EDN: UISDGQ DOI: https://doi.org/10.65912/2782-5507.2026.23.4.008
УДК: 681.513.8 *2.2.6*

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЗРЕЛОСТИ ВНЕДРЕТАБНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВБР: БИОМЕДИЦИНСКИЕ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОХИМИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ[1]

А. Н. Д. Альхуссейн[1], М.Р. Ради[2], С.В. Курынцев[1], Б. И. Валеев[1], Т.А. Аглиуллин[1], О. Г. Морозов[1], А. Ж. Сахабутдинов[1]

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

[2] Центр исследований и разработок в области информационных технологий университета Куфы
Ирак, Эн-Наджаф

Аннотация: Во второй статье серии рассмотрены биомедицинские, химические и биохимические измерительные системы на основе волоконных брэгговских решёток (ВБР) с точки зрения их зрелости внедрения и практических ограничений. Эти области характеризуются высокой публикационной активностью и значительным разнообразием сенсорных решений, однако большинство предложенных систем остаётся на стадиях лабораторной верификации или ограниченных пилотных испытаний. Для анализа использована пятиуровневая шкала зрелости внедрения, предложенная в первой статье серии, позволяющая различать концептуальные разработки, лабораторные прототипы, пилотные демонстрации, краткосрочное внедрение в реальные условия и долговременное применение в реальных условиях эксплуатации. Показано, что биомедицинские системы на основе ВБР обладают значительным потенциалом для физиологического мониторинга, реабилитации, протезирования, малоинвазивной хирургии и биохимической диагностики, однако их практическое внедрение ограничивается требованиями к биосовместимости, миниатюризации, стерилизации, механической надёжности, клинической верификации и долговременной стабильности при реальном использовании. Химические и биохимические ВБР-системы, в свою очередь, обычно требуют функциональных покрытий, преобразующих структур или гибридных оптических схем, что повышает чувствительность и селективность, но одновременно усложняет калибровку, температурную компенсацию и обеспечение долговременной повторяемости отклика. Установлено, что для обеих групп приложений основной барьер связан не с принципиальной измерительной способностью ВБР, а с переходом от чувствительного лабораторного элемента к устойчивой, воспроизводимой и пригодной к эксплуатации измерительной системе.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решётка, волоконно-оптические датчики, биомедицинские измерительные системы, химические измерительные системы, биохимические измерительные системы, функциональные покрытия, биосовместимость, температурная компенсация, зрелость внедрения, лабораторная верификация, практическое применение.

[1] Настоящая статья является частью серии русскоязычных публикаций, подготовленных на основе перевода и авторской адаптации оригинальной статьи: Alhussein, A.N.D.; Radi, M.R.; Kuryntsev, S.V.; Valeev, B.I.; Agliullin, T.A.; Morozov, O.G.; Sakhabutdinov, A.Z. Lab-to-Field Transition in FBG Sensors: A Quantitative Assessment of Literature-Reported Deployment Maturity. *Sensors* 2026, *26*, 4403. DOI: 10.3390/s26144403. Оригинальная статья опубликована MDPI на условиях лицензии CC BY 4.0; структура и объём материала изменены в соответствии с тематикой настоящей публикации.

1. Введение

В первой статье серии была предложена методологическая основа для количественной оценки зрелости внедрения измерительных систем на основе волоконных брэгговских решёток (ВБР) [1]. Было показано, что значительная часть публикаций в данной области остаётся сосредоточенной на концептуальных, модельных и лабораторно-ориентированных уровнях зрелости, тогда как работы, содержащие доказательства внедрения в реальные условия и долговременного эксплуатационного применения, представлены существенно реже. Такой результат указывает на необходимость более детального анализа отдельных прикладных областей, поскольку характер барьеров внедрения существенно зависит от типа измеряемого параметра, способа преобразования сигнала, условий интеграции датчиков и требований к эксплуатации полной измерительной системы.

Настоящая статья посвящена двум группам приложений, для которых характерны высокая исследовательская активность и одновременно выраженные ограничения практического внедрения: биомедицинским измерительным системам, а также химическим и биохимическим измерительным системам на основе ВБР. Эти направления объединяет то, что высокая чувствительность отдельных сенсорных элементов сама по себе не обеспечивает готовности к реальному применению. В биомедицинских задачах решающими становятся клиническая применимость, биосовместимость, миниатюризация, стерилизация, механическая надёжность, безопасность и устойчивость работы при длительном контакте с пациентом или медицинским инструментом. В химических и биохимических измерениях практическая применимость систем определяется стабильностью функциональных покрытий, селективностью и обратимостью отклика, эффективностью температурной компенсации, воспроизводимостью изготовления и стабильностью калибровочных характеристик при длительной эксплуатации.

Биомедицинские приложения ВБР-систем включают физиологический мониторинг, носимые медицинские устройства, реабилитационные комплексы, протезирование, малоинвазивную хирургию и биохимическую диагностику. В этих задачах датчики на основе ВБР позволяют регистрировать давление, деформацию, усилие, температуру и ряд физиологических или биомеханических параметров. Однако переход от лабораторного прототипа к клинически значимому устройству требует проверки в условиях, которые значительно сложнее стандартной лабораторной верификации. Поэтому зрелость таких систем должна оцениваться не только по чувствительности и точности, но и по готовности к безопасной, воспроизводимой и долговременной работе в медицинской практике.

