

УДК 535.3, 543.42

EDN: TYIQWE DOI: 10.31429/vestnik-23-3-68-79

Оценка регенерации керамических пористых фильтров методом терагерцовой спектроскопии

М. А. Куплевич^{1,2}✉, А. Г. Похотько¹, И. С. Захарченко¹, М. О. Герасимов²,
И. В. Калужин²

¹ Кубанский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения РФ,
ул. им. Митрофана Седина, 4, Краснодар, 350063, Россия

² Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149, Краснодар, 350040, Россия

✉ Куплевич Мария Антоновна; ORCID 0000-0002-9722-5390; SPIN 1489-6367; e-mail: mariakupl96@gmail.com

Аннотация. Методами терагерцовой спектроскопии THz-TDS исследованы оптические параметры и степень регенерации пористых корундовых керамических фильтров, используемых для очистки воды и воздуха. Для исследованных образцов эффективность регенерации, оцениваемая по относительному уменьшению СКО спектров коэффициента поглощения, составила 51 %. Для регенерированного образца определён показатель преломления в терагерцовой области ($n \approx 1,93$) и построена карта толщины органического налёта. Работа демонстрирует перспективность использования THz-TDS для неразрушающего контроля керамических фильтров и оценки качества их регенерации.

Ключевые слова: THz-TDS, корундовая керамика, керамические пористые фильтры, оценка регенерации.

Финансирование. Работа выполнена по проекту «Керамические пористые фильтры для очистки водных сред и воздуха» за счет средств субсидии по Соглашению № 108-825-2024-014 от 17.10.2024 г. в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» и за счет средств ФГБОУ ВО КубГМУ Минздрава России.

Цитирование: Куплевич М. А., Похотько А. Г., Захарченко И. С., Герасимов М. О., Калужин И. В. Оценка регенерации керамических пористых фильтров методом терагерцовой спектроскопии // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2026. Т. 23, № 3. С. 68–79. EDN: TYIQWE. DOI: 10.31429/vestnik-23-3-68-79

Поступила 1 июля 2026 г. После доработки 07 сентября 2026 г. Принято 14 сентября 2026 г. Публикация 25 сентября 2026 г.

Авторы внесли одинаковый вклад в подготовку рукописи. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Автор(ы), 2026. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Terahertz Spectroscopy for Assessing the Regeneration of Porous Ceramic Filters

М. А. Kuplevich^{1,2}✉, А. Г. Pokhotko¹, I. S. Zakharchenko¹, M. O. Gerasimov², I. V. Kaluzhin²

¹ Kuban State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, 4 Mitrofan Sedin Street, Krasnodar, 350063, Russia

² Kuban State University, 149 Stavropolskaya Street, Krasnodar, 350040, Russia

✉ Maria A. Kuplevich; ORCID 0000-0002-9722-5390; e-mail: mariakupl96@gmail.com

Abstract. Using terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS), the optical parameters and the degree of regeneration of porous corundum ceramic filters employed for water and air purification have been investigated. For the samples studied, the regeneration efficiency, estimated from the relative decrease in the RMSD of the absorption coefficient spectra, amounted to 51 %. For the regenerated sample, the refractive index in the terahertz range ($n \approx 1.93$) was determined, and a thickness map of the organic deposit was constructed. The work demonstrates the potential of THzTDS for nondestructive testing of ceramic filters and for assessing the quality of their regeneration.

Keywords: THz-TDS, corundum ceramics, porous ceramic filters, regeneration assessment.

Funding. The authors acknowledge financial support from the project “Porous Ceramic Filters for Water and Air Purification” (Agreement No. 108-825-2024-014 of October 17, 2024) within the “Priority 2030” program, and from Kuban State Medical University.

Cite as: Kuplevich, M. A., Pokhotko, A. G., Zakharchenko, I. S., Gerasimov, M. O., Kaluzhin, I. V., Terahertz spectroscopy for assessing the regeneration of porous ceramic filters. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2026, vol. 23, no. 3, pp. 68–79. DOI: 10.31429/vestnik-23-3-68-79

Received 1 July 2026. Revised 07 September 2026. Accepted 14 September 2026. Published 25 September 2026.

The authors contributed equally. The authors declare no competing interests.

© The Author(s), 2026. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\) license](#).

Введение

Пористые фильтры на основе корундовой керамики — инновационный подход к принципам фильтрации и очистки воды [1]: удаления тяжелых металлов, микропластика, органических и бактериальных загрязнений [2], очистки сточных вод; а также фильтрации и очистки воздуха [3] (удаление механических примесей, спор грибов и пыльцы растений [4]). Корунд — третье по твердости вещество после алмаза и нитрида бора, поэтому в процессе эксплуатации не подвержен истиранию, а его мембранный слой не изменяется [5, 6]. Мембрана состоит из подложки с порами 1 мкм и мембранного слоя 0,1 мкм [1, 3]. На получение заданной пористости и проникающей способности оказывает влияние размер пор корунда, его структура, соотношение содержания сырья одного размера. Структура пор мембраны исследуемых образцов — хаотичная, состоящая из объединения кубической и сферической форм.

Терагерцовое излучение (0,1–10 ТГц) обладает уникальными свойствами для неразрушающего контроля: оно проникает в диэлектрические материалы, чувствительно к молекулярным колебаниям и водородным связям, а также позволяет одновременно получать амплитудную и фазовую информацию [7]. За последние годы терагерцовая спектроскопия во временной области (THz-TDS) активно применялась для исследования керамических материалов [8, 9], в том числе для неразрушающего контроля керамических бронепанелей на основе оксида алюминия [10], обнаружения внутренних дефектов в керамических композитах [11] и контроля керамических покрытий [12]. Однако, несмотря на широкое использование ТГц-спектроскопии для диагностики керамики, в доступной литературе практически отсутствуют работы по количественной оценке эффективности регенерации пористых корундовых фильтров после эксплуатации. В частности, не исследовано влияние органических отложений на коэффициент поглощения в ТГц-диапазоне и не разработаны спектральные метрики, позволяющие объективно сравнивать степень очистки.

