

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЗРЕЛОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВБР: МЕТОДОЛОГИЯ И ПУБЛИКАЦИОННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ¹

*А. Н. Д. Альхуссейн¹, М.Р. Ради², С.В. Курынцев¹, Б. И. Валеев¹,
Т.А. Аглиуллин¹, О. Г. Морозов¹, А. Ж. Сахабутдинов¹*

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: Предложен подход к количественной оценке зрелости внедрения измерительных систем на основе волоконных брэгговских решёток (ВБР) по данным публикационной активности и характеру экспериментальной проверки представленных решений. Актуальность такого анализа обусловлена тем, что рост числа публикаций по ВБР-датчикам не всегда отражает их фактическое продвижение к применению в реальных условиях эксплуатации. В качестве информационной базы использована выборка публикаций, проиндексированных в Scopus за период 2021–2026 гг. Для анализа разработана пятиуровневая классификация зрелости внедрения, включающая концептуальные и модельные исследования, лабораторные прототипы, испытательные стенды и пилотные демонстрации, краткосрочное внедрение в реальные условия, а также долговременное применение в реальных условиях эксплуатации. Всего было выявлено и классифицировано 10 960 публикаций. Установлено, что при устойчивом росте общего числа работ распределение публикаций по уровням зрелости остаётся практически стабильным и характеризуется выраженным преобладанием ранних стадий разработки. Уровни 1 и 2, соответствующие концептуальным, модельным и лабораторно-ориентированным исследованиям, составляют основную часть анализируемого массива, тогда как публикации, содержащие данные о внедрении в реальные условия и долговременной эксплуатации, представлены существенно реже. Географический анализ показал концентрацию публикационной активности в странах с развитой фотонной, инженерной и промышленной базой. Полученные результаты свидетельствуют о наличии устойчивого разрыва между интенсивностью научных исследований и подтверждённой эксплуатационной готовностью измерительных систем на основе ВБР. Предложенная классификационная схема может быть использована как основа для последующего анализа зрелости внедрения ВБР-систем в отдельных прикладных областях.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решётка, ВБР, волоконно-оптические датчики, измерительные системы, зрелость внедрения, лабораторная верификация, практическое применение, публикационный анализ, Scopus, уровни зрелости, переход от лабораторных исследований к реальным условиям эксплуатации.

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

Настоящая публикация открывает серию обзорно-аналитических статей, посвящённых оценке перехода измерительных систем на основе волоконных брэгговских решёток от лабораторной верификации к практическому применению в реальных условиях эксплуатации. Несмотря на устойчивый рост числа работ по датчикам на основе ВБР, остаётся недостаточно очевидным, в какой степени опубликованные решения действительно переходят от лабораторных прототипов и модельных исследований к полевым испытаниям, промышленному внедрению и долговременной эксплуатации.

Цель серии состоит в систематическом рассмотрении зрелости внедрения измерительных систем на основе ВБР в различных областях применения. Для этого используется единая пятиуровневая шкала, позволяющая различать концептуальные и модельные исследования, лабораторные прототипы, пилотные демонстрации, краткосрочное внедрение в реальные условия и долгосрочное применение в реальных условиях эксплуатации. Такой подход позволяет оценивать не только чувствительность, разрешение или точность отдельных датчиков, но и готовность полной измерительной системы к практическому использованию.

Серия включает пять взаимосвязанных публикаций. В первой статье рассматриваются методология анализа, принципы классификации зрелости внедрения и общие публикационные тенденции в области ВБР-измерений. Во второй статье анализируются биомедицинские, химические и биохимические измерительные системы, для которых характерны высокая исследовательская активность и значительные барьеры практической интеграции. Третья статья посвящена мониторингу технического состояния конструкций как одной из наиболее зрелых областей применения ВБР-систем. В четвёртой статье рассматриваются промышленный мониторинг технологических процессов и системы интеллектуального производства. Пятая, завершающая статья, посвящена измерениям в жёстких условиях эксплуатации и системным факторам, определяющим практическую готовность ВБР-технологий к долговременному применению.

