



УДК 009

doi: 10.55287/22275398_2026_59_15

ОПТИМИЗАЦИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА РАССТОЯНИИ

В. В. Плотников
М. Г. Аль-Хажжар
Е. С. Асташева

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

Аннотация

В статье выполнен детальный анализ уязвимостей различных типов ВОД (точечных на основе волоконных Брэгговских решеток — FBG, и распределенных — рефлектометров OTDR) к деградации сигнала на расстоянии. Установлено, что для распределенных систем доминирующим фактором, снижающим пространственное разрешение, является хроматическая дисперсия, в то время как для точечных датчиков критичным становится совокупное влияние затухания и шума усиления.

Научная новизна исследования заключается в предложении оригинальной комбинированной схемы, интегрирующей гибридный каскад усиления на основе эрбиевого волоконного усилителя (EDFA) и распределенного Рамановского усилителя, в совокупности с адаптивным блоком компенсации дисперсии на базе программируемых Брэгговских решеток с электронной обратной связью. В отличие от известных аналогов, данная схема обеспечивает не просто увеличение мощности сигнала, но и целенаправленное подавление шумовой составляющей и динамическую коррекцию дисперсионных искажений, адаптируясь к изменяющимся параметрам волокна.

Практическая значимость исследования определяется тем, что на основе численного моделирования продемонстрировано, что внедрение разработанного метода позволяет для модели распределенного акустического датчика (DAS) на дистанции 150 км повысить отношение сигнал/шум на 4.8 дБ и сохранить пространственное разрешение на уровне ± 3.5 метра, что недостижимо для классических систем с дискретным усилением. Полученные результаты открывают возможности для создания экономически эффективных систем мониторинга сверхбольшой протяженности с повышенной надежностью, востребованных в нефтегазовом секторе, энергетике и на объектах транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова

Волоконно-оптический датчик, дальний мониторинг, затухание, дисперсия, волоконная Брэгговская решетка (FBG), эрбиевый усилитель (EDFA), Рамановское усиление, отношение сигнал/шум, пространственное разрешение.

Дата поступления в редакцию

26.05.2026

Дата принятия к печати

01.06.2026

Актуальность

Расширение областей применения волоконно-оптических датчиков (ВОД) для мониторинга протяженных объектов, таких как магистральные трубопроводы, линии электропередач и периметры

стратегических зон, выдвигает на первый план проблему обеспечения стабильности и достоверности измерительного сигнала на дистанциях, превышающих 100 км. Ключевыми физическими ограничениями, детерминирующими деградацию сигнала, выступают затухание, хроматическая и поляризационная модовая дисперсия, а также накопление шумов оптических усилителей. Существующие коммерческие системы часто требуют организации промежуточной инфраструктуры, что существенно повышает стоимость проектов и снижает их надежность. В этой связи разработка комплексных методов оптимизации, позволяющих повысить дальность действия ВОД без потери точности и пространственного разрешения, представляет собой значимую научно-техническую задачу.

Цель работы

Проведение анализа факторов, лимитирующих работу волоконно-оптических датчиков на больших расстояниях, и разработка комбинированного метода оптимизации, направленного на компенсацию затухания и дисперсионных искажений измерительного сигнала.

Методология

Исследование базируется на аналитическом моделировании процессов распространения оптического импульса в волокне с использованием нелинейного уравнения Шрёдингера. Для верификации теоретических выкладок применялся метод численного моделирования в среде MATLAB. Были проведены сравнительные расчеты для стандартных конфигураций ВОД и систем, включающих предложенные решения. Анализу подверглись такие ключевые параметры, как отношение сигнал / шум (SNR), ширина импульса и пространственное разрешение.

Результаты исследования

Современные волоконно-оптические датчики представляют собой сложные измерительные системы, классификация которых осуществляется по нескольким ключевым признакам. Наиболее существенным с точки зрения задач дальнего мониторинга является разделение по принципу действия на точечные, квазираспределенные и полностью распределенные системы. Каждый из этих классов обладает характерными особенностями, определяющими их применимость в системах мониторинга протяженных объектов [3].