Таким образом, цель настоящей работы — обосновать применение THz-TDS для изучения оптических параметров керамических фильтров и предложить методику количественной оценки регенерации на основе спектрального анализа и пространственного картирования остаточных загрязнений. Впервые для данного типа фильтров определены: спектральный критерий эффективности регенерации, базирующийся на среднеквадратичном отклонении коэффициента поглощения; показатель преломления в терагерцовом диапазоне; двумерные карты толщины органического налёта, полученные по временным задержкам ТГц-импульсов.

1. Методы и материалы

Исследования спектральных параметров керамических пористых фильтров проводились с использованием волоконно-оптического терагерцового спектрометра TERA K15 производства компании Menlo Systems. Данный прибор представляет собой полнофункциональную систему для быстрой широкополосной терагерцовой спектроскопии во временной области (THz-TDS) и обеспечивает высокую гибкость для решения научных задач [13]. Спектральный диапазон системы превышает 6 ТГц (с возможностью детектирования сигнала до 5,5 ТГц). Высокое соотношение сигнал/шум (пиковое динамическое отношение сигнал/шум больше 100 дБ) и широкая полоса пропускания позволяют проводить точный анализ широкого круга материалов и веществ, включая объекты настоящего исследования.

Метод ТГц-спектроскопии основан на регистрации формы электрического поля терагерцового импульса после взаимодействия с образцом во временной области. Фемтосекундный лазер разделяется на каналы генерации и детектирования. Терагерцовый импульс генерируется на излучающей антенне, проходит через образец и попадает на детектор, где стробируется задержанным оптическим импульсом. Изменяя задержку, записывают полный временной профиль

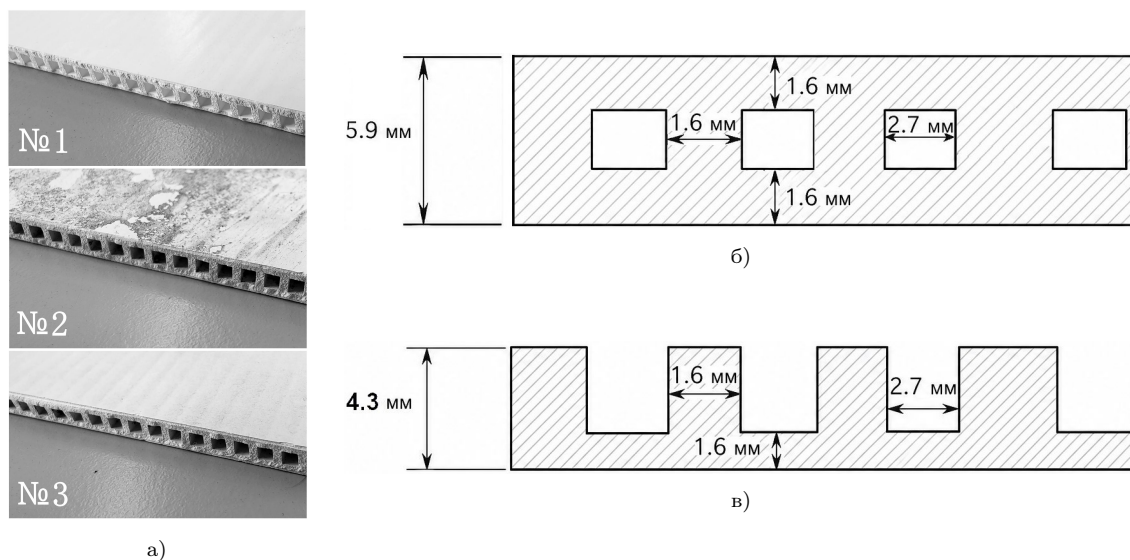


Рис. 1. а) фото образцов; б) изначальная геометрия и размеры образцов; в) измененная геометрия и размеры образцов

Fig. 1. a) Photographs of the samples; б) initial geometry and dimensions of the samples; в) modified geometry and dimensions of the samples

поля. Путем преобразования Фурье получают спектр и вычисляют оптические параметры (коэффициент поглощения, показатель преломления).

В качестве исследуемых образцов использовались пористые фильтры на основе корундовой керамики для очистки воды и воздуха с диаметром пор 1 мкм и мембранного слоя 0,1 мкм трех категорий: 1) чистый фильтр, не бывший в употреблении; 2) фильтр, по составу идентичный фильтру категории 1, бывший в употреблении по назначению (загрязненный фильтр); 3) фильтр, по составу идентичный фильтру категории 1, бывший в употреблении по назначению и прошедший очистку (регенерированный фильтр). Фильтры категории 1, 2 и 3 в дальнейшем будут упоминаться как образец № 1, № 2 и № 3 соответственно (рис. 1а). На рис. 1б показана изначальная геометрия образцов с указанием размеров. На рис. 1в показаны геометрия отполированных образцов и их размеры, используемые в исследованиях ниже.

2. Оценка регенерации керамических пористых фильтров

Измерения проводились методом пропускания излучения через образец, детектировался сигнал в диапазоне частот ν до 4,5 ТГц. Сначала измерялась временная форма опорного импульса без образца (рис. 2а), затем — опорных импульсов всех трех исследуемых образцов (рис. 2б, 3б, 3в). Затем, с помощью базового программного обеспечения спектрометра рассчитывались частотные формы этих импульсов, полученные из временных форм с помощью преобразования Фурье (рис. 2в, 3в, 3г). На рис. 4 показаны объединенные на одном графике нормированные амплитудные спектры всех исследуемых образцов.