Датчики на основе волоконных брэгговских решёток (ВБР) относятся к числу наиболее широко исследуемых оптических измерительных технологий благодаря высокой чувствительности, возможности мультиплексирования, компактным размерам и устойчивости к электромагнитным помехам [1]. За последнее десятилетие развитие конструкций датчиков, методов опроса и алгоритмов обработки сигналов существенно расширило области их применения, включая мониторинг технического состояния конструкций, биомедицинские измерительные системы, промышленный мониторинг, химические измерения и регистрацию параметров в жёстких условиях эксплуатации [2]. Эти разработки обеспечили повышение точности измерений, чувствительности и возможностей многопараметрической регистрации.

Датчики на основе ВБР продемонстрировали значительный потенциал при измерении деформации, температуры, давления и вибрации в сложных технических системах, включая мостовые сооружения, трубопроводы, аэрокосмические конструкции и медицинские устройства [3–5]. Промышленные и экологические приложения также показали способность измерительных систем на основе ВБР работать в сложных эксплуатационных средах, в том числе при воздействии химически агрессивных веществ, повышенных температур и высоких давлений [6–8]. В совокупности эти результаты могут создавать впечатление, что технология датчиков на основе ВБР уже достигла высокой степени технической зрелости.

Однако практическое внедрение измерительных систем на основе ВБР остаётся неравномерным для различных областей применения. Значительная часть описанных систем проходит проверку в контролируемых лабораторных условиях, тогда как опытные разработки, краткосрочные внедрения в реальные условия и примеры длительного применения

в реальных условиях эксплуатации представлены значительно реже [8, 9]. Это различие показывает, что высокие измерительные характеристики сами по себе не являются достаточным признаком зрелости внедрения.

Следовательно, необходима систематическая оценка, позволяющая определить, насколько далеко измерительные системы на основе ВБР продвинулись от лабораторной верификации к практическому применению. Такая оценка должна связывать публикационную активность, уровень зрелости внедрения, прикладные ограничения и эволюцию заявленных измерительных характеристик.

В настоящей серии авторы предлагают трёхкомпонентную аналитическую оценку современного состояния технологии датчиков на основе ВБР, в рамках которой ставятся следующие вопросы:

1. В какой степени измерительные системы на основе ВБР продвинулись от лабораторно-ориентированных исследований к внедрению в реальные условия и применению в реальных условиях эксплуатации?
2. Как различается зрелость внедрения в основных областях применения, включая мониторинг технического состояния конструкций, биомедицинские измерительные системы, промышленный мониторинг, химические измерения и регистрацию параметров в жёстких условиях эксплуатации?
3. Как за последнее десятилетие изменялись заявленные измерительные характеристики репрезентативных систем на основе ВБР?
4. Какие факторы продолжают ограничивать переход измерительных систем на основе ВБР от лабораторной верификации к долгосрочному применению в реальных условиях эксплуатации?

Для ответа на эти вопросы первое направление анализа предусматривает количественную оценку опубликованных исследований и разграничение лабораторно-ориентированных и ориентированных на реальные условия работ. Второе направление связано с рассмотрением практических применений измерительных систем на основе ВБР в различных областях с особым вниманием к их возможностям и ограничениям в реальных условиях эксплуатации. Третье направление включает оценку эволюции заявленных измерительных характеристик на основе репрезентативных литературных данных.

Основная цель серии состоит в оценке перехода измерительных систем на основе ВБР от лабораторных исследований к практическому внедрению. Объединяя публикационную статистику, классификацию по уровню зрелости внедрения, анализ прикладных областей и тенденции изменения измерительных характеристик, исследование выявляет основные факторы, определяющие возможность практического применения и ограничивающие продвижение измерительных систем на основе ВБР к долгосрочной эксплуатации в реальных условиях.

В первой статье серии рассматриваются методологические основания количественной оценки зрелости внедрения измерительных систем на основе ВБР. Основное внимание уделено формированию публикационной выборки, принципам классификации работ по уровням зрелости, анализу распределения публикаций за период 2021–2026 гг. и выявлению общего разрыва между лабораторно-ориентированными исследованиями и работами, содержащими признаки внедрения в реальные условия эксплуатации.

