

УДК: 621.391

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.44

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

НАСТРОЙКА ВЕЙВЛЕТНОГО ПОРОГА С ОГРАНИЧЕНИЕМ ПОТЕРИ ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОПАСНОГО ВЫБРОСА ГАЗОВ



Давронбеков Дилмурод Абдужалилович

Доктор технических наук (DSc), профессор, Ташкентский
университет информационных технологий имени Мухаммада
ал-Хорезмий, Ташкент, Узбекистан
E-mail: d.davronbekov@tuit.uz
ORCID ID: 0000-0003-1193-7918
Science ID: DFC-0525-0001



Писецкий Юрий Валерьевич

Доктор технических наук (DSc), профессор, Ташкентский
университет информационных технологий имени Мухаммада
ал-Хорезмий, Ташкент, Узбекистан
E-mail: yuriy.pisetskiy@mail.ru
ORCID ID: 0009-0003-6473-6121
Science ID: DTN-0525-0007

Аннотация. Исследована настройка мягкого вейвлетного порога в тракте обработки данных сенсорного узла при явном ограничении потери вероятности обнаружения кратковременного выброса. Порог задавался произведением универсального значения и безразмерного множителя, изменявшегося от 0 до 1,05. Расчёт выполнен для четырёхуровневого преобразования Хаара. Восстановление кусочно-гладкого сигнала длиной 512 отсчётов оценивалось по 3000 реализациям аддитивного гауссовского шума при входном отношении сигнал/шум 0 дБ. Событийные свойства проверялись методом Монте-Карло для блоков из 128 отсчётов, трёх форм импульса и вероятности ложной тревоги 0,01; для каждой точки использовано 50 000 реализаций. При множителе 0,30 выходное отношение сигнал/шум составило 7,242 дБ, а средняя доля ненулевых коэффициентов - 33,512 %. В наиболее неблагоприятном случае, соответствующем короткому импульсу при -12 дБ, вероятность обнаружения уменьшилась с 0,6877 до 0,6109. По условию допустимого снижения не более 0,08 выбран множитель 0,30; следующий уровень 0,45 нарушил ограничение. Полученная настройка предназначена для совместного проектирования шумоподавления и детектора и требует последующей проверки на натурных данных конкретного газоаналитического канала.

Ключевые слова: вейвлетное шумоподавление, мягкое порогование, оценка дисперсии, коэффициент разреженности, отношение сигнал/шум, нормированная ошибка, вероятность ложной тревоги, импульсный отклик, обнаружение изменений, метод Монте-Карло, газоаналитический канал, малоресурсная обработка.

Received: 05.09.2026

Accepted: 25.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

XAVFLI GAZ CHIQISHINI ANIQLASH EHTIMOLI YO‘QOTILISHINI CHEKLAGAN HOLDA VEYVLET CHEGARASINI SOZLASH

Davronbekov Dilmurod Abdujalilovich

Texnika fanlari doktori (DSc), professor, Muhammad al-Xorazmiy
nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti, Toshkent,
O‘zbekiston

Pisetskiy Yuriy Valerevich

Texnika fanlari doktori (DSc), professor, Muhammad al-Xorazmiy
nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti, Toshkent,
O‘zbekiston

Annotatsiya. Sensor tugunining ma'lumotlarni qayta ishlash traktida qisqa muddatli keskin chiqindini aniqlash ehtimoli yo'qotilishiga aniq cheklov qo'yilgan holda yumshoq veyvlet chegarasini sozlash tadqiq qilindi. Chegara universal qiymat va 0 dan 1,05 gacha o'zgaruvchi o'lchovsiz ko'paytiruvchining ko'paytmasi sifatida belgilandi. Hisoblash Xaarning to'rt darajali o'zgartirishi uchun bajarildi. Uzunligi 512 ta hisobdan iborat bo'lak-silliqliq signalni tiklash kirishdagi signal/shovqin nisbati 0 dB bo'lgan qo'shiluvchi Gauss shovqinining 3000 ta realizatsiyasi bo'yicha baholandi. Voqeaviy xususiyatlar 128 ta hisobdan iborat bloklar, impulsning uchta shakli va 0,01 soxta signal ehtimoli uchun Monte-Karlo usulida tekshirildi; har bir nuqta uchun 50 000 ta realizatsiyadan foydalanildi. 0,30 ko'paytiruvchida chiqishdagi signal/shovqin nisbati 7,242 dB ni, nolga teng bo'lmagan koeffitsiyentlarning o'rtacha ulushi esa 33,512% ni tashkil etdi. -12 dB dagi qisqa impulska mos keluvchi eng noqulay holatda aniqlash ehtimoli 0,6877 dan 0,6109 gacha kamaydi. 0,08 dan oshmaydigan yo'l qo'yiladigan pasayish shartiga ko'ra 0,30 ko'paytiruvchi tanlandi; 0,45 ga teng keyingi daraja cheklovni buzdi. Olingan sozlama shovqinni bostirish va detektorni birgalikda loyihalash uchun mo'ljallangan bo'lib, muayyan gaz tahlili kanalining real ma'lumotlarida keyinchalik tekshirilishi kerak.