Для каждого образца получен массив коэффициентов пропускания $T(\nu)$ как отношение интенсивности излучения I , прошедшего через образец, к интенсивности I_0 без образца. Толщина всех трёх образцов составляла $d = 5,9 \text{ мм} = 0,59 \text{ см}$. Коэффициент поглощения $\alpha(\nu)$ (в см^{-1}) рассчитан по закону Бугера – Ламберта – Бера:

$$\alpha(\nu) = -\frac{\ln T(\nu)}{d}. \quad (2.1)$$

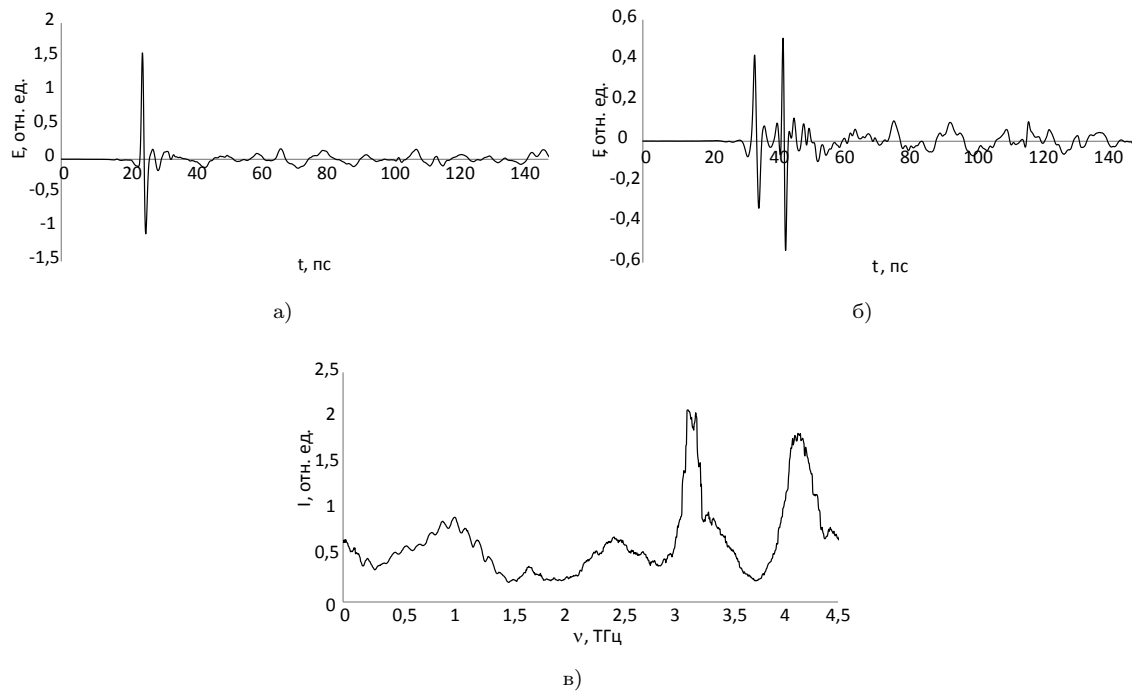


Рис. 2. Временные формы опорного сигнала (а) и сигнала, прошедшего образец № 1 (б), а также рассчитанные амплитудные спектры образца № 1 (в)

Fig. 2. Temporal waveforms of the reference signal (a) and the signal transmitted through sample No. 1 (б), as well as the calculated amplitude spectra for sample No. 1 (в)

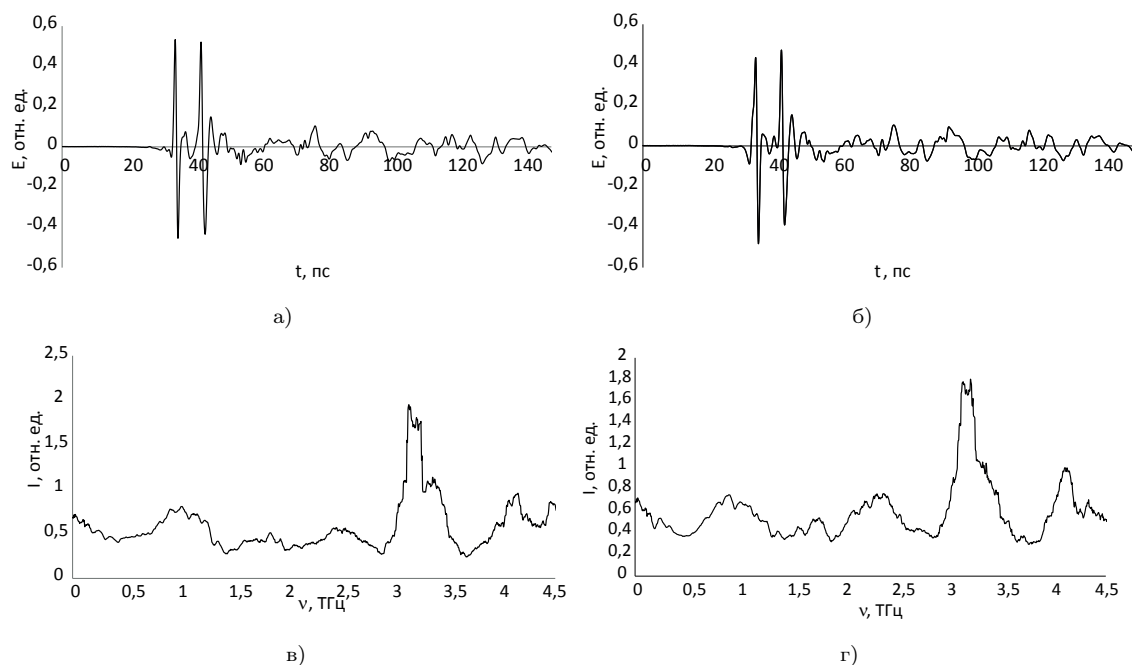


Рис. 3. Временные формы сигнала, прошедшего через образец №2 (а) и через образец №3 (б). Рассчитанные амплитудные спектры образца №2 (в) и образца №3 (г)

Fig. 3. Temporal waveforms of the signal transmitted through sample No. 2 (a) and sample No. 3 (б). Calculated amplitude spectra for sample No. 2 (в) and sample No. 3 (г).