2. Методология исследования

2.1. Источник данных и временной интервал

В качестве источника публикаций была использована международная база данных Scopus, обеспечивающая широкий охват рецензируемой литературы в области инженерных наук, оптики, фотоники и прикладных исследований. Выбор этой базы данных обусловлен

её пригодностью для количественного и качественного анализа и возможностью формирования сопоставимой выборки публикаций по заданным поисковым критериям. Поиск и выгрузка публикационных данных из базы Scopus выполнены 5 июля 2026 г.

Анализ был ограничен публикациями, проиндексированными в период с 2021 по 2026 г. Такой временной интервал выбран для оценки современных направлений развития измерительных систем на основе ВБР, прежде всего работ, связанных с их практическим внедрением, проверкой в реальных условиях и применением в условиях эксплуатации. Фокусирование на данном периоде позволяет одновременно охарактеризовать текущую исследовательскую активность и оценить степень зрелости технологий на основе ВБР с точки зрения их перехода от лабораторных исследований к практическому использованию.

2.2. Стратегия поиска

Для выявления релевантных публикаций была использована структурированная стратегия поиска по ключевым словам. Поиск был организован таким образом, чтобы охватить исследования, относящиеся к измерительным системам на основе ВБР, независимо от области применения, типа измеряемого параметра и уровня экспериментальной проверки. Поиск выполнялся по названиям, аннотациям и ключевым словам публикаций с использованием следующего поискового запроса Scopus:

TITLE-ABS-KEY("Fiber Bragg Grating" OR "FBG")

Поиск выполнялся по названиям, аннотациям и ключевым словам публикаций. Такой подход обеспечивал широкий охват релевантных работ и позволял оценить распределение исследований по уровням зрелости внедрения без предварительного ограничения выборки конкретными экспериментальными условиями, областями применения или сценариями практического использования.

В анализ включались только рецензируемые журнальные статьи, опубликованные на английском языке. После извлечения данных дублирующиеся записи и нерелевантные публикации исключались по результатам ручной проверки. Это позволило сформировать выборку, соответствующую тематике датчиков, измерительных систем и мониторинговых решений на основе ВБР.

2.3. Рамочная схема классификации зрелости внедрения

Для систематической и сопоставимой оценки технологической зрелости измерительных систем на основе ВБР в различных областях применения была разработана структурированная схема классификации. В отличие от традиционного бинарного разделения исследований на лабораторные и полевые, предложенная схема использует пятиуровневую шкалу зрелости внедрения.

Каждое исследование классифицировалось по совокупности критериев, включающих: (i) среду проведения испытаний; (ii) тип экспериментальной проверки или верификации; (iii) длительность экспериментальной оценки; (iv) уровень системной интеграции; (v) степень доказательности внедрения в реальные условия. Эти критерии характеризуют не только измерительные характеристики системы, но и её практическую готовность к применению в реальных задачах. Пять уровней зрелости внедрения определены следующим образом.

Уровень 1 — концепция и/или модель. В исследовании представлены теоретическая концепция, численная модель или результаты моделирования без изготовления и проверки функционального прототипа.

Уровень 2 — лабораторный прототип. В исследовании представлен прототип измерительной системы на основе ВБР, экспериментально проверенный в контролируемых ла-

бораторных условиях. Основное внимание уделено чувствительности, точности, разрешению и калибровочным характеристикам, при этом влияние реальных условий эксплуатации не рассматривается или рассматривается ограниченно.

Уровень 3 — испытательный стенд / пилотная демонстрация. В исследовании приведены результаты проверки системы за пределами стандартной лабораторной демонстрации: в рамках пилотных экспериментов, контролируемых испытаний с участием живых субъектов или на испытательных стендах, воспроизводящих реалистичные сценарии эксплуатации. На этом уровне подтверждается работоспособность системы в более сложных условиях, однако долговременная стабильность и надёжная работа в реальной эксплуатационной среде ещё не доказаны.