Kalit so'zlar: veyvlet shovqinni bostirish, yumshoq chegaralash, dispersiyani baholash, siyraklik koeffitsiyenti, signal/shovqin nisbati, normallashtirilgan xato, soxta signal ehtimoli, impuls javobi, o'zgarishlarni aniqlash, Monte-Karlo usuli, gaz-analitik kanal, kam resursli qayta ishlash.

WAVELET-THRESHOLD TUNING WITH A CONSTRAINT ON HAZARDOUS-EMISSION GAS DETECTION-PROBABILITY LOSS

Davronbekov Dilmurod Abdujalilovich

Doctor of Technical Sciences (DSc), Professor, Tashkent
University of Information Technologies named after Muhammad
al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan

Pisetskiy Yuriy Valerevich

Doctor of Technical Sciences (DSc), Professor, Tashkent
University of Information Technologies named after Muhammad
al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. Soft wavelet-threshold tuning is studied for a sensor-node data-processing path under an explicit constraint on the loss of short hazardous-emission event detection probability. The threshold is defined as the product of the universal value and a dimensionless multiplier ranging from 0 to 1.05. A four-level Haar transform is used. Reconstruction of a 512-sample piecewise-smooth signal is evaluated over 3,000 realizations of additive Gaussian noise at an input signal-to-noise ratio of 0 dB. Event performance is assessed by Monte Carlo simulation for 128-sample blocks, three pulse morphologies, and a false-alarm probability of 0.01; 50,000 realizations are processed at each point. At a multiplier of 0.30, the output signal-to-noise ratio is 7.242 dB and the mean fraction of nonzero coefficients is 33.512%. For the most adverse case, a short pulse at -12 dB, the detection probability decreases from 0.6877 to 0.6109. With the admissible decrease set to 0.08, the multiplier of 0.30 is selected, whereas the next value of 0.45 violates the constraint. The setting supports joint design of denoising and detection and requires subsequent validation using field data from the specific gas-analysis channel.

Keywords: wavelet denoising, soft thresholding, variance estimation, sparsity ratio, signal-to-noise ratio, normalized error, false-alarm probability, pulse response, change detection, Monte Carlo method, gas-analysis channel, resource-constrained processing.

Введение. Газоаналитический канал промышленной системы экологического и технологического контроля формирует временной ряд, в котором полезный отклик сосуществует с дрейфом чувствительности, фоновыми изменениями и шумом измерительной части. Долговременная нестабильность металлооксидных сенсоров подтверждена натурными исследованиями и

открытыми наборами данных [1, 2, 18, 19]. Для распределённых систем существенны сохранение локальных изменений, связанных с появлением контролируемого вещества, ограниченные ресурсы сенсорного узла и достоверная передача тревожного события [3, 4, 17, 20, 21-24].

Литературный анализ и методы. Много-масштабное разложение отделяет медленные

составляющие от локальных деталей [8]. Пороговое оценивание вейвлетных коэффициентов уменьшает дисперсию шума, но одновременно вносит смещение в полезные детали [9]. Значение порога может определяться глобально, по уровням или по локальной статистике коэффициентов [10, 11]. В современных задачах промышленного мониторинга эффективность вейвлетной обработки оценивается не только по SNR и ошибке, но и по сохранению диагностически значимых импульсов [5-7]. Lifting-факторизация и целочисленные варианты преобразования позволяют выполнить эти операции с малой промежуточной памятью [12, 13].