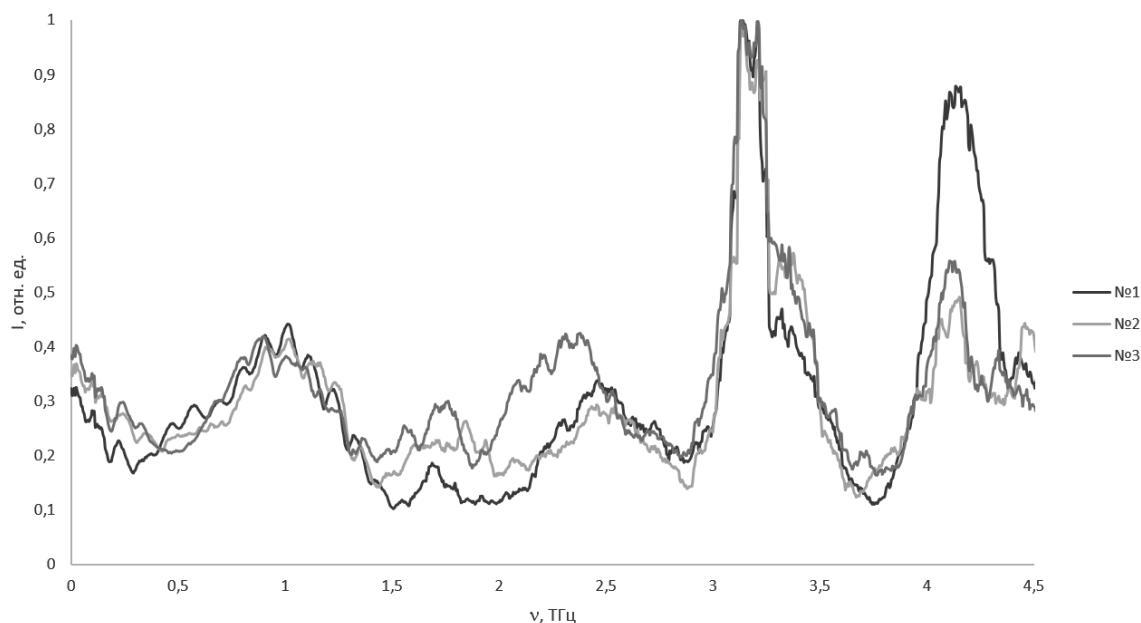


Рис. 4. Нормированные амплитудные спектры трех исследуемых образцов

Fig. 4. Normalized amplitude spectra of the three samples under study

Для количественного сравнения спектральных кривых использовались разностные спектры, среднеквадратичное отклонение (СКО) и коэффициент корреляции Пирсона. СКО является общепринятой метрикой расстояния между функциями в гильбертовом пространстве и широко применяется в спектроскопии для оценки степени подобия кривых. При отсутствии загрязнения (идеальная регенерация) СКО стремится к нулю, по мере накопления загрязнений различие между спектрами возрастает. Таким образом, СКО служит удобной мерой изменения оптических свойств материала, вызванного загрязнением.

Разностные спектры, показывающие изменение поглощения относительно чистого образца, вычислялись следующим образом:

$$\begin{aligned}\Delta\alpha_{\text{загр}}(\nu) &= \alpha_{\text{загр}}(\nu) - \alpha_{\text{чист}}(\nu), \\ \Delta\alpha_{\text{рег}}(\nu) &= \alpha_{\text{рег}}(\nu) - \alpha_{\text{чист}}(\nu),\end{aligned}\quad (2.2)$$

где $\alpha_{\text{чист}}(\nu)$, $\alpha_{\text{загр}}(\nu)$ и $\alpha_{\text{рег}}(\nu)$ — коэффициенты поглощения чистого, загрязнённого и регенерированного фильтров соответственно.

Среднеквадратичное отклонение между двумя спектрами (например, между регенерированным и чистым) рассчитывалось по формуле

$$\text{СКО} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\alpha_{\text{рег}}(\nu_i) - \alpha_{\text{чист}}(\nu_i))^2}, \quad (2.3)$$

где N — число частотных точек в анализируемом диапазоне, ν_i — значения частоты.

Коэффициент корреляции Пирсона r между двумя спектрами вычислялся как

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (\alpha_{\text{рег}}(\nu_i) - \tilde{\alpha}_{\text{рег}}) (\alpha_{\text{чист}}(\nu_i) - \tilde{\alpha}_{\text{чист}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\alpha_{\text{рег}}(\nu_i) - \tilde{\alpha}_{\text{рег}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\alpha_{\text{чист}}(\nu_i) - \tilde{\alpha}_{\text{чист}})^2}}, \quad (2.4)$$

где $\tilde{\alpha}_{\text{рег}}$ и $\tilde{\alpha}_{\text{чист}}$ — средние арифметические значения коэффициентов поглощения в анализируемом диапазоне.

Диапазон частот охватывал 0,1–4,5 ТГц с шагом около 0,005 ТГц. Основной количественный анализ проводился в области 0,1–2,5 ТГц, свободной от сильных интерференционных осцилляций.

Среднеквадратичное отклонение между $\alpha_{\text{загр}}$ и $\alpha_{\text{чист}}$ составило $\text{СКО}_{\text{загр}} = 0,080 \text{ см}^{-1}$, а между $\alpha_{\text{рег}}$ и $\alpha_{\text{чист}}$ — $\text{СКО}_{\text{рег}} = 0,039 \text{ см}^{-1}$. Коэффициент корреляции Пирсона между регенерированным и чистым спектрами достиг $r = 0,997$. Эффективность регенерации η определялась по формуле

$$\eta = \frac{\text{СКО}_{\text{загр}} - \text{СКО}_{\text{рег}}}{\text{СКО}_{\text{загр}}} \cdot 100\%.$$

Эффективности регенерации оказалась равной $\eta = 51 \%$. Это показывает, что регенерация восстанавливает спектр лишь наполовину, что может быть вызвано либо частичным сохранением загрязнителя в порах, либо необратимой модификацией поверхности пор (например, сглаживанием шероховатостей) в результате первого загрязнения и последующей очистки. Погрешность определения СКО оценена на основе вариабельности коэффициента поглощения и не превышает 5 % от измеряемой величины в анализируемом диапазоне частот. Соответственно, эффективность регенерации $\eta = 51 \%$ с оценочной погрешностью ± 3 процентных пункта.