Химические и биохимические измерительные системы на основе ВБР имеют иную природу ограничений. В отличие от измерения деформации или температуры, где воздействие непосредственно приводит к сдвигу брэгговской длины волны, химический или биохимический параметр обычно должен быть преобразован в оптический отклик через функциональный материал, покрытие, микроструктуру или гибридную оптическую схему. Поэтому измерительные характеристики таких систем определяются не только самой решёткой, но и стабильностью промежуточного преобразующего слоя, его селективностью, чувствительностью к температуре и долговременным поведением в рабочей среде.

Цель настоящей статьи состоит в оценке зрелости внедрения биомедицинских, химических и биохимических измерительных систем на основе ВБР и выявлении факторов, ограничивающих их переход от лабораторной верификации к практическому применению. Основное внимание уделено не только достигнутым измерительным характеристикам, но и системным барьерам, связанным с интеграцией датчиков, стабильностью преобразующих элементов, калибровкой, компенсацией внешних воздействий, долговременной надёжностью и пригодностью к эксплуатации в реальных условиях.

2. Биомедицинские, химические и биохимические приложения ВБР-систем: общая логика анализа

Исследуем две группы приложений измерительных систем на основе ВБР, для которых характерно сочетание высокой исследовательской активности и ограниченной зрелости практического внедрения: биомедицинские измерительные системы, а также химические и биохимические измерения. Эти направления занимают значительную долю современного публикационного массива по ВБР-сенсорам, однако в большинстве случаев остаются сосредоточенными на лабораторной верификации, экспериментальных прототипах и ограниченных пилотных проверках.

Выбор этих областей для совместного анализа обусловлен не только их высокой представленностью в литературе, но и сходством системных барьеров внедрения. В биомедицинских приложениях переход к практическому использованию определяется клинической применимостью, биосовместимостью, миниатюризацией, безопасностью, стерилизацией и долговременной стабильностью работы сенсорной системы. В химических и биохимических приложениях ключевыми ограничениями становятся стабильность функциональных покрытий, селективность, обратимость отклика, температурная компенсация, повторяемость изготовления и сохранность калибровки в рабочей среде.

Таким образом, в обеих группах приложений зрелость внедрения определяется не только чувствительностью отдельной ВБР, но и свойствами полной измерительной системы. Поэтому дальнейший анализ направлен на выявление факторов, препятствующих переходу от лабораторно подтверждённых сенсорных решений к устройствам, пригодным для устойчивой работы в реальных медицинских, химических и биохимических условиях.

2.1. Биомедицинские сенсорные системы

Биомедицинские приложения относятся к числу наиболее активно развивающихся направлений использования измерительных систем на основе ВБР. Несмотря на значительную долю таких работ в современном публикационном массиве, их зрелость внедрения остаётся ниже, чем в ряде конструкционных и промышленных приложений. Для настоящего анализа была сформирована выборка из 50 репрезентативных исследований, предназначенная для оценки уровня зрелости внедрения, требований к интеграции и практических ограничений реализации.

Биомедицинские применения измерительных систем на основе ВБР охватывают физиологический мониторинг, реабилитацию, протезирование, малоинвазивную хирургию и биохимическую диагностику. В ряде исследований датчики на основе ВБР объединяются с другими оптическими измерительными методами для регистрации нескольких физиологических или биохимических параметров в рамках одной платформы. Например, были предложены интегрированные оптические системы, включающие ВБР, интерферометрические и плазмонные чувствительные элементы, для одновременной регистрации биомаркеров и температуры, что обеспечивает параллельное определение нескольких клинически значимых переменных [2].

Носимые и реабилитационные приложения относятся к числу наиболее активно развивающихся направлений. Датчики на основе ВБР интегрировались в «умный» текстиль, системы анализа походки и чувствительные к давлению носимые устройства для непрерывной физиологической оценки. Гибкие датчики давления на основе ВБР продемонстрировали чувствительность до 13,37 пм/кПа и были применены для регистрации подошвенного

давления в задачах реабилитации и оценки движений [3]. Исследования с участием добровольцев также продемонстрировали возможность одновременной регистрации сигналов дыхания, сердечной деятельности и речи с помощью носимых датчиков на основе ВБР. При этом точность распознавания речи в контролируемых условиях превышала 96% [4].

Протезные системы представляют собой отдельную область биомедицинского применения датчиков на основе ВБР. Сети датчиков на основе ВБР, встроенные в современные протезы стопы, использовались для регистрации распределения деформаций, условий нагружения и механизмов передачи энергии во время ходьбы. Экспериментальные исследования показали повышение энергетической эффективности до 15,5% для оптимизированных конструкций протезов, что демонстрирует ценность распределённых измерений для биомеханической оценки и проектирования протезов [5].

Малоинвазивные и имплантируемые измерительные системы образуют ещё одну группу биомедицинских приложений. Гибридные устройства ВБР—Фабри–Перо были разработаны для одновременного измерения давления и температуры в компактных биосовместимых структурах. Чувствительность к давлению превышает 200 пм/кПа при сохранении возможности измерения температуры, что позволяет рассматривать такие устройства в качестве перспективных средств для внутренних физиологических измерений [6]. В хирургических приложениях инструменты на основе ВБР использовались для оценки жёсткости тканей и контроля усилий во время эндоскопических процедур. Недавние исследования продемонстрировали применение таких систем *in vivo* в хирургических условиях, подтвердив техническую реализуемость подхода и одновременно выявив проблемы, связанные с клиническим внедрением [7].