Критерий среднеквадратической ошибки сам по себе не гарантирует сохранения короткого события. Увеличение порога способно улучшать интегральную оценку восстановления и одновременно уменьшать отклик детектора на импульс. Адаптивный выбор представления [14] и методы поиска изменений [15, 16] также используют пороговые решения, однако параметры шумоподавления и событийного блока обычно задаются раздельно.

Целью работы является определение множителя мягкого порога преобразования Хаара по совместным данным о качестве восстановления, разреженности коэффициентов и вероятности обнаружения. Исследуемая процедура отличается от ранжирования нескольких базисов: базис фиксирован, а настраиваемым параметром служит уровень нелинейного сокращения деталей. Рабочая точка выбирается по явному ограничению потери вероятности обнаружения для нескольких форм события.

Результаты. В каждом блоке выполнялось четырёхуровневое ортонормированное преобразование Хаара. Стандартное отклонение шума оценивалось по медиане модулей коэффициентов первого детального уровня. Базовое значение задавалось универсальным порогом, а фактически применяемый порог равнялся $\alpha\lambda_u$, где α - безразмерный множитель из заданной сетки:

$$\lambda_u = \hat{\sigma}\sqrt{2 \ln N}, \quad \hat{\sigma} = \frac{\text{median}_k |d_1[k]|}{0,6745}, \quad (1)$$

где λ_u - универсальный порог;

$\hat{\sigma}$ - оценка стандартного отклонения шума;

N - длина блока, отсчётов;

$d_1[k]$ — коэффициент первого детального уровня;

k - индекс коэффициента;

$\ln$ - натуральный логарифм. В расчётах применялось $\lambda = \alpha\lambda_u$.

Для коэффициентов деталей использовалось мягкое порогование: модуль коэффициента уменьшался на λ , а коэффициенты с модулем не выше λ обнулялись. Коэффициенты аппроксимации не изменялись. Такой порядок сохраняет медленную компоненту и допускает прямой подсчёт доли коэффициентов, которые остаются ненулевыми.

Испытательный сигнал длиной 512 отсчётов включал линейное изменение фона, низкочастотную гармонику и три события разной формы: выброс с быстрым нарастанием и экспоненциальной релаксацией, трапецидальное плато и короткий импульс. К нему добавлялся белый гауссовский шум с входным SNR 0 дБ. Ошибка восстановления вычислялась относительно размаха незашумлённого сигнала.

$$\text{NRMSE} = 100\% \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x[n] - \hat{x}[n])^2}}{x_{\min \max}}, \quad (2)$$

где N - число отсчётов;

n - номер текущего отсчёта;

$x[n]$ и $\hat{x}[n]$ - соответственно эталонное и восстановленное значения;

$x_{\max}$ и $x_{\min}$ - задают границы размаха эталона. Показатель NRMSE выражен в процентах этого размаха.

Выходное отношение сигнал/шум рассчитывалось по энергии эталонной реализации и энергии ошибки восстановления:

$$\text{SNR} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{n=0}^{N-1} s^2[n]}{\sum_{n=0}^{N-1} (s[n] - \hat{s}[n])^2} \right), \quad (3)$$

где SNR - отношение сигнал/ошибка, дБ;

$s[n]$ - эталонный сигнал;

$\hat{s}[n]$ - оценка после обработки;

n - номер отсчёта;

$\lg$ - десятичный логарифм.

Событийный эксперимент проводился отдельно, чтобы интегральная ошибка восстановления не определяла результат детектора. Эталонные импульсы нормировались к единичной энергии; их амплитуда задавалась требуемым SNR. После пороговой обработки применялся согласованный линейный детектор.

Для каждого α и каждой формы события порог детектора независимо калибровался по фоновым реализациям:

$$P_D = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FN}}, P_{FA} = \frac{N_{FP}}{N_{FP} + N_{TN}}, \quad (4)$$

где P_D - вероятность обнаружения;

P_{FA} - вероятность ложной тревоги;

N_{TP} - число правильных обнаружений;

N_{FN} - число пропусков;

N_{FP} - число ложных тревог;

N_{TN} - число правильных решений об отсутствии события.

В таблице 1 приведены параметры обоих вычислительных экспериментов. Фиксированные начальные состояния генератора псевдослучайных чисел позволяют повторить выборки и проверить приведённые далее значения.

Таблица 1.