Уровень 4 — краткосрочное внедрение в реальные условия. Измерительная система была развёрнута в реальных условиях эксплуатации, и с её использованием были получены экспериментальные или мониторинговые данные. Однако такое внедрение остаётся краткосрочным, проектно-специфичным и ограниченным по масштабу, поэтому не даёт достаточных доказательств устойчивой работы системы во времени.

Уровень 5 — применение в реальных условиях эксплуатации. В исследовании показана стабильная долговременная работа измерительной системы на основе ВБР в реальных эксплуатационных условиях. При этом представлены доказательства её надёжности, устойчивости, ремонтпригодности и интеграции в эксплуатационные рабочие процессы на протяжении продолжительного периода.

Прозрачность и повторяемость классификации обеспечивались процедурой принятия решений, в рамках которой каждое исследование последовательно относилось к соответствующему уровню зрелости. Классификация публикаций выполнялась в автоматизированном режиме с последующей ручной проверкой результатов на основании совокупности рассмотренных критериев.

Следует подчеркнуть, что предложенная классификация направлена именно на оценку зрелости внедрения и не является ранжированием систем по их измерительным характеристикам. Высокая чувствительность, точность или разрешающая способность, достигнутые в лабораторных условиях, сами по себе не означают более высокий уровень технологической зрелости. Это разграничение принципиально важно для выявления разрыва между потенциальными возможностями технологии и её подтверждённой готовностью к практическому применению.

Предложенный подход обеспечивает количественную и сравнительную оценку перехода измерительных систем на основе ВБР от лабораторных исследований к внедрению в реальные условия. Он также позволяет выявить специфические для отдельных областей применения барьеры и факторы, ограничивающие продвижение таких систем к более высоким уровням зрелости.

2.4. Формирование данных и принципы классификации

Всего было выявлено и классифицировано 10 960 публикаций, проиндексированных в период с 2021 по 2026 г. На рисунке 1 представлено абсолютное число публикаций и их относительное распределение по пяти уровням зрелости внедрения за указанный период. Общее число публикаций заметно увеличивалось в течение анализируемого интервала, что отражает устойчивый рост исследовательской активности в области измерительных систем на основе ВБР. Вместе с тем, относительное распределение публикаций по уровням зрелости остается в целом стабильным.

Полученное распределение демонстрирует выраженное смещение в сторону нижних уровней зрелости. Уровень 1 устойчиво доминирует на протяжении всего анализируемого периода и составляет приблизительно 70–75% всех публикаций. Это свидетельствует о том,

что значительная часть современной исследовательской активности по-прежнему сосредоточена на концептуальных и модельных исследованиях. Уровень 2 является второй по численности категорией с относительно стабильной долей около 17–20%, что дополнительно подтверждает преобладание лабораторной проверки в современной исследовательской практике.

