для определения некоторых металлов в их смесях с использованием хемометрических алгоритмов

Юрова Е.В., Русанова Т.Ю.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, yurova_97@mail.ru

Повышенное содержание тяжелых металлов в воде пагубно влияет на все живые организмы, поэтому необходим быстрый и точный анализ, который могут обеспечить оптические сенсоры на основе биополимеров, а упростить определение компонентов в сложной системе может применение хемометрики.

Поэтому целью данной работы явилась разработка чувствительного элемента оптического сенсора со спектрофотометрическим и цветометрическим способами детектирования для определения Cu(II) в воде, а также оценка возможности хемометрических методов для отдельного определения ионов Cu(II) и Al(III) при совместном присутствии в модельных растворах.

В качестве фотометрического реагента выбран пирокатехиновый фиолетовый (ПКФ), так как он образует интенсивно окрашенные комплексы с широким кругом ионов, в частности с медью. Установлено, что мешающим ионом при определении меди в воде является Al(III) , поскольку его комплексы с ПКФ поглощают в той же области спектра ($\lambda=680$ нм). Предварительно изучено комплексобразование ионов меди и алюминия с ПКФ (10^{-3} М) в диапазоне рН 4,0 – 9,0 в водном растворе. Для усиления аналитического сигнала использовали мицеллярную среду хлорида цетилпиридиния (ЦП, 10^{-2} М). Наиболее интенсивный отклик комплекса с Cu(II) наблюдался в растворе с рН = 6,5, а с Al(III) – в растворе с рН = 7,5, поэтому в дальнейшей работе использовали данные условия для комплексобразования.

Для решения проблемы спектрофотометрического определения ионов металлов в смесях предложено использование хемометрических алгоритмов – метода проекции на латентные структуры (PLS). Проведена оценка возможности методов PLS1 и PLS2 для отдельного определения ионов в смесях, содержащих различное количество ионов Cu(II) и Al(III) в диапазоне 1-90 мкмоль/л.

При разработке чувствительного элемента оптического сенсора в качестве матрицы использовали плёнку, изготовленную из триацетата целлюлозы (ТАЦ). Реагент иммобилизовали за счет физической сорбции на пленке ТАЦ в присутствии ЦП. Готовые плёнки обрабатывали водным раствором сульфата меди различной концентрации, регистрировали спектры поглощения, а также обрабатывали фотоснимки плёнок, получая RGB-характеристики.

Установлено, что оптическая плотность и параметр цветности B линейно зависят от концентрации иона меди(II) в диапазоне концентраций 10^{-4} М – 10^{-1} М, что показывает перспективность дальнейшего применения пленок на основе ТАЦ с ПКФ для создания чувствительного элемента оптического сенсора.

Использование нанокompозита на основе наночастиц золота, иммобилизованных в полиметакрилатную матрицу, для извлечения и определения ртути(II)

Яландаева Д. А., Саранчина Н.В., Гавриленко Н.А.

Томский государственный университет, г. Томск, dariya-2004.13@mail.ru

Разработка быстрых, специфичных, экономически эффективных и надежных инструментов для мониторинга уровней Hg(II) как в образцах окружающей среды, так и в биологических образцах имеет первостепенное значение в связи с высокой токсичностью ртути для человека. Существует множество методов контроля концентрации ртути и одним из самых простых можно назвать колориметрический метод, отличающийся своей оперативностью и относительной дешевизной. Наибольший интерес в колориметрии представляют наночастицы золота из-за лучшей способности идентифицировать различные вещества с точки зрения чувствительности и стабильности по сравнению с обычно используемыми хромофорами, их максимум поглощения поверхностного плазмонного резонанса (ППР) приходится на видимую область спектра и в большинстве случаев это позволяет использовать для измерения аналитического сигнала как стандартное спектрофотометрическое оборудование, так и визуальную индикацию. Есть множество разных подходов к стабилизации наночастиц золота, и одним из них является иммобилизация на твердую фазу, которая позволяет дольше сохранять свойства наночастиц, определяющие их пригодность для использования в анализе. Целью данной работы является исследование возможности использования наночастиц золота, иммобилизованных в полиметакрилатную матрицу, для количественного определения Hg(II) методом колориметрии.

Формирование стабильных наночастиц золота в прозрачной полиметакрилатной матрице (ПММ) проводили путем восстановления Au (III). Для этого предварительно иммобилизовали Au (III) в ПММ (ПММ-Au (III)) из раствора HAuCl₄ (10 мг/л) объемом 10 мл путем перемешивания на ротаторе с 20 пластинами ПММ размером 4×4 мм в течение 5 минут. В качестве восстановителей с различной силой использовали 0,01 % раствор NaBH₄ и 5 % раствор аскорбиновой кислоты, для этого пластины ПММ-Au(III) опускали в раствор восстановителя и ставили перемешиваться на 5 мин. В зависимости от использованного восстановителя пластины ПММ-Au⁰ были окрашены в красный цвет с максимумом поглощения на длине волны 530 нм и серо-фиолетовый цвет с максимумом поглощения на длине волны 575 нм при использовании NaBH₄ и аскорбиновой кислоты соответственно.

Для определения содержания Hg(II) был выбран метод амальгамирования наночастиц золота в ПММ, который проводили в 2 этапа: 1 этап – пластины ПММ-Au⁰ помещали в раствор Hg(II) с добавлением фосфатного буфера для их извлечения в ПММ-Au⁰ в течение 30 минут; 2 этап – ПММ-Au⁰ вынимали из раствора Hg(II) и помещали в раствор боргидрида натрия для восстановления Hg(II) и регистрировали спектры поглощения ПММ-Au⁰. Извлечение Hg(II) с последующим восстановлением приводит к изменению спектров поглощения ПММ-Au⁰ в виде увеличения и сдвига полосы ППР с 526 нм до 505–510 нм в зависимости от концентрации ртути в растворе.

Таким образом, амальгамирование ртутью Au⁰ в ПММ приводит к изменению полосы ППР, что может быть использовано для разработки колориметрического сенсорного материала для определения ртути(II) на основе нанокompозита ПММ-Au⁰.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту 25-23-20058 и администрации Томской области.

Научное издание

Тезисы докладов
"Оптические хемо-и биосенсоры"
в рамках ежегодной международной конференции
Saratov Fall Meeting - 2025

Подписано в печать 20.10.2025 г. Формат 60×84/16.
Усл.-печ. л. 4,0. Тираж 300 экз. Заказ № 80

Издательство «Саратовский источник»
г. Саратов, проспект Строителей, 36.
Тел. (8452) 52-05-93
E-mail: saristoch@bk.ru
Отпечатано в типографии «Саратовский источник»