Параметры вычислительного эксперимента

Параметр	Восстановление	Обнаружение
Длина блока	512	128
Число уровней Хаара	4	4
Сетка α	0; 0,15; ...; 1,05	0; 0,15; ...; 1,05
SNR, дБ	0	-12; -9; -6; -3; 0
Число реализаций	3000	80 000 фоновых; 50000 на точку
Условие детектора	-	$P_{FA}=0,01$
Начальные состояния	20260823	20260824-20260826

Параметры таблицы разделяют две задачи: оценка восстановления выполняется на протяжённом составном сигнале, а событийная проверка — на более коротком блоке детектора. За счёт этого вывод о пороге не сводится к одному показателю качества.

Последовательность вычислений показана на рис.1. Обратная связь от детектора к сетке α означает повторную калибровку порога решения при каждом варианте вейвлетного порога.



Рис.1. Контур событийно-согласованной настройки вейвлетного порога.

Схема исключает сравнение вероятностей обнаружения при разных фактических уровнях ложной тревоги. Сначала для каждого α обеспечивается одинаковое P_{FA} , затем оценивается изменение P_D и доли ненулевых

коэффициентов.

Обсуждение. Результаты восстановления сведены в таблице 2. В столбце SNR указаны среднее значение и выборочное стандартное отклонение по 3000 реализациям; доля коэффициентов учитывает неизменяемую аппроксимацию и ненулевые детали.

Таблица 2.

Качество восстановления и доля ненулевых коэффициентов

α	SNR _{вых} , дБ	NRMSE, %	Ненулевые коэффициенты, %
0,00	0,004 ± 0,268	82,962	100,000
0,15	3,621 ± 0,404	54,734	62,346
0,30	7,242 ± 0,693	36,151	33,512
0,45	9,965 ± 0,870	26,471	16,981
0,60	11,250 ± 0,932	22,847	9,640
0,75	11,633 ± 0,962	21,869	7,134
0,90	11,715 ± 0,971	21,668	6,437
1,05	11,728 ± 0,973	21,635	6,282

При $\alpha=0,30$ среднее выходное SNR достигло 7,242 дБ, а ненулевыми остались 33,512% коэффициентов. Дальнейшее увеличение α улучшало интегральные оценки медленнее: между 0,90 и 1,05 прирост SNR составил только 0,014 дБ.

Графическое представление тех же данных на рис.2 показывает область насыщения и положение выбранного значения $\alpha=0,30$.

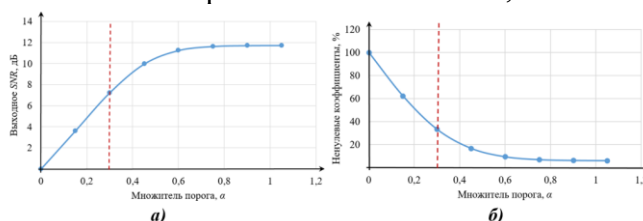


Рис.2. Зависимость качества восстановления (а) и доли коэффициентов (б) от множителя порога.

Рост α до 0,75 резко уменьшает число ненулевых деталей, после чего разреженность почти не изменяется. Такой график не выявляет событийные потери, поэтому окончательный выбор требует отдельной проверки детектора.

В таблице 3 приведены вероятности обнаружения при SNR события -12 дБ для трёх нормированных форм. Все значения получены при индивидуально откалиброванном $P_{FA}=0,01$; максимальная полуширина 95%-го интервала Монте-Карло не превышала 0,0044.

Таблица 3.

Вероятность обнаружения событий разной формы при -12 дБ

α	Короткий импульс	Выброс-релаксация	Плато	Максимальная потеря
0,00	0,6877	0,6952	0,7033	0,0000
0,15	0,6682	0,6783	0,6873	0,0196
0,30	0,6109	0,6385	0,6578	0,0769
0,45	0,5347	0,5930	0,6267	0,1530
0,60	0,4586	0,5612	0,6046	0,2291
0,75	0,4062	0,5454	0,5938	0,2815
0,90	0,3768	0,5374	0,5866	0,3110
1,05	0,3614	0,5336	0,5860	0,3264

Короткий импульс оказался наиболее чувствительным к порогованию: при $\alpha=0,30$ потеря P_D равна 0,0769. Для выброса с релаксацией и плато соответствующие потери составили 0,0566 и 0,0455.