Точечные датчики на основе волоконных брэгговских решеток (FBG) занимают особое положение в арсенале средств волоконно-оптического мониторинга. Принцип их действия основан на явлении селективного отражения на определенной длине волны, определяемой периодом решетки. Изменение внешних условий, таких как температура или механическая деформация, приводит к смещению брэгговской длины волны, описываемому уравнением [8]:

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - p_\varepsilon) \cdot \varepsilon + (\alpha + \xi) \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где p_ε — фотоупругий коэффициент,
 ε — приложенная деформация,
 α — коэффициент теплового расширения,
 ξ — термооптический коэффициент.

Температурная чувствительность волоконно-брэгговской решетки (FBG) зависит от материала волокна и длины волны Брэгга. Для наиболее распространенных решеток, записанных в геосилакат-

ное волокно на длине 1550 нм, она составляет примерно 10–11 пм/°С [8]. В расчетах, представленных в данной работе, принято значение 10 пм/°С. Основным преимуществом данной технологии является возможность мультиплексирования множества датчиков на одном волокне с использованием методов спектрального или временного разделения каналов. Однако для систем сверхдального мониторинга критическим ограничением становится необходимость обеспечения высокой спектральной стабильности и разрешающей способности измерительной аппаратуры, поскольку дисперсионные эффекты могут приводить к искажению спектральных характеристик и, как следствие, к погрешностям в определении измеряемых параметров [10].

Интерферометрические датчики, включая схемы Маха-Цендера, Фабри-Перо и Саньяка, представляют другой класс точечных и квазираспределенных измерительных систем. Их работа основана на анализе фазовых сдвигов между интерферирующими световыми пучками. Чувствительность интерферометрических датчиков к фазовому сдвигу может достигать 10^{-6} рад/ $\sqrt{\text{Гц}}$, что обуславливает их исключительно высокую точность. Однако для применения в системах дальнего мониторинга существенным недостатком является сложность стабилизации рабочей точки и высокая чувствительность к внешним воздействиям на всей протяженности волокна. Дисперсионные эффекты в длинных волоконных трактах приводят к дополнительным фазовым искажениям, что требует применения сложных методов компенсации и калибровки [10].

Распределенные волоконно-оптические датчики составляют отдельный обширный класс измерительных систем, наиболее приспособленных для мониторинга протяженных объектов. Рефлектометры во временной области (OTDR) являются исторически первым и наиболее распространенным типом распределенных датчиков. Принцип их действия основан на анализе интенсивности обратного рэлеевского рассеяния, при этом пространственное разрешение определяется длительностью зондирующего импульса и может быть оценено как [2]:

$$\Delta z = c \cdot \tau / (2n), \quad (2)$$

где c — скорость света,

τ — длительность импульса,

n — коэффициент преломления сердцевины волокна.

Для стандартных коммерческих систем пространственное разрешение обычно составляет 1–10 метров при дальности действия до 50–80 км. Основным ограничением для применения в системах сверхдального мониторинга является быстрое уменьшение отношения сигнал/шум с ростом расстояния, обусловленное двукратным затуханием сигнала при прохождении прямого и обратного пути.

Фазочувствительные рефлектомеры (Ф-OTDR) представляют собой дальнейшее развитие технологии OTDR и обеспечивают значительно более высокую чувствительность к вибрационным воздействиям. В основе их работы лежит анализ флуктуаций фазы обратного рэлеевского рассеяния, что позволяет детектировать акустические и вибрационные воздействия с чувствительностью до нескольких наностран. Однако для систем дальнего мониторинга существенным вызовом является сохранение когерентности зондирующего излучения на всей протяженности волоконного тракта, что требует использования лазеров с исключительно узкой линией излучения и специальных методов компенсации поляризационных эффектов [1].

Рамановские рефлектометры (ROTDR) занимают важную нишу в распределенном температурном мониторинге, поскольку интенсивность спонтанного комбинационного рассеяния имеет выраженную температурную зависимость. Коэффициент температурной чувствительности для антистоксовой компоненты составляет пример 0,8°С при комнатной температуре, что позволяет достигать точности температурных измерений до 1°С при пространственном разрешении 1–3 метра. Однако

низкая интенсивность Рамановского рассеяния (примерно на три порядка меньшая, чем рэлеевского) существенно ограничивает дальность действия таких систем, обычно не превышающую 30 км без использования специализированных методов усиления [4].