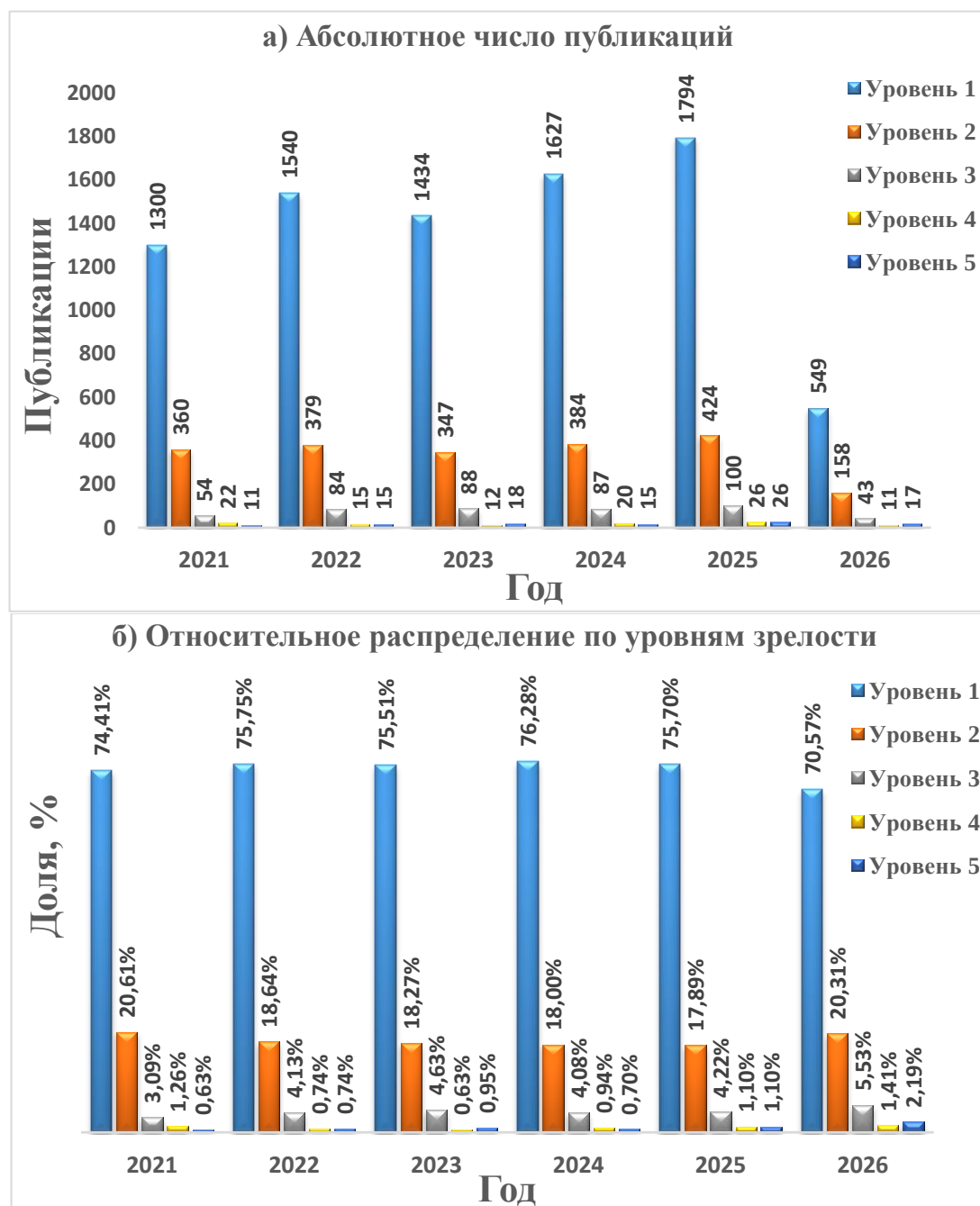


Рис.1. Динамика распределения публикаций, посвящённых измерительным системам на основе ВБР, по пяти уровням зрелости внедрения за период 2021–2026 гг.: а) абсолютное число публикаций; б) относительное распределение

Представленность более высоких уровней зрелости существенно ниже. На уровень 3 приходится умеренная доля публикаций, составляющая приблизительно 3–5%. Работы, документирующие внедрение в реальные условия, встречаются значительно реже: публикации уровня 4 составляют около 0,5–1,5% от общего числа, тогда как публикации уровня

5 — менее 2% за весь исследуемый период. При этом уровни 4 и 5 имеют сопоставимые доли, однако, имеющиеся данные не позволяют делать обоснованные выводы об относительной сложности перехода между отдельными уровнями зрелости.

Таким образом, представленные результаты указывают не только на преобладание ранних стадий разработки, но и на сохраняющийся разрыв между исследовательской активностью и подтверждённой эксплуатационной зрелостью измерительных систем на основе ВБР. Небольшой рост доли работ, относящихся к более высоким уровням зрелости, наблюдаемый в последние годы, пока остаётся недостаточным для существенного изменения общей структуры распределения.

2.5. Статистический анализ и обсуждение

Несмотря на существенный рост числа публикаций, связанных с датчиками и измерительными системами на основе ВБР, общее распределение работ по уровням зрелости остаётся практически стабильным. Большинство исследований по-прежнему сосредоточено на уровнях 1 и 2, тогда как публикации, сообщающие о внедрении в реальные условия, составляют лишь небольшую долю анализируемого массива. Это показывает, что расширение исследовательской активности происходит главным образом за счёт разработки новых сенсорных концепций, моделей и лабораторных прототипов, а не за счёт перехода уже предложенных решений к применению в реальных условиях эксплуатации.