Различие между морфологиями видно на рис.3: после $\alpha=0,30$ кривая короткого импульса убывает заметно быстрее остальных.

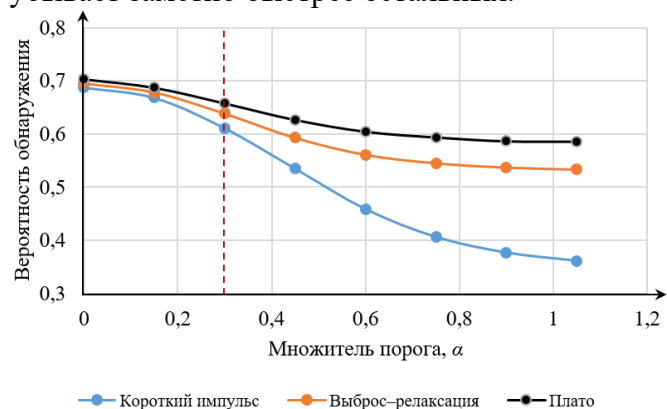


Рис.3. Вероятность обнаружения трёх форм событий при -12 дБ.

Отличие объясняется распределением энергии короткого импульса по детальным коэффициентам: мягкий порог уменьшает именно те компоненты, которые формируют его максимум. У плато большая часть энергии относится к более медленной структуре и ослабляется меньше.

Для проверки выбранной точки в расширенном диапазоне SNR исследован выброс с быстрым нарастанием и релаксацией. Таблица 4 содержит значения без порогования и при $\alpha=0,30$.

Различие сосредоточено в области слабых событий: при -12 дБ оно составляет 0,0561, при -9 дБ — 0,0235, а начиная с -3 дБ в пределах шага моделирования кривые достигают единицы.

Таблица 4.

Вероятность обнаружения выброса с релаксацией

SNR, дБ	$\alpha=0$	$\alpha=0,30$	Разность
-12	0,6960	0,6398	0,0561
-9	0,9570	0,9335	0,0235
-6	0,9996	0,9991	0,0004
-3	1,0000	1,0000	0,0000
0	1,0000	1,0000	0,0000

Кривые на рис.4 подтверждают, что выбранный порог влияет прежде всего на нижнюю часть рабочей характеристики детектора.

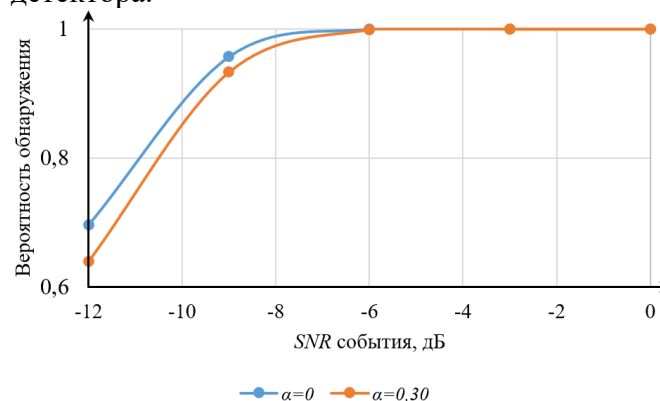


Рис.4. Вероятность обнаружения до ($\alpha=0$) и после ($\alpha=0,30$) пороговой обработки.

При средних и высоких SNR различие практически исчезает, поскольку энергия события существенно превышает порог деталей. Ограничивающим режимом остаётся обнаружение слабых кратковременных сигналов.

Таблица 5.

Выбор рабочей точки пороговой обработки

Показатель	Условие	Результат	Решение
Потеря P_D для каждой формы	$\leq 0,08$	$\alpha=0,30$: 0,0769	Выполнено
Следующий узел сетки	То же	$\alpha=0,45$: 0,1530	Не выполнено
Доля ненулевых коэффициентов	Минимум среди допустимых	33,512%	$\alpha=0,30$
Выходное SNR при входных 0 дБ	Контрольный показатель	$7,242 \pm 0,693$ дБ	$\alpha=0,30$

Рабочая точка определялась без взвешивания разнородных критериев. Сначала вводилось проверяемое условие: для каждой из трёх морфологий при -12 дБ снижение P_D относительно $\alpha=0$ не должно превышать 0,08. Среди вариантов, удовлетворяющих этому условию, выбиралось наибольшее α , поскольку оно обеспечивает меньшую долю ненулевых коэффициентов.