Бриллюэновские рефлектометры (BOTDR/BOTDA) обеспечивают одновременное измерение температуры и деформации на основе анализа частотного сдвига бриллюэновских линий, описываемого уравнением:

$$\nu B(T, \varepsilon) = \nu B_0 + C\nu T \cdot \Delta T + C\nu \varepsilon^* \varepsilon, \quad (3)$$

где νB_0 — исходное значение бриллюэновской частоты,

$C\nu T$ и $C\nu \varepsilon$ — коэффициенты температурной и деформационной чувствительности соответственно.

Для стандартного одномодового волокна на длине волны 1550 нм бриллюэновский сдвиг составляет примерно 10,8 ГГц с коэффициентом температурной чувствительности 1,07 МГц/°С и деформационной чувствительностью 0,048 МГц/мкε. Технология BOTDA, основанная на использовании двух встречных световых пучков, позволяет достигать дальности до 100–150 км при пространственном разрешении 1–5 метров, однако требует сложного и дорогостоящего измерительного оборудования [5].

В *таблице 1* представлен сравнительный анализ основных типов волоконно-оптических датчиков с точки зрения их применимости в системах дальнего мониторинга. Анализ данных показывает, что каждый тип датчиков имеет свои оптимальные области применения, определяемые требованиями к дальности действия, пространственному разрешению и точности измерений.

Таблица 1

Сравнительные характеристики волоконно-оптических датчиков для систем дальнего мониторинга

Параметр	Точечные FBG	Интерферометрические	OTDR	Ф-OTDR	ROTDR	BOTDA
Максимальная дальность, км	100+	50–80	80–100	50–70	30–40	100–150
Пространственное разрешение	Точечное	Точечное/зональное	1–10 м	1–10 м	1–5 м	1–5 м
Измеряемые параметры	T, ε, вибрация	T, ε, вибрация, акустика	Потери, макростибы	Вибрация, акустика	Температура	T, ε
Чувствительность	Высокая	Сверхвысокая	Средняя	Высокая	Средняя	Высокая
Влияние дисперсии	Существенное	Критическое	Существенное	Критическое	Существенное	Существенное
Стоимость реализации	Средняя	Высокая	Низкая	Средняя	Средняя	Высокая

Анализ представленных данных позволяет сделать вывод о том, что для систем сверхдальнего мониторинга протяженных объектов наиболее перспективными являются технологии на основе волоконных брэгговских решеток и бриллюэновской рефлектометрии, однако их эффективное применение требует разработки специальных методов компенсации дисперсионных эффектов и затухания сигнала. Именно этим задачам и посвящена разработка комбинированного метода оптимизации, представленного в данном исследовании.

При распространении оптического сигнала в волокне на большие расстояния наблюдается комплекс деградационных процессов, существенно влияющих на точность измерений. Основным фактором ограничения дальности является затухание сигнала, обусловленное рэлеевским рассеянием,

поглощением в материале волокна и микроизгибами. Коэффициент затухания α в стандартном одномодовом волокне на длине волны 1550 нм составляет примерно 0,2 дБ/км, что приводит к ослаблению сигнала на 20 дБ при прохождении 100 км волокна [7]. Данное ослабление может быть выражено формулой:

$$P(L) = P(0) \cdot 10^{(-\alpha L/10)}, \quad (4)$$

где $P(0)$ — исходная мощность сигнала,
 $P(L)$ — мощность после прохождения расстояния L .

Не менее существенным ограничивающим фактором выступает дисперсия, приводящая к временному уширению оптических импульсов. Хроматическая дисперсия, складывающаяся из материальной и волноводной составляющих, определяется параметром $D(\lambda)$ и может быть рассчитана по формуле [3]:

$$\Delta\tau = D(\lambda) \cdot L \cdot \Delta\lambda, \quad (5)$$

где $\Delta\lambda$ — спектральная ширина источника излучения.

Для иллюстрации влияния дисперсии рассмотрим источник с относительно широкой линией $\Delta\lambda = 0.1$ нм. Следует отметить, что в высокочувствительных системах DAS на основе Ф-OTDR применяются лазеры с шириной линии на уровне $10^{-3} - 10^{-4}$ нм [1], что существенно снижает дисперсионные искажения. Тем не менее, оценка для $\Delta\lambda = 0.1$ нм демонстрирует порядок величины эффекта для систем общего назначения [4].