Географическое распределение публикаций, представленное на рисунке 2, дополнительно подчёркивает неравномерный характер глобальной исследовательской активности. Наибольшее число публикаций приходится на Китай; далее следуют США, Индия, Великобритания и Италия. Основной объём работ сосредоточен в странах с развитыми компетенциями в области фотоники, сильной инженерно-производственной базой и сформированными промышленными исследовательскими экосистемами.

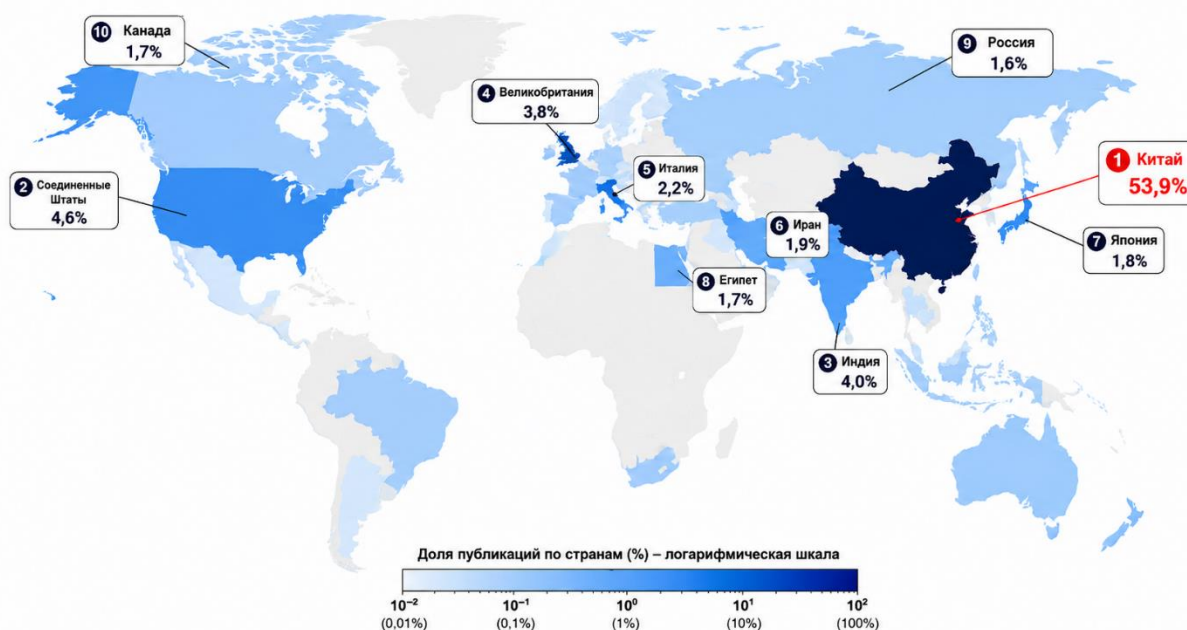


Рисунок 2. Глобальное географическое распределение публикаций, связанных с ВБР, за период 2021–2026 гг. Интенсивность цвета отражает относительную долю публикаций по странам с использованием логарифмической шкалы

При совместном рассмотрении публикационной активности и уровней зрелости внедрения выявляется дополнительная закономерность. Работы, содержащие данные

о краткосрочном внедрении в реальные условия или о длительном применении в реальных условиях эксплуатации, чаще относятся к регионам, где развито промышленное участие в мониторинге инфраструктуры и волоконно-оптических измерительных технологиях. Это указывает на то, что внедрение определяется не только уровнем научной активности, но и наличием промышленного спроса, инженерной инфраструктуры и практических возможностей для реализации мониторинговых систем.

Сравнение исследований низких уровней зрелости (уровни 1–2) с работами, ориентированными на реальные условия применения (уровни 4–5), показывает устойчивый разрыв между разработкой и внедрением. В отдельные годы число концептуальных, модельных и лабораторных исследований превышало число работ, посвящённых внедрению в реальные условия, более чем на порядок. Следовательно, рост объёма публикаций не обязательно сопровождается сопоставимым ростом практического применения измерительных систем на основе ВБР.

