EDN: KBGJYQ
*УДК 535.8:681.7.068:616.831-001.45:616-073.75* *2.2.6*

# ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ И СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА БИОМАРКЕРОВ МОЗГА ПРИ ЧЕРЕПНО-МОЗГОВЫХ ТРАВМАХ

***А. А. Камалеева[1], Б. И. Валеев[1], А. Ж. Сахабутдинов[1,2]***

[1] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

[2] Российская инженерная академия
125009, г. Москва, пер. Газетный, д. 9к4

**Аннотация**. В работе рассмотрены особенности применения волоконно-оптических датчиков для мониторинга основных биомаркеров мозга, используемых для выявления и предотвращения осложнений при травмах головного мозга. Рассмотрены предложения по разработке мультиплексированных датчиков для одновременного измерения до четырёх показателей. Представлены перспективные разработки биологически растворяемого датчика на основе интерферометра Фабри – Перо и фотонно-кристаллических структур. Сделан вывод о том, что волоконно-оптические датчики позволяют проводить не только высокоточные измерения физиологических параметров, но и позволяют обеспечить возможность раннего выявления повреждений тканей мозга и оценить эффективность лечебных мероприятий.

**Ключевые слова**: оптоволоконный датчик, биомаркеры, потенциометрический датчик, амперометрический датчик, биологически растворяемый датчик на основе интерферометра Фабри – Перо, биологически растворяемый датчик на основе фотонно-кристаллических структур.

## Введение

Черепно-мозговая травма (ЧМТ) является основной причиной смертности и инвалидности у детей и взрослых в возрасте от 1 до 44 лет. Ежегодно около 2,5 миллионов человек получают черепно-мозговую травму, связанную преимущественно с дорожно-транспортными происшествиями [1]. Традиционные методы, такие как компьютерная томография (КТ) и магнитно-резонансная томография (МРТ), не всегда позволяют выявить все типы повреждений на ранних стадиях, особенно микроскопические [2]. Помимо этого, после ЧМТ необходимо отслеживать состояние пациента в течение длительного времени для того, чтобы вовремя выявить осложнения, такие как отек мозга, кровоизлияния, эпилептические припадки [3].

Высокое давление внутри черепа также является одной из основных проблем при тяжелых повреждениях мозга, из-за чего возникает проблема постоянного точного измерения внутричерепного давления непосредственно внутри головы пациента. Однако для этого требуются устройства, вводящиеся минимально инвазивно и требующие меньшего количества манипуляций для снижения рисков и развития инфекционных осложнений [4, 5].

Одной из ключевых проблем нейрохирургии стала необходимость в разработке устройств измерения основных показателей мозга в режиме реального времени, позволяющие прогнозировать вероятность восстановления пациента, выявлять факторы риска и оптимизировать лечение.

Мы предлагаем обзор разработки и применения волоконно-оптических датчиков для измерения отдельных показателей мозга.

## Мультиплексные оптоволоконные датчики

Командой разработчиков из Имперского колледжа Лондона и Западно-китайской школы базовых медицинских наук и субмедицины Сычуаньского университета предложено разработать мультиплексный оптоволоконный датчик [6], осуществляющий одновременный динамический мониторинг четырёх биомаркеров мозга (pH — водородный показатель, температура, уровень растворённого в тканях кислорода и уровень глюкозы) для контроля состояния физиологии мозга в реальном времени при черепно-мозговой травме.

Авторы сделали выбор в пользу оптических датчиков, поскольку они совместимы с МРТ из-за их электромагнитной нейтральности и меньших дрейфах информационного сигнала при непрерывном мониторинге. Оптоволоконный датчик измерения pH основан на колориметрическом свойстве пленки, датчик температуры — на методе с термохромными жидкими кристаллами, оптоволоконный датчик измерения растворённого кислорода — на методе флуоресцентной детекции, а датчик уровня глюкозы — на интеграции глюкозочувствительной пленки на торце гибкого оптического волокна.