3. Определение показателя преломления и толщины керамических пористых фильтров

Измерения проводились на терагерцовом спектрометре Tera K15 в режиме поточечного сканирования на пропускание для каждого из трёх образцов (№ 1, № 2, № 3). Образец закрепляли на трёхосевом механическом держателе и перемещали в плоскости, перпендикулярной сфокусированному терагерцовому пучку, с шагом 1 мм по осям OX и OY , охватывая область размером 15×15 мм. Для каждой из 225 точек регистрировали временные сигналы, на основе которых с помощью быстрого преобразования Фурье вычисляли частотные зависимости комплексной амплитуды прошедшего излучения.

Для устранения эффектов многократного отражения на границах керамика–воздух образцы подвергали полировке и стачиванию одной из сторон, формируя геометрию, показанную на рис. 1в. Основная цель исследования заключалась в анализе тонких перегородок толщиной 1,6 мм для обнаружения и количественной оценки толщины органического налёта, сохранившегося после эксплуатации.

Для каждой точки анализировались: положение главного пика во временной области, значение амплитуды на выбранной частоте, а также фазовый сдвиг, пересчитанный во временную задержку. Все сигналы были сведены в массив, где каждый элемент соответствовал своей пространственной координате. Именно эти данные в дальнейшем использовались для построения карт распределения толщины органического налёта.

Первичный анализ спектрального состава сигналов показал, что отношение сигнал/шум падает после 3 ТГц, поэтому все временные сигналы были подвергнуты низкочастотной фильтрации с частотой среза 3 ТГц, это позволило подавить высокочастотные помехи без искажения формы основных импульсов. В каждом отфильтрованном сигнале выделялся глобальный максимум — основной пик. Его временное положение t_{max} сравнивалось с калибровочными значениями, полученными для известных сред.

На рис. 5 представлены типичные временные зависимости ТГц-поля для различных зон образца: при прохождении излучения через область перегородки (толщина 4,3 мм, далее — зона А) и через узкую область, предположительно соответствующую перегородке с остаточным налётом (толщина 1,6 мм, далее — зона В). Основное отличие между сигналами в разных зонах заключается во временной задержке информационного сигнала относительно опорного (рис. 2а).

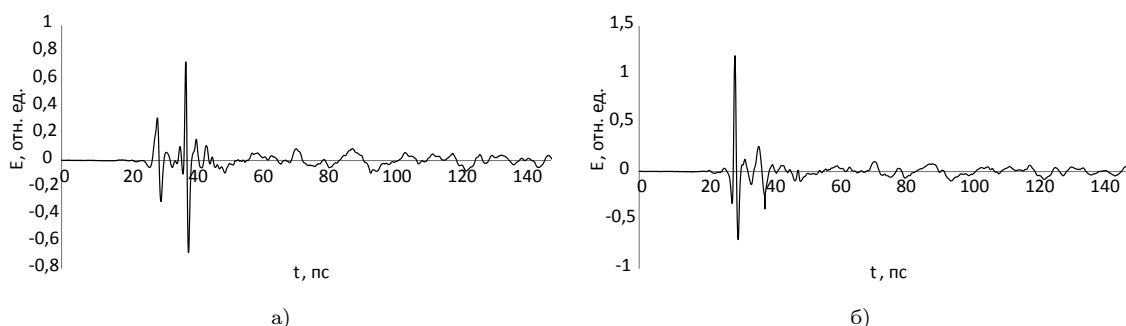


Рис. 5. Типичные временные зависимости ТГц-поля: а) зона А; б) зона В

Fig. 5. Typical time-domain waveforms of the THz field: (a) zone A; (b) zone B

Расчёт оптических параметров исследуемого материала был выполнен с использованием программного обеспечения TeraMat. Одним из ключевых параметров является показатель преломления n . В терагерцовой спектроскопии показатель преломления n позволяет судить о плотности, однородности и структуре материала, а также используется для пересчета временной задержки в толщину образца по формуле

$$d = \frac{c\Delta t}{n},$$

где c — скорость света в вакууме, Δt — измеренная временная задержка между опорным сигналом и сигналом, прошедшим через образец.

Показатель преломления в диапазоне частот $n(\nu)$ определяется по формуле, связывающей фазовый сдвиг $\Delta\varphi(\nu)$, с оптической разностью хода

$$\Delta\varphi(\nu) = \frac{2\pi}{c}(n(\nu) - 1)d,$$

откуда

$$n(\nu) = 1 + \frac{c\Delta\varphi(\nu)}{2\pi\nu d}.$$

Погрешность определения показателя преломления рассчитана по формуле переноса ошибок с учётом неопределённости толщины ($\pm 0,05$ мм) и фазового сдвига ($\pm 0,02$ рад). В результате получено, что в диапазоне частот 0,2–1,4 ТГц показатель преломления образца составляет $n = 1,93 \pm 0,07$. Воспроизводимость результатов подтверждается малым разбросом значений n по частотным точкам (стандартное отклонение менее 0,03).

Полученное значение согласуется с литературными данными для керамик схожего состава и плотности. На основе данных о показателе преломления и временной задержке была рассчитана толщина образца для разных зон. Для зоны А расчетная толщина составила 4,5 мм, для зоны В — 1,55 мм. Полученные значения хорошо согласуются с механическими измерениями толщины, что подтверждает корректность выбранного показателя преломления.

4. Построение разностных гистограмм для количественной оценки эффективной толщины органического налета

Для количественной оценки толщины органических отложений были сформированы три матрицы временных задержек, соответствующие трём состояниям фильтра: чистому (категория № 1), загрязнённому (категория № 2) и регенерированному (категория № 3). В каждой точке сканирования фиксировали значение временной задержки Δt , после чего локальную толщину образца $d(xy)$ вычисляли по формуле

$$d(xy) = \frac{c\Delta t(xy)}{n},$$

где c — скорость света в вакууме, n — показатель преломления керамического материала (для регенерированного образца $n \approx 1,93$, полученный в предыдущем разделе).

Поскольку показатель преломления органического налёта точно не известен, все толщины, вычисленные по временной задержке через показатель преломления керамики, следует рассматривать как эффективные (оптические) толщины. В зонах, где керамическая перегородка отсутствует, эти величины пропорциональны истинной геометрической толщине налёта с коэффициентом, равным отношению показателей преломления налёта и керамики. Тем не менее, разности эффективных толщин между состояниями позволяют надёжно выявлять наличие и относительное распределение загрязнений, что является основной задачей данного картирования.