Поляризационная модовая дисперсия, хотя и оказывает меньшее влияние на современных волокнах, тем не менее вносит дополнительный вклад в ухудшение параметров сигнала, особенно заметный при использовании высокоскоростных систем мониторинга.

Накопление шумов в оптических усилителях представляет собой третью существенную проблему для систем дальнего мониторинга. Коэффициент шума усилителя F определяет минимально достижимый уровень шума в системе и может быть рассчитан по формуле [7]:

$$F = (SNR_{вх}) / (SNR_{вых}), \quad (6)$$

где $SNR_{вх}$ и $SNR_{вых}$ — отношения сигнал / шум на входе и выходе усилителя соответственно. В каскаде из N усилителей с одинаковыми коэффициентами шума общий коэффициент шума системы возрастает, что существенно ограничивает максимальную дальность действия при заданном требовании к отношению сигнал / шум на приемной стороне.

Для компенсации перечисленных деградационных эффектов нами предложен комбинированный метод оптимизации, основанный на совместном использовании гибридного усиления и адаптивной компенсации дисперсии. Основой метода является каскадная схема усиления, сочетающая эрбиевый волоконный усилитель и распределенное Рамановское усиление. Математически процесс Рамановского усиления может быть описан системой связанных уравнений, учитывающих взаимодействие волн накачки и сигнала [6]:

$$dP_s/dz = -\alpha_s P_s + g_R P_p P_s \text{ и } dP_p/dz = -\alpha_p P_p - (\omega_p/\omega_s) g_R P_p P_s, \quad (7)$$

где P_s и P_p — мощности сигнала и накачки, α_s и α_p — коэффициенты затухания на частотах сигнала и накачки,

g_R — коэффициент Рамановского усиления.

Преимущество предложенной схемы заключается в том, что распределенное Рамановское усиление позволяет снизить среднюю мощность сигнала в волокне, уменьшая влияние нелинейных эф-

фффектов, при этом обеспечивая лучшее отношение сигнал/шум по сравнению с системами, использующими только дискретные усилители. Согласно данным [6], усиление в 15 дБ в стандартном одномодовом волокне может быть достигнуто при мощности рамановской накачки порядка 300 мВт в конфигурации с двусторонней накачкой или при использовании волокон с увеличенной площадью модового поля. В классической схеме с односторонней накачкой в волокне SMF-28 для достижения аналогичного уровня усиления, как правило, требуется мощность 500–700 мВт [8]. В рамках данной работы для моделирования принято значение 300 мВт, соответствующее оптимизированной конфигурации.

Для компенсации дисперсионных искажений в предложенной схеме используется адаптивный блок на основе программируемых волоконных брэгговских решеток. Данные решетки позволяют реализовать передаточную функцию $H(\omega) = \exp[i(\beta_2 L \omega^2)/2]$, компенсирующую фазовый накопленный в волокне. Эффективность компенсации оценивалась путем расчета коэффициента уширения импульса $K = \tau_{\text{вых}}/\tau_{\text{вх}}$, где $\tau_{\text{вх}}$ и $\tau_{\text{вых}}$ — длительности импульса до и после прохождения компенсированного тракта. Моделирование показало, что использование адаптивной компенсации позволяет снизить коэффициент уширения с 2,8 до 1,2 на дистанции 150 км для импульсов длительностью 10 нс [2].

Для проверки эффективности предложенного метода было проведено численное моделирование в среде MATLAB с использованием специализированного пакета OptiSystem. Моделировалась система распределенного акустического датчика на основе рефлектометра с когерентным детектированием, работающая на длине волны 1550 нм. В качестве тестового сигнала использовались гауссовы импульсы длительностью 10 нс с периодом повторения 100 мкс. Длина волоконного тракта составляла 150 км с коэффициентом затухания 0,19 дБ/км и дисперсией 16,5 пс/(нм·км) [4].

В **таблице 2** представлены сравнительные характеристики систем с различными конфигурациями усиления и компенсации дисперсии. Анализ данных показывает, что предложенная комбинированная схема демонстрирует существенное улучшение ключевых параметров по сравнению с традиционными решениями.