В целом полученные результаты показывают, что современный вызов для технологии датчиков на основе ВБР заключается не столько в разработке новых сенсорных концепций, сколько в продвижении уже предложенных решений к надёжной работе в практических условиях. Характер и степень выраженности этого вызова зависят от области применения и рассматриваются в следующих статьях серии.

3. Заключение

В первой статье серии предложена методологическая основа для количественной оценки зрелости внедрения измерительных систем на основе волоконных брэгговских решёток. Рассмотрен массив публикаций, проиндексированных в базе Scopus за период 2021–2026 гг., и сформирована классификационная схема, позволяющая различать пять уровней зрелости: от концептуальных и модельных исследований до долговременного применения в реальных условиях эксплуатации. Такой подход позволяет оценивать не столько факт разработки новых датчиков или измерительных схем, сколько степень их продвижения к практическому использованию.

Проведённый анализ 10 960 публикаций показал, что исследовательская активность в области датчиков и измерительных систем на основе ВБР продолжает устойчиво расти. Однако рост числа публикаций не сопровождается сопоставимым увеличением доли работ, в которых представлены данные о внедрении в реальные условия или длительном эксплуатационном применении. Основная часть публикаций по-прежнему сосредоточена на ранних уровнях зрелости: концептуальных, модельных и лабораторно-ориентированных исследованиях. Это указывает на сохраняющийся разрыв между интенсивностью научных разработок и подтверждённой эксплуатационной готовностью предлагаемых решений.

Высокая публикационная активность сама по себе не является достаточным признаком технологической зрелости. Значительная часть современных исследований направлена на разработку новых сенсорных концепций, повышение чувствительности, совершенствование методов опроса и лабораторную проверку прототипов. При этом переход к полевым испытаниям, масштабируемым мониторинговым системам и долговременной работе в реальных условиях остаётся существенно менее представленным в литературе.

Географический анализ публикаций выявил концентрацию исследований в странах с развитой фотонной, инженерной и промышленной базой. Это позволяет сделать вывод, что продвижение измерительных систем на основе ВБР к практическому внедрению определяется не только научной активностью, но и наличием промышленного спроса, инженерной инфраструктуры и возможностей для проверки систем в реальных эксплуатационных условиях.

Ключевой вызов для технологии измерительных систем на основе ВБР связан не столько с отсутствием новых технических решений, сколько с их переходом от лабораторной верификации к устойчивому практическому применению. Предложенная классификация зрелости внедрения создаёт основу для последующего анализа отдельных прикладных областей. В следующих статьях серии этот подход будет использован для оценки биомедицинских, химических, конструкционных, промышленных и предназначенных для жёстких условий эксплуатации измерительных систем на основе ВБР.