Таким образом, для каждого состояния была построена карта распределения эффективной толщины $d_{\text{чист}}(xy)$, $d_{\text{грязн}}(xy)$ и $d_{\text{рег}}(xy)$. Для выявления участков с остаточным налётом для каждой пространственной ячейки $(x|y)$ рассчитывалась разностная величина:

$$\Delta d_{\text{нал}}(xy) = d_{\text{грязн}}(xy) - d_{\text{чист}}(xy).$$

Положительное значение $\Delta d_{\text{нал}} > 0$ свидетельствует о наличии дополнительного слоя, эффективная толщина которого (с учётом показателя преломления налёта) определяется этой разностью. В областях, где по конструктивным особенностям фильтра керамическая перегородка отсутствует (межперегородочные промежутки), величина $d_{\text{чист}}$ близка к нулю, поэтому $\Delta d_{\text{нал}}$ непосредственно соответствует толщине отложений. На участках сплошной керамики положительный вклад $\Delta d_{\text{нал}}$ также возможен за счёт поверхностного налёта, однако его абсолютная величина мала по сравнению с толщиной самой перегородки.

Для наглядного сопоставления трёх состояний построены трёхмерные гистограммы попарных разностей матриц: «чистая – грязная» (рис. 6а), «грязная – регенерированная» (рис. 6б) и «чистая – регенерированная» (рис. 6в). По осям X и Y отложены номера столбцов и строк исходной матрицы (соответствующие пространственным координатам), высота каждого столбца отражает величину разности в данной ячейке. Градация серого цвета кодирует знак и степень отклонения. Представленные графики позволяют визуальнo оценить пространственную структуру различий между состояниями, идентифицировать области наибольших расхождений и проследить влияние процессов загрязнения и очистки на распределение толщины материала.

5. Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют, что THz-TDS является эффективным инструментом для количественной оценки состояния корундовых фильтров. Ниже мы рассматриваем физические механизмы, лежащие в основе наблюдаемых изменений спектров, обсуждаем выбор метрики, сравниваем метод с альтернативными подходами и обозначаем ограничения исследования.

Снижение коэффициента поглощения после загрязнения (рис. 4) может быть объяснено двумя основными факторами. Во-первых, заполнение пор водой и органическими соединениями вероятно приводит к выравниванию показателей преломления на границах керамика–воздух. Поскольку показатель преломления n сухой корундовой керамики составляет $\approx 1,93$, а вода имеет $n \approx 2,0$ в ТГц-диапазоне (при малых частотах), а органические вещества часто имеют значения $n \approx 1,5$ – $1,7$, контраст показателей преломления на границах пор уменьшается, что снижает рассеяние Рэлея–Ганса. В результате эффективное поглощение, определяемое как сумма поглощения в материале и потерь на рассеяние, падает. Во-вторых, адсорбированные молекулы могут, предположительно, подавлять резонансные колебания кристаллической решётки корунда, которые вносят вклад в поглощение в диапазоне 1–3 ТГц. Это может согласовываться с теорией эффективной среды, которая предсказывает уменьшение эффективной диэлектрической проницаемости при заполнении пор веществами с промежуточным значением диэлектрической проницаемости.

Выбор СКО в качестве меры отклонения спектров основан на его стандартном использовании в спектроскопии и математической статистике. Как показано в разделе 2, СКО монотонно