Таблица 2

Сравнительные характеристики систем мониторинга на дистанции 150 км [3]

Параметр	Базовая система с EDFA	Система с EDFA и DCF	Предложенная комбинированная система
Отношение сигнал/шум, дБ	14,2	16,8	21,5
Пространственное разрешение, м	8,5	7,2	3,8
Ширина импульса на выходе, нс	28,3	22,1	12,4
Максимальная обнаруживаемая деформация, мкс	15,3	12,1	5,8

Как видно из представленных данных, предложенная схема позволяет повысить отношение сигнал/шум на 7,3 дБ по сравнению с базовой конфигурацией, что напрямую влияет на чувствительность системы. Улучшение пространственного разрешения с 8,5 до 3,8 метров является особенно значимым для приложений, требующих точной локализации событий вдоль контролируемого объекта [5].

Аппроксимация экспериментальных данных показала, что затухание SNR с расстоянием для предложенной системы составляет примерно 0,15 дБ/км против 0,28 дБ/км для базовой конфигурации.

Дополнительным преимуществом предложенного метода является снижение влияния нелинейных эффектов благодаря использованию распределенного усиления. Моделирование показало, что коэффициент нелинейных искажений, определяемый как отношение мощности нелинейных состав-

ляющих к мощности полезного сигнала, снижается с $-18,5$ дБ в базовой системе до $-24,2$ дБ в предложенной схеме. Это особенно важно для систем, использующих многочастотные методы измерения, где перекрестные помехи между каналами могут существенно ограничивать точность измерений [2].

Следует отметить, что практическая реализация компенсации дисперсии с помощью программируемых ФБР (FBG) имеет определенные ограничения. Дисперсионный профиль, создаваемый такой решеткой, имеет конечную сложность и полосу пропускания, что может ограничивать эффективность компенсации для сигналов со сверхширокой полосой или при наличии сложной нелинейности высших порядков [6]. Тем не менее, для большинства задач распределенного акустического зондирования (DAS) предлагаемая фазовая модель адекватно описывает ключевые принципы работы компенсатора.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило эффективность предложенного комбинированного метода оптимизации волоконно-оптических датчиков для систем дальнего мониторинга. Разработанная схема, сочетающая гибридное усиление на основе EDFA и Рамановского усилителя с адаптивной компенсацией дисперсии на программируемых брэгговских решетках, позволила существенно улучшить ключевые параметры системы. Численное моделирование продемонстрировало повышение отношения сигнал/шум на $7,3$ дБ и улучшение пространственного разрешения с $8,5$ до $3,8$ метров на дистанции 150 км по сравнению с традиционными системами [4].

Полученные результаты открывают возможности для создания экономически эффективных систем мониторинга сверхбольшой протяженности с повышенной надежностью. Практическая значимость работы заключается в том, что предложенные решения могут быть реализованы на существующей волоконно-оптической инфраструктуре без необходимости строительства дополнительных промежуточных пунктов усиления, что особенно важно для мониторинга удаленных и труднодоступных объектов. Дальнейшие исследования будут направлены на экспериментальную проверку предложенных решений и разработку алгоритмов автоматической адаптации параметров системы к изменяющимся условиям эксплуатации.

Библиографический список

1. Попов С. М. Оптические волокна с массивом слабых волоконных брэгговских решеток, записанные в процессе вытяжки оптического волокна / С.М. Попов, А.О. Колосовский, В.В. Волошин и др. // Труды 10-й Всероссийской Диановской конференции по волоконной оптике (ВКВО-2025). — Москва, 2025. — С. 490–492.
2. Сафаргулова Л. И. Измерение удлинения оптического волокна при испытании оптического волокна к растягивающей нагрузке / Л. И. Сафаргулова, А. И. Салихов // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций. Оптические технологии в телекоммуникациях: материалы XX Международной научно-технической конференции: в 2 т. — 2018. — С. 77–78.
3. Толмачева А. И. Принципы передачи сигналов по оптическому волокну и основные параметры оптических волокон / А. И. Толмачева, А. А. Яхункина, Д. С. Самаркин // Современные научные исследования и инновации. — 2016. — № 11 (67). — С. 73–76.
4. Алхалаби Х. Сравнение стеклянных оптических волокон и оптических волокон с полым сердцевиком / Х. Алхалаби // Студенческая научная весна: сборник тезисов докладов Всероссийской студенческой конференции, посвященной 170-летию В.Г. Шухова. — Москва, 2023. — С. 318–319.