Методы машинного обучения используются для интерпретации сигналов и оценки параметров в биомедицинских системах на основе ВБР. К числу таких применений относятся неинвазивный мониторинг глюкозы, мультимодальный физиологический мониторинг и системы поддержки принятия клинических решений [8, 9].

Классификация по уровню зрелости показывает, что большинство биомедицинских измерительных систем на основе ВБР остаётся в пределах уровней 2 и 3. Исследования уровня 1 встречаются относительно редко и в основном представлены концептуальными конструкциями биосенсоров и модельными работами, ещё не перешедшими к экспериментальной проверке [10]. Исследования уровня 2 главным образом демонстрируют техническую реализуемость в контролируемых лабораторных условиях, тогда как исследования уровня 3 включают ограниченную проверку с участием людей или в приближённых к эксплуатации сценариях [3–5]. Лишь ограниченное число публикаций достигает уровня 4, при котором измерительные системы на основе ВБР оцениваются в клинически релевантных условиях, включая реабилитационный мониторинг и биохимические измерения с использованием реальных образцов [2,7,11]. В проанализированном наборе данных не было выявлено примеров устойчивого долгосрочного применения в реальных условиях эксплуатации, соответствующего уровню 5.

Измерительные системы на основе ВБР активно исследуются для применения в носимых медицинских устройствах, реабилитации, протезировании и малоинвазивной хирургии, рисунок 1.



Рис.1. Обзор биомедицинских приложений измерительных систем на основе ВБР и проблем, связанных с их практическим внедрением.

Несмотря на разнообразие биомедицинских приложений, основные барьеры внедрения связаны преимущественно с клинической интеграцией, а не с принципиальной способностью датчиков на основе ВБР регистрировать физиологические или биомеханические сигналы. Носимые и реабилитационные системы требуют проверки на более крупных и разнообразных группах пациентов, увеличения продолжительности наблюдений, а также оценки стабильности датчиков при многократном ежедневном использовании. Для протезных приложений дополнительно необходимы надёжные способы встраивания, механическая долговечность и стабильная передача деформации при циклической нагрузке.

Для малоинвазивных и имплантируемых систем ограничения являются более строгими. Практическое применение таких систем требует миниатюризации, использования биосовместимых материалов, возможности стерилизации, обеспечения механической прочности и безопасной интеграции с существующими хирургическими и диагностическими инструментами. Эти требования делают переход от экспериментальных прототипов к клинически пригодным устройствам более сложным, чем во многих конструкционных или промышленных приложениях.

В таблице 1 обобщены репрезентативные прикладные ограничения, возникающие при переходе биомедицинских измерительных систем на основе ВБР от контролируемой лабораторной проверки к клинически значимому применению.

Таким образом, биомедицинские измерительные системы на основе ВБР уже подтвердили техническую реализуемость регистрации физиологических и биомеханических параметров. Однако их переход к клиническому применению ограничивается требованиями, которые не могут быть полностью воспроизведены в стандартных лабораторных экспериментах. Дальнейшее развитие данного направления требует проведения клинических испытаний, оценки долговременной стабильности измерительных характеристик и совершенствования конструкций датчиков для обеспечения их надёжной работы в медицинской практике.

2.2. Химические и биохимические измерения

Химические и биохимические приложения отличаются от традиционных измерений на основе ВБР тем, что определяемое вещество, как правило, не воздействует на брэгговскую решётку непосредственно. При измерении температуры и продольной деформации изменение брэгговской длины волны непосредственно обусловлено изменением температуры или деформации оптического волокна. В химических и биохимических датчиках, напротив, для преобразования воздействия определяемого вещества в оптический сигнал обычно используются функциональные покрытия или дополнительные преобразующие структуры. Взаимодействие определяемого вещества с таким функциональным материалом может изменять степень его набухания, показатель преломления, оптические потери или механические напряжения. В зависимости от конструкции датчика изменение свойств функционального материала приводит к деформации чувствительного участка или изменению характеристик оптического сигнала, регистрируемого измерительной системой.

Такой непрямой механизм преобразования позволяет регистрировать концентрацию газов, изменения pH, биохимические маркеры, влажность, а также процессы, связанные с коррозией и изменением состава окружающей среды. Однако в этом случае практическая применимость датчика определяется уже не только свойствами самой брэгговской решётки, но и стабильностью всей преобразующей части системы. Ключевое значение приобретают повторяемость функционального слоя, его селективность, обратимость отклика, устойчивость к температурным воздействиям, долговременная стабильность калибровки и требования к системе опроса. Эти факторы концептуально обобщены на рисунке 2.

Хотя химические и биохимические измерения составляют значительную долю исследований, связанных с датчиками на основе ВБР, большинство описанных систем по-прежнему находится на стадии лабораторной верификации. Это указывает на сохраняющийся разрыв между высокой чувствительностью, достигаемой в контролируемых экспериментах, и уровнем практической зрелости, необходимым для стабильной долговременной работы в реальных условиях эксплуатации.