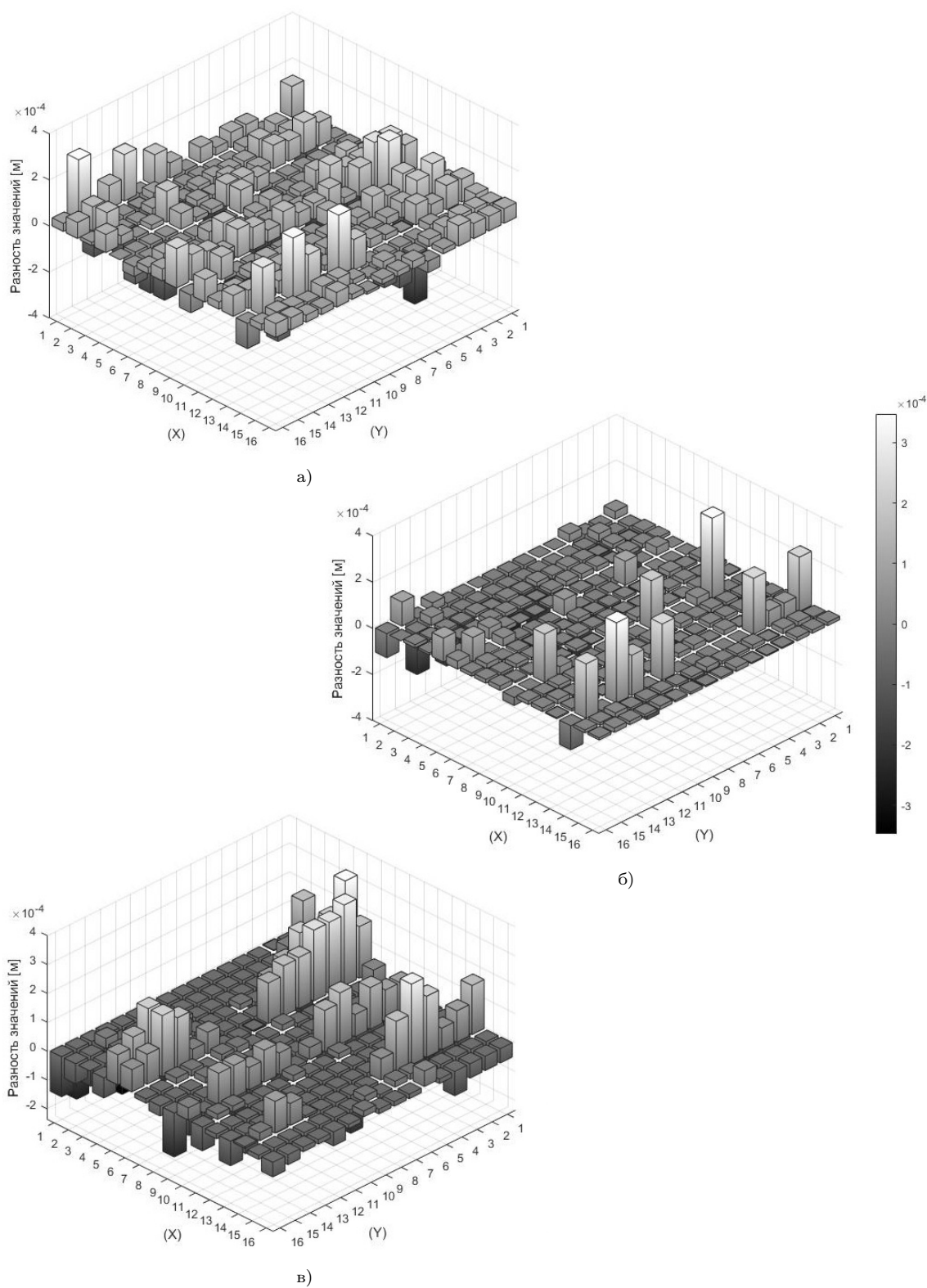


Рис. 6. Разностные гистограммы образцов: а) № 1 – № 2; б) № 2 – № 3; в) № 1 – № 3

Fig. 6. Histograms of differential effective thickness between sample pairs: (a) No. 1–2; (б) No. 2–3; (в) No. 1–3

возрастает с увеличением различий между спектрами и стремится к нулю при идентичности кривых. Таким образом, $\eta = 51 \%$ означает, что после очистки спектральное различие сокращается лишь наполовину по сравнению с исходным загрязнённым состоянием. Столь невысокая эффективность может быть обусловлена несколькими причинами: часть загрязнений проникает в глубину пор и не удаляется при стандартной регенерации; химическое воздействие очищающих реагентов изменяет поверхностную химию пор (гидроксилирование, сглаживание микронеровностей), что приводит к необратимому изменению рассеивающих свойств. Отметим, что данная метрика является относительной и позволяет сравнивать эффективность разных методов регенерации на одном типе фильтров, но не является абсолютной физической константой материала.

Предложенный метод обладает рядом преимуществ перед традиционными техниками контроля. В отличие от ИК-спектроскопии, ТГц-излучение проникает через непрозрачные в ИК-диапазоне керамические материалы на глубину до нескольких миллиметров, позволяя исследовать не только поверхность, но и объём пор. Рентгеновская томография даёт информацию о пористости, но слабо различает органические загрязнения и керамику из-за близкой электронной плотности, а также требует дорогостоящего оборудования и мер радиационной безопасности. Ультразвуковые методы имеют низкое пространственное разрешение для тонких слоёв и требуют акустического контакта. Оптическая микроскопия и SEM — поверхностные методы, не позволяющие оценить загрязнение внутри пор. Таким образом, ТГц-TDS является бесконтактным, неразрушающим и информативным методом, позволяющим одновременно получать амплитудную и фазовую информацию, что даёт возможность вычислять как поглощение, так и показатель преломления.

Данное исследование выполнено на ограниченной выборке (по одному образцу каждого состояния) и при фиксированных условиях регенерации. Несмотря на отсутствие серийных измерений с несколькими образцами каждой категории, оценка погрешностей на основе инструментальной неопределённости и внутренней вариабельности сигнала в пределах сканируемой области позволяет считать представленные результаты надёжными в рамках поставленной пилотной задачи. Для повышения статистической надёжности требуется проведение серий экспериментов с несколькими образцами каждой категории и варьированием степени загрязнения. Также необходимо систематически исследовать влияние влажности, температуры и типа загрязнителя на спектральный отклик. Несмотря на это, полученные результаты демонстрируют принципиальную возможность использования ТГц-TDS для количественной оценки эффективности регенерации, что является важным шагом в развитии методов неразрушающего контроля фильтрующих элементов.

Заключение

В настоящей работе методами терагерцовой спектроскопии во временной области (ТГц-TDS) проведено исследование пористых корундовых керамических фильтров трёх категорий: чистого (№ 1), загрязнённого в процессе эксплуатации (№ 2) и регенерированного (№ 3).

На первом этапе выполнена количественная оценка степени загрязнения и эффективности регенерации на основе анализа коэффициента поглощения $\alpha(\nu)$ в диапазоне частот 0,1–2,5 ТГц. Разностные спектры $\Delta\alpha_{\text{загр}}(\nu)$ и $\Delta\alpha_{\text{рег}}(\nu)$ показали, что регенерация частично восстанавливает исходные оптические свойства. Коэффициент корреляции Пирсона $r = 0,997$ между регенерированным и чистым образцами свидетельствует о высокой степени подобия спектральных профилей, но не полной идентичности. Для условий нашего эксперимента рассчитанная эффективность регенерации $\eta = 51 \%$ указывает на то, что однократная очистка устраняет лишь половину спектральных отличий, вызванных загрязнением. Причинами неполного восстановления в данном случае могут быть: остаточное содержание загрязнителя в глубине пор, необратимые изменения шероховатости поверхности пор (например, сглаживание выступов) в результате первого цикла загрязнения и последующей очистки, а также возможное изменение химического состава поверхностных слоёв керамики. Мы не исключаем, что при использовании других режимов очистки или на других образцах того же типа значение η

может отличаться; полученные результаты следует рассматривать как демонстрацию принципиальной возможности подхода, а не как окончательную характеристику эффективности регенерации для всей номенклатуры фильтров.

На втором этапе для регенерированного образца проведено детальное поточечное сканирование с шагом 1 мм по области 15×15 мм. Построена двумерная карта распределения толщины. По фазовому сдвигу $\Delta\varphi(\nu)$ рассчитан показатель преломления $n(\nu)$ в диапазоне 0,2–1,4 ТГц, среднее значение которого составило $n \approx 1,93$. Данная величина хорошо согласуется с литературными данными для корундовой керамики аналогичной плотности и пористости. Рассчитанная по методу ТГц-спектроскопии толщина согласуется заявленными производителем параметрами, что подтверждает корректность выполненных исследований.