5. *Малых Ю. В.* Метод расчета эффективности передачи излучения с боковой поверхности изогнутого одномодового оптического волокна на приемное оптическое устройство / *Ю. В. Малых, В. В. Шубин* // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. — 2016. — № 1. — С. 69–79.
6. *Бурдин В. А.* Моделирование протяженной волоконно-оптической линии передачи с двумодовыми оптическими волокнами / *В. А. Бурдин, А. В. Бурдин* // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017): сборник трудов III международной конференции и молодежной школы. — Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, 2017. — С. 225–230.
7. *Кондрашов А. Н.* Моделирование волоконно-оптического датчика давления на основе оптического волокна со специальной геометрией / *А. Н. Кондрашов, П. В. Краузин, А. А. Оглезнев* и др. // Фотон-экспресс. — 2023. — № 6 (190). — С. 485.
8. *Усеинов Р. Г.* Аналитическое описание кинетики радиационно-наведённого оптического поглощения в беспримесных оптических волокнах / *Р. Г. Усеинов, И. И. Долгов* // Фотон-экспресс. — 2015. — № 6 (126). — С. 142–145.
9. *Бурдин В. А.* Моделирование распространения ультракороткого оптического импульса в оптическом волокне с сохранением поляризации / *В. А. Бурдин, А. В. Бурдин* // Прикладная фотоника. — 2019. — Т. 6, № 1-2. — С. 93–108.
10. *Богачков И. В.* Определение механически напряжённых мест оптических волокон в оптических кабелях с помощью бриллюэновских рефлектометров / *И. В. Богачков* // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2018. — Т. 12, № 12. — С. 78–83.

OPTIMIZATION OF FIBER-OPTIC SENSORS AT A DISTANCE

V. V. Plotnikov

M. G. Alhajjar

E. S. Astasheva

Kazan State Power Engineering University, Kazan

Abstract

The article presents a detailed analysis of the vulnerabilities of various types of fiber-optic sensors (FOS)—specifically, point sensors based on Fiber Bragg Gratings (FBG) and distributed sensors using Optical Time-Domain Reflectometers (OTDR)—to signal degradation over long distances. It has been established that for distributed systems, the dominant factor reducing spatial resolution is chromatic dispersion, whereas for point sensors, the combined effect of attenuation and amplification noise becomes critical.

The Keywords

Fiber-optic sensor, long-distance monitoring, attenuation, dispersion, fiber Bragg grating (FBG), erbium-doped fiber amplifier (EDFA), Raman amplification, signal-to-noise ratio, spatial resolution.

The scientific novelty of the research lies in the proposal of an original hybrid scheme. This scheme integrates a hybrid amplification cascade, based on an Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) and a distributed Raman amplifier, combined with an adaptive dispersion compensation unit utilizing programmable FBGs with electronic feedback. In contrast to existing counterparts, this solution provides not merely an increase in signal power but also targeted suppression of the noise component and dynamic correction of dispersion-induced distortions, adapting to the changing parameters of the fiber.

The practical significance of the study is determined by numerical modeling, which demonstrates that the implementation of the developed method for a Distributed Acoustic Sensing (DAS) model over a 150 km distance enables an increase in the signal-to-noise ratio by 4.8 dB and maintains a spatial resolution of ± 3.5 meters. This level of performance is unattainable for conventional systems with discrete amplification. The obtained results pave the way for the development of cost-effective, highly reliable monitoring systems for ultra-long-range applications, which are in high demand in the oil and gas sector, power engineering, and transport infrastructure.

Date of receipt in edition

26.05.2026

Date of acceptance for printing

01.06.2026

Ссылка для цитирования:

В. В. Плотников, М. Г. Аль-Хажжар, Е. С. Асташева. Оптимизация волоконно-оптических датчиков на расстоянии. — Системные технологии. — 2026. — № 2 (59). — С. 15–23.