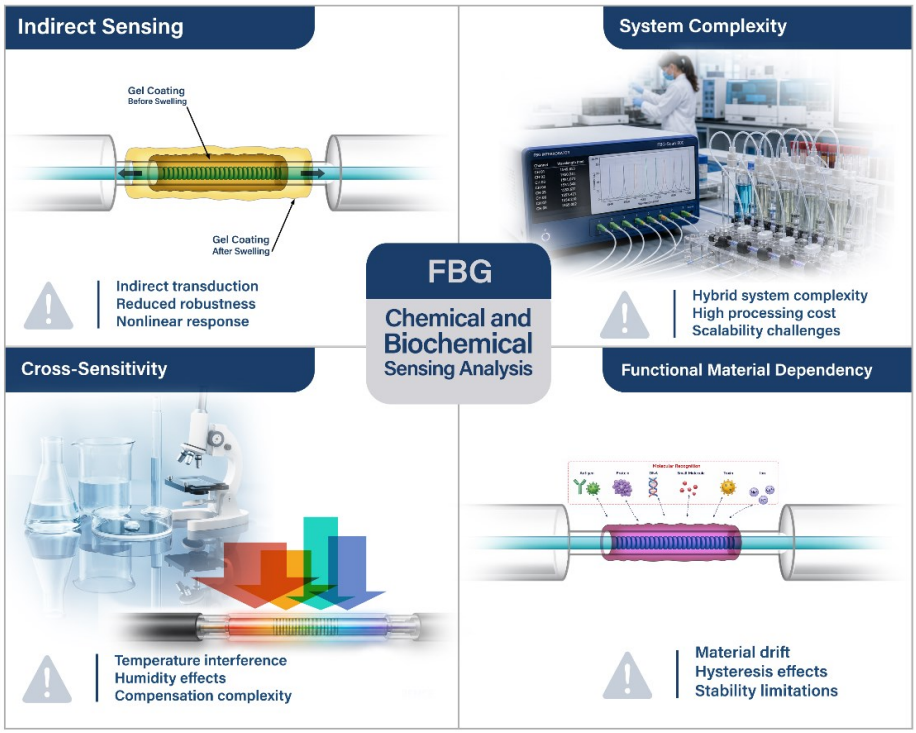


Рисунок 2. Концептуальная схема барьеров, ограничивающих переход химических и биохимических измерительных систем на основе ВБР к практическому внедрению.

Анализ 41-го исследования показал, что большинство химических и биохимических измерительных систем на основе ВБР остаётся на стадии лабораторной верификации, соответствующей уровню 2. Лишь ограниченное число работ содержит результаты пилотных испытаний, соответствующих уровню зрелости 3, или краткосрочного применения измерительных систем в реальных условиях эксплуатации, соответствующего уровню 4. Доказательств долгосрочного применения таких систем в реальных условиях эксплуатации, соответствующего уровню 5, в рассмотренной выборке выявлено не было. Репрезентативные барьеры, установленные по результатам анализа рассмотренных исследований, обобщены в таблице 2.

Практические ограничения такого подхода становятся особенно заметными в конкретных измерительных системах, где регистрируемый отклик определяется не только свойствами самой ВБР, но и характеристиками функционального преобразующего слоя. Например, датчики на основе ВБР с покрытиями из палладия (Pd) и полидиметилсилоксана (PDMS) применялись для мониторинга водорода и метана в трансформаторном масле в диапазонах концентраций 5–2146 ppm H_2 и 3–1551 ppm CH_4 соответственно [12]. Аналогично, сенсорная схема Микельсона–ВБР, разработанная для обнаружения диметилметилфосфоната (DMMP), обеспечила чувствительность 86,44 дБ/ppm при пределе обнаружения 0,1767 ppb [13]. Несмотря на высокую чувствительность, отклик таких систем определяется промежуточными материалами и процессами преобразования, а не прямым взаимодействием определяемого вещества с брэгговской решёткой [14].

Ограничения, связанные с материалами, особенно характерны для широко используемых функциональных покрытий. Датчики водорода на основе Pd и Pd-сплавов могут быть подвержены фазовым переходам, а также замедленной динамике отклика и восстановления [15,16]. Полимерные датчики pH и влажности, в свою очередь, чувствительны к набуханию, температурно-зависимому поведению и постепенной деградации материала [17,18]. Поэтому долговременные характеристики датчиков на основе ВБР с функциональным материалом часто определяются стабильностью и обратимостью отклика покрытия, а не только собственными свойствами брэгговской решётки.

Перекрёстная температурная чувствительность остаётся одной из устойчивых проблем химических и биохимических измерений на основе ВБР. Во многих рассмотренных системах изменение температуры вызывает сдвиг спектрального сигнала, сопоставимый по величине со сдвигом, обусловленным воздействием определяемого вещества, или превышающий его. В связи с этим часто требуются дополнительные измерительные элементы, опорные решётки или процедуры температурной компенсации. Поэтому в многопараметрических системах широко применяются каскадные конфигурации ВБР, опорные каналы и методы обработки на основе матрицы чувствительности [22, 26, 34, 39].

Для повышения селективности датчики на основе ВБР во многих работах объединяются с интерферометрами, микрофлюидными устройствами, плазмонными структурами или спектроскопическими методами. Такие архитектуры позволяют улучшить измерительные характеристики, однако одновременно усложняют оптическую схему и алгоритмы обработки сигналов. Например, системы мониторинга метана объединяют спектроскопию с модуляцией длины волны и измерения на основе ВБР, что требует нескольких этапов обработки для выделения полезного сигнала [22]. Сходные подходы описаны для биохимических измерительных платформ, использующих каскадные чувствительные элементы и матричные методы демодуляции [26,30].