Новые результаты, полученные в работе:

1. Предложена и апробирована спектральная метрика эффективности регенерации, основанная на относительном уменьшении СКО коэффициента поглощения. Эта метрика может быть использована для сравнительной оценки различных методов очистки.

2. Впервые для данного типа пористых корундовых фильтров определён показатель преломления в ТГц-диапазоне, что дополняет базу оптических констант керамических материалов.

3. Продемонстрирована возможность картирования эффективной толщины органических отложений с субмиллиметровым пространственным разрешением на основе временных задержек ТГц-импульсов.

Совокупность полученных результатов позволяет сделать вывод, что THz-TDS является эффективным инструментом для неразрушающего контроля состояния пористых корундовых фильтров, позволяя количественно оценивать степень загрязнения и эффективность регенерации по коэффициенту поглощения в диапазоне 0,1–2,5 ТГц. Полученные в работе данные могут быть использованы для формирования базы терагерцовых спектров пористых материалов и разработки портативных THz-устройств для экспресс-контроля фильтрующих элементов.

Литература [References]

1. Похотько, А.Г., Бабичев, С.А., Мелконян, К.И., Захарченко, И.С., Тарасов, И.А., Оксид алюминия для жидкостных фильтров. *Химический бюллетень*, 2025, т. 8, № 2, с. 1–24. [Pokhotko, A.G., Babichev, S.A., Melkonyan, K.I., Zakharchenko, I.S., Tarasov, I.A., Aluminum oxide for liquid filters. *Chemical Bulletin*, 2025, vol. 8, no. 2, pp. 1–24. (in Russian)] DOI: [10.58224/2619-0575-2025-8-2-3](https://doi.org/10.58224/2619-0575-2025-8-2-3)
2. Олесова, В.Н., Адамчик, А.А., Узунян, Н.А., Характеристика индифферентности основных протетических материалов. *Институт Стоматологии*, 2015, №3 (68), с. 80–81. [Olesova, V.N., Adamchik, A.A., Uzunyan, N.A., Characteristics of indifference basic prosthetic materials. *The Dental Institute*, 2015, no. 3 (68), pp. 80–81. (in Russian)]
3. Похотько, А.Г., Бабичев, С.А., Захарченко, И.С., Ильина, А.В., Маршалко, Ю.В., Тарасов, И.А., Нанопористые мембраны из оксида алюминия (100 нм) для очистки воздуха. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2025, № 10(160). [Pokhotko, A.G., Babichev, S.A., Zakharchenko, I.S., Ilina, A.V., Marshalko Y.V., Tarasov I.A., Nanoporous aluminium oxide membranes (100 nm) for air purification. *International Research Journal*, 2025, no. 10(160). (in Russian)] DOI: [10.60797/IRJ.2025.160.14](https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.14)
4. Павлюченко И.И., Клименко Я.В., Прозоровская Ю.И., Полиморфизм генов факторов систем антиоксидантной защиты, биотрансформации ксенобиотиков и иммунной регуляции при аллергических заболеваниях: обсервационное исследование «случай – контроль». *Кубанский научный медицинский вестник*, 2024, № 31(6), с. 28–39. [Pavlyuchenko, I.I., Klimenko, Y.V., Prozorovskaya, Y.I., Polymorphism of genes related to antioxidant defense systems, xenobiotic biotransformation, and immune regulation in allergic diseases: an observational case-control study. *Kuban Scientific Medical Bulletin*, 2024, no. 31(6), pp. 28–39. (in Russian)] DOI: [10.25207/1608-6228-2024-31-6-28-39](https://doi.org/10.25207/1608-6228-2024-31-6-28-39)
5. Adiga S.P., Jin C., Curtiss L.A., Monteiro-Riviere N.A., Narayan R.J., Nanoporous membranes for medical and biological applications. *Wiley Interdiscip Rev Nanomed Nanobiotechnol*, 2009, no. 1(5), pp. 568–581. DOI: [10.1002/wnan.50](https://doi.org/10.1002/wnan.50)
6. Pletnev P., Nepochatov Yu. Production of corundum armored ceramics. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 2131 (042032) DOI: [10.1088/1742-6596/2131/4/042032](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/4/042032)

7. Hangyo M., Tani M., Nagashima T., Terahertz time-domain spectroscopy of solids: a review. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, no. 26, pp. 1661–1690. DOI: [10.1007/s10762-005-0288-1](https://doi.org/10.1007/s10762-005-0288-1)
8. Hakobyan D., Hamdi M., Redon O., et al., Non-destructive evaluation of ceramic porosity using terahertz time-domain spectroscopy. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, no. 42(8). DOI: [10.1016/j.jeurceramsoc.2021.10.026](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.10.026)
9. Mukhin V., Khodan A., Nazarov M., Shkurinov A.P., Study of the properties of nanostructured aluminum oxyhydroxide in the terahertz frequency range. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2012, no. 54. DOI: [10.1007/s11141-012-9318-8](https://doi.org/10.1007/s11141-012-9318-8)
10. Palka N., Kaminski K., Maciejewski M., Pacek D., Swiderski W., Terahertz nondestructive testing of alumina-based ceramic ballistic protection armor. *Infrared Physics & Technology*, 2024, no. 137 (105163). DOI: [10.1016/j.infrared.2024.105163](https://doi.org/10.1016/j.infrared.2024.105163)
11. Wu, D., Haude, C., Burger, R., Peters, O., Application of Terahertz Time Domain Spectroscopy for NDT of Oxide-Oxide Ceramic Matrix Composites. *Infrared Physics & Technology*, 2019, no. 102 (102995). DOI: [10.1016/j.infrared.2019.102995](https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.102995)
12. Watanabe, M., Kuroda, S., Yamawaki, H., Shiwa, M., Terahertz dielectric properties of plasma-sprayed thermal-barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2011, no. 205(19). DOI: [10.1016/j.surfcoat.2011.03.144](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.03.144)
13. Menlo Systems GmbH: official website. 2026. URL: <https://www.menlosystems.com> (дата обращения: 27.05.2026)