Структура оптоволоконного датчика такова: на конце гибкого оптического волокна, предназначенного для введения в мозговую ткань, расположены четыре чувствительные пленки, прикреплённые через черную оболочку для одновременного обнаружения четырех биомаркеров. Черная оболочка использована для снижения уровня фонового шума. Гибкое оптоволокно Y-типа используется для передачи широкополосного света для возбуждения чувствительных пленок и непрерывного обнаружения отраженного света через спектрометр для динамического мониторинга биомаркеров. Для анализа спектров отражения и расчета измеренных концентраций биомаркеров используется микроконтроллер [6].

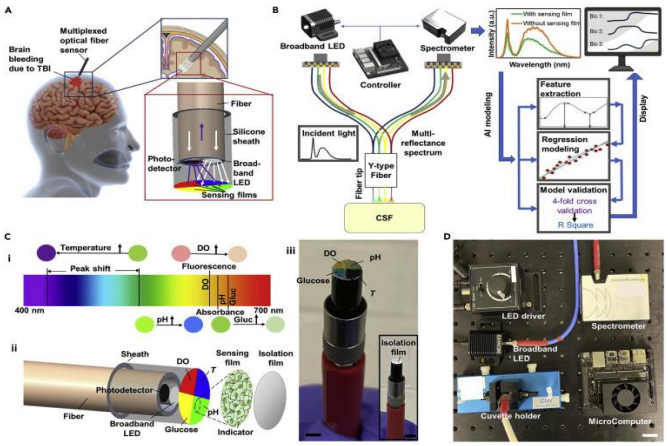


Рис. 1. Разработанный оптоволоконный датчик. Структура и принцип действия [6]

Проверка эффективности была проведена на мозге ягненка в искусственном черепе. Испытания показали, что разработанный датчик имеет отличные сенсорные возможности, высокую чувствительность, селективность и стабильность, а также способность осуществлять непрерывный мониторинг физиологических биомаркеров и определять переход между стадиями черепно-мозговой травмы.

## Электрохимические биосенсоры на основе волокон

Исследование использования гибкого волокна в качестве потенциометрического или амперометрического электрохимического датчика проведено командой ученых США в [7], где показано, что датчики данного типа могут быть использованы для измерения нейрохимической динамики в мозге при травмах в режиме реального времени. В ходе работы авторами была изготовлена макроскопическая заготовка-шаблон, состоящая из шести электродов, легированных графитом и двух микрофлюидных каналов внутри гибкого поликарбонатного корпуса.

Для изготовления потенциометрических датчиков использовался углеродный электрод, покрытый оксидом иридия, что сделало его чувствительным к pH в физиологически значимом диапазоне. Датчики pH оставались стабильными в ходе экспериментов при непрерывном использовании и показали отличную воспроизводимость.

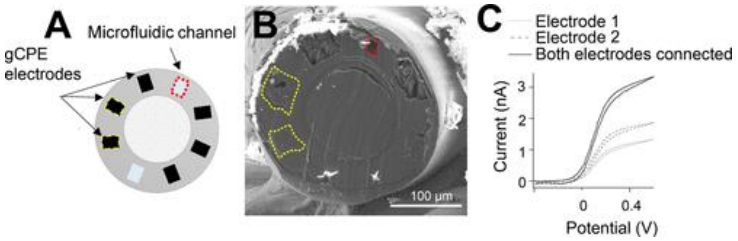


Рис. 2. Схематическое изображение компонентов волокна [6]

Амперометрические датчики были изготовлены путем выращивания платиновой черни на волоконном электроде, а затем ферментного слоя, что сделало их чувствительными к концентрации лактата. Эффективность использования датчиков лактата авторами была продемонстрирована на мышах. В результате тестирования ученым удалось доказать, что датчик обладает высокой воспроизводимостью, стабильностью при многократных измерениях, с небольшим снижением чувствительности со временем из-за ферментного компонента.