Система опроса также остаётся важным практическим фактором. В ряде измерительных систем информация об измеряемом параметре содержится в положении и форме узких резонансных линий или в сложной структуре оптического спектра. Для её извлечения необходимы спектральный опрос с высоким разрешением и устойчивые алгоритмы обработки измерительных сигналов [31–33].

Таблица 1**.** Репрезентативные прикладные ограничения биомедицинских измерительных систем.

Область применения	**Измеряемый параметр**	**Измерительные характеристики**	**Условия проверки**	**Уровень**	**Явное ограничение**	**Влияние на внедрение**	**Источник**
Носимые медицинские системы / человеко-компьютерное взаимодействие	Дыхание, частота сердечных сокращений, речь	Высокая точность: ≤ 2 уд./мин, ~96%	Пилотное исследование с участием людей	3	Ограниченная клиническая применимость и отсутствие крупномасштабной проверки	Ограниченное клиническое внедрение	[4]
Малоинвазивная хирургия	Трёхмерное измерение усилия	Разрешающая способность по силе 2,6 мН в осевом направлении и 0,25 мН в радиальных направлениях	Лабораторные условия + ex vivo	2	Размер датчика и сложность системы затрудняют интеграцию в хирургические инструменты	Ограниченное внедрение в хирургическую практику	[19]
Колоноскопические системы	Сила взаимодействия	Низкая погрешность измерения: ~2–4%	Симулятор + ex vivo	2	Условия испытаний не обеспечивают точного воспроизведения реального взаимодействия ткани и инструмента	Снижение клинической надёжности	[20]
Эндоскопическая хирургия	Усилия зажима и протягивания	Высокая точность	Ex vivo	2	Отсутствие прямого количественного измерения усилия; зависимость от косвенных методов оценки	Снижение надёжности силовой обратной связи	[21]
Щипцы для малоинвазивной хирургии	Усилие захвата	Хорошая чувствительность и повторяемость	Ex vivo	2	Ограниченная температурная компенсация и подверженность перекрёстной чувствительности	Снижение робастности измерений	[21]

Таблица 2**.** Ключевые барьеры, ограничивающие практическое внедрение химических и биохимических измерительных систем на основе ВБР.

Область применения	**Измеряемый параметр / система**	**Условия проверки**	**Уровень**	**Ключевое ограничение**	**Влияние на внедрение**	**Источник**
Системы газового анализа (H_2, CH_4, CO_2)	ВБР с функциональными покрытиями: Pd, металлоорганические каркасные структуры (MOF), полимеры	Лабораторные условия → реальные условия	2–4	Функциональные покрытия и перекрёстная температурная чувствительность	Ограничение долговременной стабильности и точности в реальных условиях	[12,15,16,22–24]
Химические измерения в жидких средах на основе показателя преломления	Системы регистрации показателя преломления и определения состава среды	Лабораторные условия	2	Непрямой механизм преобразования	Снижение селективности и робастности	[12,25]
Многопараметрические биохимические измерения	pH, холестерин, биохимические маркеры	Лабораторные условия / пилотные испытания	2–3	Зависимость от калибровки и перекрёстная чувствительность	Необходимость сложной компенсации и обработки данных	[16,26–29]
Гибридные и многосенсорные системы	Интерферометр + ВБР / микрофлюидные системы	Лабораторные условия / пилотные испытания	2–3	Сложность системы	Затруднение интеграции и обслуживания	[26,28,30]
Перспективные оптические измерительные платформы	Наклонные ВБР, микро-ВБР, спектральные измерительные системы	Лабораторные условия	2	Сложность опроса сигнала	Необходимость дорогостоящей демодуляции и обработки данных	[31–33]
Перспективные структуры на основе ВБР	Вытравленные, перетянутые и фазосдвинутые ВБР	Лабораторные условия	2	Сложность изготовления	Ограничение масштабируемости и повторяемости	[33–35]
Экологический мониторинг и системы контроля в реальных условиях	Газовый мониторинг, контроль коррозии, инфраструктурные измерения	Реальные / приближённые к реальным условия	3–4	Ограничения масштабирования и стоимость инфраструктуры	Ограничение крупномасштабного внедрения	[22,36]
Межобластное обобщение	Различные области применения	Лабораторные условия → пилотные испытания	2–3	Ограниченная проверка в реальных условиях	Сдерживание перехода к внедрению в реальные условия	[23,24,37,38]

Примечание – Приведённые уровни зрелости внедрения характеризуют диапазоны, установленные по совокупности исследований соответствующих областей применения. Указанные диапазоны отражают различия в условиях экспериментальной проверки и степени практического внедрения рассмотренных измерительных систем и не являются оценкой зрелости отдельного исследования.

Существующие пилотные примеры и проверки в условиях, приближённых к реальным, следует рассматривать как демонстрации реализуемости внедрения, но не как доказательство полной эксплуатационной зрелости. Так, сети мониторинга метана были испытаны в восьми измерительных точках на действующем газоперерабатывающем объекте [22], а системы мониторинга аккумуляторов были проверены в коммерческих литий-ионных элементах в течение более чем 100 циклов заряда-разряда [40]. Эти исследования важны, поскольку выходят за пределы стандартных лабораторных условий. Однако они всё ещё дают ограниченные доказательства в отношении старения, повторной калибровки, требований к обслуживанию и стабильности характеристик при длительной работе в репрезентативных эксплуатационных условиях.

