

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата химических наук Шавокшиной Веры Александровны
на тему: «Амперометрические (био)сенсоры на основе
наноструктурированной берлинской лазури для анализа биологических
жидкостей»
по специальности 1.4.2. Аналитическая химия**

Диссертационная работа Шавокшиной В.А. посвящена разработке электрохимических сенсоров на основе наноразмерных гексацианоферратов железа/никеля для анализа биологических жидкостей. *Актуальность* данного исследования не вызывает сомнений и определяется соответствием современным тенденциям развития персонафицированной медицины. В связи с этим наблюдается устойчивый спрос на компактные и высокочувствительные сенсоры для скрининга и мониторинга.

Определение содержания ионов калия и натрия представляет значительный клинический интерес, поскольку электролитный баланс необходим для поддержания клеточного гомеостаза, передачи нервных импульсов и нормального функционирования сердечно-сосудистой системы. Предложенные в работе твердоконтактные ионоселективные электроды обеспечивают точное и быстрое определение содержания ионов калия и натрия в поте и сыворотке крови.

Выраженная тенденция современной диагностики к использованию неинвазивных методов анализа делает особо значимой разработку сенсоров для определения концентрации пероксида водорода в конденсате выдыхаемого воздуха. Этот биомаркер окислительного стресса имеет важное диагностическое значение при различных бронхолегочных патологиях. Наконец, интеграция наночастиц, функционирующих в качестве электрокаталитических меток (“нанозимов”) в электрохимические ДНК-сенсоры представляет собой перспективную альтернативу использованию природных ферментов, что позволяет существенно повысить стабильность работы сенсоров и снизить стоимость анализа.

Практическая значимость работы подтверждается созданием экономичных и стабильных сенсоров для анализа сложных биологических матриц, разработкой экспресс-методов диагностики широкого спектра биомаркеров, а также возможностью масштабирования используемых подходов. По результатам работы получен патент РФ на способ изготовления сенсоров на основе замещенного поли(3,4-этилендиокситиофена).

Структура и объём работы. Диссертационная работа изложена на 138 страницах. Работа имеет традиционную структуру и состоит из введения, обзора литературы, экспериментальной части, обсуждения результатов, заключения, а также списка цитируемой литературы, включающего 206 источников. Список литературы оформлен корректно.

Во *введении* обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость. В *обзоре литературы* (главы 1-4) описаны электрохимические сенсоры для определения калия и натрия, ДНК-сенсоры с различными вариантами регистрации гибридизации, сенсоры на пероксид водорода и результаты его определения в конденсате выдыхаемого воздуха, полученном с использованием различных конденсоров. В *экспериментальной части* (глава 5) описаны методики проведенных экспериментов, необходимые реактивы и оборудование.

В *обсуждении результатов*, состоящем из трёх глав (главы 6-8), описаны и проанализированы основные результаты, полученные автором. В результате работы были созданы твердоконтактные ионоселективные электроды на основе гексацианоферратов железа и никеля, адаптированные для работы в режиме проточно-инжекционной амперометрии при постоянном потенциале. Переход от потенциометрического к амперометрическому детектированию позволил не только повысить чувствительность, но и устранить недостатки существующих аналогов, такие как длительное время анализа и низкая воспроизводимость откликов. Также

были разработаны электрохимические ДНК-сенсоры с электрокаталитическими метками-нанозимами. Впервые предложено использовать композитные наночастицы берлинской лазури в качестве меток в ДНК-сенсорах; такие наночастицы сочетают в себе преимущества клик-химии для одностадийной конъюгации и электрокаталитическую активность. Ещё одним результатом работы стало создание чувствительных сенсоров для определения пероксида водорода в конденсате выдыхаемого аэрозоля. Удалось зафиксировать снижение концентрации пероксида водорода в образцах пациентов с постковидным синдромом. Основные положения и выводы диссертационной работы теоретически и экспериментально обоснованы.

Достоверность полученных результатов определяется использованием независимых методов исследования. По материалам работы опубликовано 6 печатных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых международными базами данных (Web of Science, Scopus, RSCI) и рекомендованных в диссертационном совете МГУ по специальности 1.4.2. Аналитическая химия. Результаты работы представлены на 11 всероссийских и международных научных конференциях.

В то же время к работе имеются вопросы и замечания:

- 1) Класс соединений, относящихся к аналогам БЛ, весьма обширен. Почему в качестве объектов диссертационного исследования были выбраны именно гексацианоферраты и именно гексацианоферраты железа и никеля?
- 2) Широко известно, что аналоги БЛ, полученные из водных растворов, имеют дефектную структуру. Первый тип дефектов связан с наличием молекул воды в диффузионных каналах внутри псевдокубических полостей (так называемые «цеолитные» или «междоузельные» дефекты). Второй тип дефектов связан с замещением аниона $[M(CN)_6]^{n-}$ на

молекулы воды или OH^- группы. Проводился ли анализ химического состава гексацианоферратов железа и никеля? Могут ли данные типы дефектов влиять на функциональные свойства твердоконтактных ионоселективных электродов на основе гексацианоферратов железа или никеля и каким образом?

- 3) Если редокс-процессы в БЛ хотя бы схематично представлены в диссертационной работе, то для ГЦФ никеля такое описание отсутствует.
- 4) Остается нераскрытым механизм стабилизации БЛ при помощи ГЦФ никеля. Также не представлены результаты исследования состава и структуры стабилизированных гексацианоферратом никеля сенсоров на основе наноструктурированной БЛ (толщина электрохимически нанесенного слоя ГЦФ Ni, их однородность и пористость, размер частиц ГЦФ Ni). Не проводилась оптимизация функциональных свойств стабилизированного сенсора путем варьирования условий электрохимического синтеза ГЦФ Ni и последующего отжига.
- 5) Желательно представить более подробные данные о воспроизводимости и операционной стабильности разработанных сенсоров.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.4.2. Аналитическая химия (по химическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Шавокшина Вера Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата химических наук по специальности 1.4.2. Аналитическая химия.

Официальный оппонент:

Доктор химических наук,
директор Центра энергетических технологий, профессор
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего
образования «Сколковский институт науки и технологий»

АБАКУМОВ Артём Михайлович

25.11.2025

Контактные данные:

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

1.4.15 – Химия твердого тела

Адрес места работы:

121205, г. Москва, Большой бульвар, д. 30, стр. 1,
«Сколковский институт науки и технологий»

Подпись сотрудника Абакумова А.М.

«Сколковский институт науки и технологий» удостоверяю:

Руководитель отдела
Кадрового администрирования
Гук О.С.

руководитель/кадровый работник

И.О. Фамилия:

Дата: 