## Биологически рассасывающиеся оптические сенсорные системы

Команда ученых из Иллинойсского университета США предлагает использовать для изготовления имплантируемых оптических датчиков давления и температуры миллиметровые биологически рассасывающиеся интерферометры Фабри – Перо и двумерные фотонно-кристаллические структуры [8]. Авторы подчеркивают, что биологически рассасывающиеся электронные сенсорные системы сконструированы так, чтобы безвредно растворяться в биожидкостях с четко определенной, программируемой скоростью до биологически безопасных конечных продуктов.

Биологически рассасывающиеся датчики на основе интерферометров Фабри – Перо состоят из термически выращенного инкапсулирующего слоя диоксида кремния, адгезионного слоя из аморфного диоксида кремния и кремниевой пластины. Слои служат в качестве чувствительных к давлению диафрагм, которые герметизируют воздушную камеру, образованную путем связывания кремниевой пластины с вытравленным на ее поверхности датчиком. Оптические волокна передают свет в устройство и из него, позволяя измерять давление и температуру посредством изменения измеренных спектров отражения [8].

Датчики на основе фотонных кристаллов основаны на поликарбонатных структурах, сформированных на гибкой диафрагме, герметизирующей воздушную полость, образованную путем присоединения к кремниевой подложке рельефного элемента, вытравленного на ее поверхности. Эти датчики дают острые резонансные пики с высокой добротностью, что обеспечивает высокую точность измерений, а неповторяющиеся резонансные сигналы

также устраняют проблемы перекрытия мод. Для проверки эффективности датчиков авторами были проведены гистопатологические оценки и исследования на крысах, которые подтвердили биоразлагаемость этих систем.

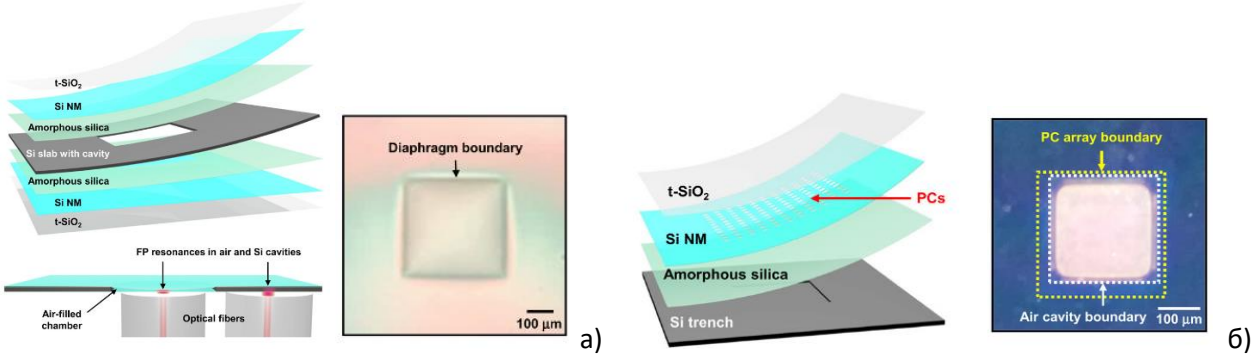


Рис. 3. Структура а) биологически растворяемого датчика на основе интерферометра Фабри-Перо; б) и на основе фотонно-кристаллической структуры б) [7].

## Выводы

Рассмотренные в обзоре исследования подтверждают, что применение волоконно-оптических датчиков при лечении черепно-мозговых травм открывает ряд уникальных возможностей и преимуществ перед традиционными методами мониторинга и диагностики, что способствует разработке новых подходов лечения, позволяя лучше понимать механизмы повреждения и восстановления областей мозга.

Представленные в обзоре датчики обладают высокой точностью измерения, устойчивостью к внешним воздействиям, и открывают новые возможности для непрерывного мониторинга состояния мозга, что в свою очередь позволяет своевременно выявлять критические изменения и предпринимать необходимые меры для предотвращения серьезных последствий.

Таким образом, волоконно-оптические датчики являются важными инструментами нейрохирургии и существенно улучшают качество медицинской помощи пациентам с травмами головного мозга, повышают шансы на успешное восстановление.