По мере увеличения числа измерительных точек проблема внедрения смещается от характеристик отдельных датчиков к архитектуре всей мониторинговой системы. Многоточечные измерительные системы на основе ВБР требуют высокой скорости опроса, достаточного энергетического бюджета оптических каналов, надёжной работы системы передачи сигналов и необходимой производительности обработки данных [22]. Сходные ограничения системного уровня наблюдаются в приложениях мониторинга аккумуляторов, где измерительные характеристики должны быть согласованы со стоимостью реализации, сложностью корпусирования и практической возможностью интеграции датчиков в коммерческие элементы [36].

В совокупности эти наблюдения показывают, что основное ограничение химических и биохимических измерений на основе ВБР связано с переходом от чувствительных лабораторных устройств к стабильным измерительным системам, пригодным для практического внедрения. Заявленные чувствительности и пределы обнаружения подтверждают, что оптический отклик во многих случаях достаточен для регистрации целевого компонента или параметра среды. Однако возможность практического внедрения определяется стабильностью функционального покрытия и калибровочных характеристик, эффективностью температурной компенсации, а также надёжностью системы опроса и измерительной системы в целом при эксплуатации. Поэтому дальнейший прогресс в этой области следует оценивать не только по снижению пределов обнаружения или повышению чувствительности, но и по повторяемости, дрейфу, селективности, требованиям к обслуживанию и результатам долговременной верификации в репрезентативных средах.

3. Заключение

Во второй статье серии рассмотрены биомедицинские, химические и биохимические измерительные системы на основе ВБР как области с высокой исследовательской активностью, но ограниченной зрелостью практического внедрения. Проведённый анализ показывает, что в обеих группах приложений продемонстрирована возможность регистрации широкого круга физиологических, биомеханических, химических и биохимических параметров с использованием измерительных систем на основе ВБР. Однако эти результаты в большинстве случаев получены в лабораторных условиях, на пилотных установках или в ограниченных сценариях проверки, тогда как доказательства долговременной работы в реальных условиях эксплуатации остаются недостаточными.

Для биомедицинских измерительных систем основное ограничение связано не с принципиальной способностью ВБР регистрировать давление, деформацию, усилие, температуру или физиологические параметры, а с переходом к клинически пригодным устройствам. Носимые, реабилитационные, протезные, малоинвазивные и имплантируемые системы требуют длительной проверки на реальных пользователях или пациентах, оценки стабильности при многократном использовании, биосовместимого и стерилизуемого исполнения, миниатюризации, механической надёжности и безопасной интеграции с медицинскими инструментами или диагностическими процедурами.

Для химических и биохимических ВБР-систем ключевые барьеры определяются непрямым механизмом преобразования измеряемого параметра в оптический отклик. Практическая работоспособность таких систем зависит от функциональных покрытий, преобразующих структур, гибридных оптических схем, температурной компенсации и устойчивости к деградации в рабочей среде. Высокая чувствительность и низкие пределы обнаружения, показанные в лабораторных условиях, не являются достаточным доказательством эксплуатационной зрелости, если не подтверждены повторяемость отклика, селективность, обратимость, калибровочная стабильность и работоспособность при длительном воздействии реальных факторов среды.

Общее для рассмотренных областей ограничение состоит в том, что зрелость внедрения определяется свойствами полной измерительной системы, а не только характеристиками отдельной ВБР. Для перехода к более высоким уровням зрелости необходимо проводить длительные испытания измерительных систем в условиях, соответствующих их практическому применению, включая клинические и эксплуатационные испытания. При этом особое значение имеют стандартизация процедур калибровки, эффективная температурная компенсация, воспроизводимость изготовления функциональных элементов и надёжность конструкции, обеспечивающие стабильность измерений при длительной эксплуатации.

Таким образом, биомедицинские, химические и биохимические измерительные системы на основе ВБР находятся на этапе, когда дальнейший прогресс должен оцениваться не только по росту чувствительности, точности или снижению пределов обнаружения, но и по доказательствам эксплуатационной пригодности. В следующей статье серии будет рассмотрена область мониторинга технического состояния конструкций, где связь между измеряемым параметром и откликом ВБР является более прямой, а уровень зрелости внедрения в целом выше.

Работа выполнена в рамках государственного задания FZSU-2026-0009, рег. номер НИОКТР 126020516512-7.