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

Список использованных источников

1. Juwet T. Monitoring of Composite Structures for Re-Usable Space Applications Using FBGs: The Influence of Low Earth Orbit Conditions / T. Juwet, G. Luyckx, A. Lamberti et al. // Sensors. – 2024. – Vol. 24. – Monitoring of Composite Structures for Re-Usable Space Applications Using FBGs. – № 1. – P. 306.
2. Investigation of fiber Bragg grating sensor measurability in concrete beams under static load conditions / M.H. Yassin, M.H. Farhat, M. Nahas, A.S. Saad // Heliyon. – 2024. – Vol. 10. – № 22. – P. e40105.
3. Kok S.P. Advances in Fiber Bragg Grating (FBG) Sensing: A Review of Conventional and New Approaches and Novel Sensing Materials in Harsh and Emerging Industrial Sensing / S.P.Kok, Y.I. Go, X. Wang, M.L.D. Wong // IEEE Sensors Journal. – 2024. – Vol. 24. – Advances in Fiber Bragg Grating (FBG) Sensing. – № 19. – P. 29485-29505.
4. Kouhrangiha F. Structural health monitoring: modeling of simultaneous effects of strain, temperature, and vibration on the structure using a single apodized π -Phase shifted FBG sensor / F. Kouhrangiha, M. Kahrizi, K. Khorasani // Results in Optics. – 2022. – Vol. 9. – Structural health monitoring. – P. 100323.
5. Alhussein A.N.D. Advancements in Optical Fiber Sensors for pH Measurement: Technologies and Applications / A.N.D. Alhussein, M.R.T.M. Qaid, T. Agliullin, B. Valeev et al. // Sensors. – 2025. – Vol. 25. – Advancements in Optical Fiber Sensors for pH Measurement. – № 14. – P. 4275.
6. Liu Q. A Review of the Research Progress of Sensor Monitoring Technology in Harsh Engineering Environments / Q. Liu, Y. Wang, F. Zhao, C. Zheng, J. Xie // Sensors. – 2025. – Vol. 25. – № 20. – P. 6308.
7. Lala S. National Strategy Paper on Fiber Bragg Grating (FBG) Sensors: Status, Challenges and Recommendations / S. Lala, I. Biswas, N. Basumallick, P. Biswas, B. Basu // Transactions of the Indian National Academy of Engineering. – 2025. – Vol. 10. – National Strategy Paper on Fiber Bragg Grating (FBG) Sensors. – № 4. – P. 637-647.
8. Rodriguez-Ramirez D.A. Review of Optical Fiber Sensors: Principles, Classifications and Applications in Emerging Technologies / D.A. Rodriguez-Ramirez, J.R. Martinez-Angulo, J.D. Filoteo-Razo, J.C. Elizondo-Leal, A. Diaz-Manriquez, D. Jauregui-Vazquez, J.P. Lauterio-Cruz, V.P. Saldivar-Alonso // Photonics. – 2025. – Vol. 13. – Review of Optical Fiber Sensors. – № 1. – P. 40.
9. Tijani I.A. he-Art Review with Future Research Directions / I.A. Tijani, T.G. Wakjira, M.S. Alam, N. Uddin // Archives of Computational Methods in Engineering. – 2026. – Vol. 33. – Digital Image Correlation (DIC) for Structural Health Monitoring of Bridge Systems. – № 3. – P. 4325-4341.

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE IMPLEMENTATION MATURITY AND OPERATIONAL READINESS OF FBG-BASED MEASURING SYSTEMS

*A.N. D. Alhussein¹, M. R. Radi², S. V. Kuryntsev¹, B. I. Valeev¹,
T. A. Agliullin¹, O. G. Morozov¹, A. Zh. Sakhabutdinov¹*

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
10, st. K.Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

²Information Technology Research and Development Centre, University of Kufa
Najaf, Iraq

Annotation. Fiber Bragg grating (FBG)-based sensors have become established as one of the key technologies in fiber-optic sensing owing to their high sensitivity, multiplexing capability, compactness, and operability under challenging environmental conditions. Despite the substantial body of research in this field, the transition of FBG-based sensing systems from laboratory validation to practical application remains uneven across different application domains. In this review, this transition is examined through a multi-level assessment that integrates publication trends, deployment maturity, application domains, and reported sensing performance. The analysis of publications from 2021 to 2026 shows that most reported systems still remain at the stage of laboratory validation, whereas examples of field deployment and operation under real service conditions remain comparatively limited. Significant differences are identified among application domains. Structural health monitoring and selected harsh-environment sensing applications provide the most convincing evidence of practical deployment. At the same time, biomedical and chemical sensing systems, despite intense research activity, generally remain at lower maturity levels. The results indicate that deployment maturity is determined not only by sensing performance, but also by the relationship between the transduction mechanism and the target measurement, integration requirements, resistance to environmental influences, system complexity, and the demand for a specific application. Overall, the analysis shows that the main challenge for FBG-based sensor technology is currently associated not so much with achieving high sensing performance as with ensuring reliable, scalable, and robust operation under real service conditions.

Key words: fiber Bragg grating; FBG; fiber optic sensors; measuring systems; implementation maturity; laboratory verification; practical application; publication analysis; Scopus; maturity levels; transition from laboratory research to real operating conditions.

Статья представлена в редакцию 10 июля 2026 г.