## Благодарности

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского национального исследовательский технического университета имени А.Н. Туполева-КАИ («Приоритет-2030»).

Материалы представлены на Международной научно-практической конференции «Современные подходы и практические инициативы в инженерных науках» (г. Казань, 2–3 октября 2025 года).

## Список литературы

1. Epidemiology, outcomes, and risk factors of traumatic brain injury in Bangladesh: a prospective cohort study with a focus on road traffic injury-related vulnerability / F. N. Rahman, S. Das, M. Kader, S. R. Mashreky // Frontiers in Public Health. – 2025. – Т. 13. – Epidemiology, outcomes, and risk factors of traumatic brain injury in Bangladesh. – С. 1514011.

2. Comparative Efficacy of MRI and CT in Traumatic Brain Injury: A Systematic Review M. M. Dabas, A. D. Alameri, N. M. Mohamed [et al.]. – Text : electronic // Cureus. – 2024. – Comparative Efficacy of MRI and CT in Traumatic Brain Injury.
3. Prediction of prognosis in patients with cerebral contusions based on machine learning / H. Liu, Y. Su, M. Peng [et al.] // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – № 1. – P. 31993.
4. Shnyakin, P. G. Use of invasive intracranial pressure monitoring in patients with severe traumatic brain injury / P. G. Shnyakin, A. V. Botov, Y. S. Mamaeva // S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry. – 2024. – Vol. 124. – № 4. – P. 164.
5. Intrathecal antibiotic therapy for neurosurgical infectious complications / N. V. Bragina, V. I. Gorbachev, E. S. Netesin, I. L. Petrova // Russian Journal of Anesthesiology and Re animatology. – 2023. – № 1. – P. 63.
6. Multiplexed optical fiber sensors for dynamic brain monitoring / Y. Zhang, Y. Hu, Q. Liu [et al.] // Matter. – 2022. – Vol. 5. – № 11. – P. 3947-3976.
7. Fiber-Based Electrochemical Biosensors for Monitoring pH and Transient Neu rometabolic Lactate / M. A. Booth, S. A. N. Gowers, M. Hersey [et al.] // Analytical Chemistry. – 2021. – Vol. 93. – № 17. – P. 6646-6655.
8. Bioresorbable optical sensor systems for monitoring of intracranial pressure and tempera ture / J. Shin, Z. Liu, W. Bai [et al.] // Science Advances. – 2019. – Vol. 5. – № 7. – P.eaaw1899.

# APPLICATION OF FIBER-OPTIC SENSORS AND SENSING SYSTEMS FOR DYNAMIC MONITORING OF BRAIN BIOMARKERS IN TRAUMATIC BRAIN INJURIES

***A. A. Kamaleeva [1], B. I. Valeev[1], A. Zh. Sakhabutdinov [1,2]***

[1] Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation

[2] Russian Academy of Engineering
125009, Moscow, lane Gazetny, 9k4

**Absrtact.** The study examines the specific features of using fiber-optic sensors for monitoring key brain biomarkers employed in the detection and prevention of complications in traumatic brain injuries. Proposals for the development of multiplexed sensors capable of simultaneously measuring up to four parameters are discussed. Promising designs of a biologically dissolvable sensor based on a Fabry–Perot interferometer and photonic crystal structures are presented. It is concluded that fiber-optic sensors make it possible not only to perform high-precision measurements of physiological parameters but also to enable the early detection of brain tissue damage and the assessment of the effectiveness of therapeutic interventions.

**Keywords:** fiber-optic sensor, biomarkers, potentiometric sensor, amperometric sensor, biodegradable Fabry–Perot interferometer-based sensor, biodegradable photonic crystal-based sensor.

Материалы представлены на Международной научно-практической конференции «Современные подходы и практические инициативы в инженерных науках» (г. Казань, 2-3 октября 2025 года).

Статья представлена в редакцию 15 августа 2025 г.