Список использованных источников

1. Альхуссейн А. Н. Д. Количественная оценка зрелости внедрения измерительных систем на основе ВБР: методология и публикационные тенденции / А.Н.Д. Альхуссейн и др. // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2026. – Т. 6, № 3(22). – С.42–51.
2. Gong P. Femtosecond laser micromachining triple-modality optical fiber sensor with multiband optical decoupling for simultaneous dual-biomarkers and temperature monitoring / P. Gong et al. // Sens. Actuators B Chem. – 2026. – Т. 451. – С. 139429.
3. Xu S. Fabrication of High-Sensitivity Flexible Fiber Bragg Gratings Pressure Sensors for Comprehensive Plantar Pressure Monitoring / S. Xu et al. // IEEE Sens. J. – 2024. – Т. 24, № 20. – С. 32150–32163.
4. Tang J. Fiber Bragg Grating-Based Multimodal Sensing for Human Respiration, Heartbeat, and Voice With CNN-Driven Speech Recognition / J. Tang et al. // IEEE Sens. J. –2026. – Т. 26, № 6. – С. 8188–8195.
5. Del Chicca S. Comparative Analysis of ESAR Prosthetic Foot Designs Using Fiber Bragg Grating Sensors / S. Del Chicca et al. // IEEE Medical Measurements & Applications (MeMeA), 2025. – Chania, Greece: IEEE. – 2025. –P. 1–6.
6. Li R. A Highly Integrated Biomedical Pressure-Temperature Sensor / R. Li et al. // IEEE Sensors Journal. – 2024. – V. 24, № 20. – P. 32203–32212.
7. Violakis G. In Vivo Study on the Safe Use of a Novel Intraoperative Sensing Tool for Tissue Stiffness Assessment in Endoscopic Surgery / G. Violakis et al. // Biosensors. – 2025. – V. 15, № 9. – P. 581.
8. Gupta S. Diabetic detection through optical biosensor using artificial neural network model / S. Gupta et al. // Life Cycle Reliab. Saf. Eng. – 2026. – V. 15, № 1. – P. 77–85.

9. Pulcinelli M. и др. Combining fiber Bragg grating sensors and artificial intelligence in medicine / M. Pulcinelli et al. // APL Photonics. – 2025. – V. 10, № 3. – P. 030901.
10. Raj L. V. Design of FBG-based optical biosensor for the detection of malaria / Raj L. V. et al.// J. Opt. – 2025. DOI: https:// doi.org/10.1007/s12596-025-0278-x
11. Upadhyaya A. M. Design and Development of a Fiber Bragg Grating Sensor System for Hand Function Monitoring in Rehabilitation / A. M. Upadhyaya et al. // J. Biophotonics. – 2025. – V. 18, № 11. – P. e202500302.
12. Fawad F. Monitoring Hydrogen and Methane Gases in Transformer Oil Using Palladium and Polydimethylsiloxane Coated Fiber Bragg Grating Sensors / F. Fawad et al. // IEEE Access. – 2025. – V. 13. – P. 182846–182855.
13. Chen Y. Simultaneous measurement of trace dimethyl methyl phosphate and temperature using all fiber Michaelson interferometer cascaded FBG / Y. Chen, C. Li, X. Yang // Opt. Express. – 2023. – V. 31, № 4. – P. 6203.
14. R D. Time-Domain Simulation and Accuracy Evaluation of a Fiber Bragg Grating Sensor for Detection of Tris (1-chloro-2-propyl) Phosphate / D.R et al. // 2025 International Conference on Communication, Computer, and Information Technology (IC3IT). Mandya, India: IEEE, 2025. – P. 1–5.
15. Dissanayake K. P. Tantalum and Tantalum–Palladium Coated FBGs for Low-Concentration Hydrogen Sensing / K. P. Dissanayake et al. // J. Light. Technol. – 2026. – V. 44, № 7.– P. 2776–2782.
16. Buchfellner F. Linearized Temperature-Compensated Hydrogen Sensing With Partially Pd-Alloy-Coated π-FBGs / Buchfellner F. et al. // IEEE Sens. J. – 2025. – V. 25, № 8. – P. 12974–12982.
17. Gao S. pH-Responsive PANI Thin-Film Sensor Based on Etched Fiber Gratings / S. Gao // IEEE Sens. J. – 2026. – V. 26, № 4. – P. 5536–5545.
18. Yu Z. High-sensitivity FBG humidity sensors enabled by electrohydrodynamically printed carbon-nanofiber functionalized gratings / Z. Yu et al. // AIP Adv. – 2026. – V. 16, № 2. – P. 025254.
19. Xie P. Design and Validation of a High-Sensitivity FBG-Based Triaxial Force Sensor With Serially Configured Flexures for Percutaneous Puncture / P. Xie et al. // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2025. – V. 74. – P. 1–13.
20. Guo J. A Novel FBG-Based Sensing Array for Interaction Force Awareness During Colonoscopy / Guo J., Zuo S. // IEEE ASME Trans. Mechatron. – 2025. – V. 30, № 6. – P. 7798–7808.
21. Guo J. A Novel Flexible Forceps With FBG-Based Force-Sensing and Feedback for Endoscopic Surgery / J. Guo et al. // IEEE Sens. J. – 2025. – V. 25, № 15. – P. 28427–28434.
22. Floridia C. Hybrid Optical Fiber Multipoint Monitoring System Using WMS and FBG: Laboratory and Field Tests / C. Floridia et al. // IEEE Sens. J. – 2026. – V. 26, № 6. – P. 8316–8327.
23. Sun H. A ZIF-8-Functionalized Evanescent Wave Coupled Optical Fiber Bragg Grating for CO_2 Detection / H. Sun et al. // J. Light. Technol. – 2025. – V. 43, № 24. – P. 11152–11158.
24. Nan Y.-G. Real-time detection of multiple trace gases using fiber Bragg gratings combined with gas ionization / Nan Y.-G. at al. // Opt. Express. – 2026. – V. 34, № 8. – P. 15006.
25. Lu P. BNNT Coated FBGs in Tapered Optical Fibers for Temperature and Hydrophilic Gas Sensing / P. Lu et al. // J. Light. Technol. – 2026. – V. 44, № 7. – P. 2656–2663.
26. Li X. Ultrasensitive Mach–Zehnder Interferometer Sensor Combined With FBG for Detection of Cholesterol, pH, and Temperature / X. Li et al. // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2025. – V.74. – P. 1–8.
27. Liu Y. Coupling in situ online and offline techniques for analyzing the corrosion mechanism of sulfur-containing compounds on stone cultural relics / Y. Liu et al. // Measurement. – 2026.– V. 261. – P. 119944.

28. Chen M. Strain and salinity sensing characterization of micron-sized polymer spring sensing structures in 3D printed microfluidic channels / M. Chen et al. // Sens. Actuators Phys. – 2026. – V.402. – P. 117635.
29. Liu Y. In situ continuous decoding of temperature-pH-strain variations in moss disease on sandstone / Y. Liu et al. // Measurement. – 2026. – V. 271. – P. 120878.
30. Feng C. Multi-Channel Seven-Core Fiber SPR Sensor Without Temperature and Channel Crosstalk / Feng C. et al. // J. Light. Technol. – 2024. – V. 42, № 6. – P. 2144–2150.
31. Wang H. Spectral Demodulation of Tapered Microfiber Grating Using MobileNet / H. Wang et al. // IEEE Sens. J. – 2025. – V. 25, № 2. – P. 2791–2797.
32. Zhou Y. Real-time monitoring of spectral dynamics through multiresonant fiber grating in particle suspension / Zhou Y. et al. // Measurement. – 2026. – V. 272. – P. 120974.
33. Maiti S. Notch-based sensing in hybrid apodized fiber Bragg gratings / S.Maiti, V. Singh // Opt. Quantum Electron. – 2025. – V. 58, № 1. – P. 5.
34. Fan H. Humidity and Temperature Measurement via Dual-Taper Based Michelson Interferometer / H. Fan et al. // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2025. – V. 74. – P. 1–8.
35. Cheng C.-C. A Novel-Type Biosensor Using a Wedge-Shaped Side-Polished Fiber Grating for Detecting the Immunoglobulin G / Cheng C.-C. et al. // IEEE Sens. J. – 2026. – V. 26, № 8. – P. 11796–11805.
36. Ren F. Internal Distributed Temperature Prediction of Lithium-Ion Battery Based on Physics-Informed Temporal Convolutional Network / Ren F. et al. // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2026.– P. 1–11.
37. Macioski G. Multiscale monitoring of alkali–silica reaction in concrete with embedded fiber Bragg grating sensors / G. Macioski, L. F. M.Sanchez, M. H. F. De Medeiros // Constr. Build. Mater. – 2025. – V. 495. – P. 143718.
38. Fang S. Surface plasmon resonance based ultra-sensitive cholesterol detection using AuNPs/MPBA/β-CD functionalized gold-coated tilted fiber Bragg grating / S. Fang et al.// Sens. Actuators B Chem. – 2025. – V. 443. – P. 138227.
39. Fan S. Phase-Shifted Fiber Bragg Grating for Simultaneous Measurement of Pressure and Temperature / Fan S. et al. // IEEE Sens. J. – 2025. – V. 25, № 2. – P. 2769–2775.
40. Keppetipola N. M. Visualizing electrolyte dynamics and monitoring salt concentration to improve commercial Si-based Li-ion batteries / N. M. Keppetipola et al. // eTransportation. – 2026. – V. 28. – P. 100554.

QUANTIFICATION OF IMPLEMENTATION MATURITY MEASUREMENT SYSTEMS BASED ON VBR: BIOMEDICAL, CHEMICAL AND BIOCHEMICAL APPLICATIONS

A. N. D. Alkhussein[1], M.R. Radi[2], S.V. Kuryntsev [1], B. I. Valeev [1], T.A. Agliullin[1], O. G. Morozov[1], A. Zh. Sahabutdinov[1]

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

[2] The Center for Research and Development in the field of Information Technology
at the University of Kufa
Najaf, Iraq

Abstract: The second article in the series examines biomedical, chemical, and biochemical measurement systems based on fiber Bragg gratings (FBGs), focusing on their deployment maturity and practical limitations. These fields are characterized by high publication activity and a wide variety of sensing solutions; however, most proposed systems remain at the stages of laboratory validation or limited pilot testing. The analysis employs the five-level deployment maturity scale introduced in the first article of

the series, which distinguishes conceptual developments, laboratory prototypes, pilot demonstrations, short-term deployment under real-world conditions, and long-term operation in actual service environments. The results show that FBG-based biomedical systems have considerable potential for physiological monitoring, rehabilitation, prosthetics, minimally invasive surgery, and biochemical diagnostics. However, their practical deployment is constrained by requirements for biocompatibility, miniaturization, sterilization, mechanical reliability, clinical validation, and long-term stability during actual use. Chemical and biochemical FBG-based systems, in turn, typically require functional coatings, transduction structures, or hybrid optical configurations, which improve sensitivity and selectivity but simultaneously complicate calibration, temperature compensation, and the maintenance of long-term response reproducibility. It is established that, for both application groups, the main barrier is not the fundamental measurement capability of FBGs themselves, but rather the transition from a sensitive laboratory sensing element to a stable, reproducible measurement system suitable for practical operation.

Keywords: fiber Bragg grating; fiber-optic sensors; biomedical measuring systems; chemical measuring systems; biochemical measuring systems; functional coatings; biocompatibility; temperature compensation; maturity of implementation; laboratory verification; practical application.

Статья представлена в редакцию 01 октября 2026 г.