Итог проверки ограничений и показатели выбранной точки представлены в таблице 5.

Граница между $\alpha=0,30$ и $0,45$ оказалась однозначной для принятого ограничения: запас по потере P_D в выбранной точке равен $0,0031$, а на следующем шаге превышение составляет $0,0730$. Уменьшение шага сетки около этой границы может уточнить настройку после получения натуральных данных.

Полученный результат не интерпретируется как универсальная константа для газовых сенсоров. Значение α зависит от частоты дискретизации, импульсной характеристики датчика, спектра помех и структуры детектора. Модель с белым гауссовским шумом не воспроизводит цветной шум, пропуски, насыщение и долговременный дрейф; эти факторы должны быть включены в последующую экспериментальную проверку.

Практическое следствие состоит в изменении порядка настройки программного тракта. Порог шумоподавления нельзя фиксировать только по максимуму выходного SNR . Его следует оценивать совместно с порогом решения детектора на валидационной выборке, содержащей несколько типов опасного события и фоновые режимы конкретного объекта.

Заключение. Предложена процедура настройки мягкого порога преобразования Хаара по ограничению потери вероятности обнаружения. В вычислительном эксперименте значение $\alpha=0,30$ повысило выходное SNR с $0,004$ до $7,242$ дБ и уменьшило среднюю долю ненулевых коэффициентов до $33,512\%$. Для наиболее чувствительной импульсной формы при -12 дБ вероятность обнаружения снизилась с $0,6877$ до $0,6109$, что соответствует принятому пределу $0,08$. Переход к $\alpha=0,45$ нарушил ограничение и потому был исключён, несмотря на дальнейшее улучшение интегральной ошибки восстановления. Результаты подтверждают необходимость совместной калибровки вейвлетного шумоподавления и событийного детектора. Следующий этап работы должен включать оценку порога на записях газовых сенсоров с реальным дрейфом и нестационарными производственными помехами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Sun, Y., & Zheng, Y. (2023). A method of gas sensor drift compensation based on intrinsic characteristics of response curve. Scientific Reports, 13, Article 11971. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39246-8>
- [2] Wörner, J., Eimler, J., & Pein-Hackelbusch, M. (2025). Long-term drift behavior in metal oxide gas sensor arrays: A one-year dataset from an electronic nose. Scientific Data, 12, Article 1628. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-05993-8>
- [3] Zhou, M., Wang, S., Li, J., Wei, Z., & Shui, L. (2025). A wireless sensor network-based combustible gas detection system using PSO-DBO-optimized BP neural network. Sensors, 25(10), Article 3151. <https://doi.org/10.3390/s25103151>
- [4] Praveenchandar, J., Vetrithangam, D., Kaliappan, S., Karthick, M., Pegada, N. K., Patil, P. P., Rao, S. G., & Umar, S. (2022). IoT-based harmful toxic gases monitoring and fault detection on the sensor dataset using deep learning techniques. Scientific Programming, 2022, Article 7516328. <https://doi.org/10.1155/2022/7516328>
- [5] Wang, Y., Liu, J., Wang, D., Liu, X., Cao, P., & Hua, K. (2024). Noise reduction method for mine wind speed sensor data based on CEEMDAN-wavelet threshold. Scientific Reports, 14, Article 24869. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75288-2>
- [6] Ni, B., Song, F., Zhao, L., Fu, Z., & Huang, Y. (2024). Wavelet denoising of fiber optic monitoring signals in permafrost regions. Scientific Reports, 14, Article 9085. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59941-4>

- [7] Mallat, S. G. (1989). A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(7), 674–693. <https://doi.org/10.1109/34.192463>
- [8] Donoho, D. L., & Johnstone, I. M. (1994). Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage. *Biometrika*, 81(3), 425–455. <https://doi.org/10.1093/biomet/81.3.425>
- [9] Johnstone, I. M., & Silverman, B. W. (2005). Empirical Bayes selection of wavelet thresholds. *The Annals of Statistics*, 33(4), 1700–1752. <https://doi.org/10.1214/009053605000000345>
- [10] Chang, S. G., Yu, B., & Vetterli, M. (2000). Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression. *IEEE Transactions on Image Processing*, 9(9), 1532–1546. <https://doi.org/10.1109/83.862633>
- [11] Sweldens, W. (1998). The lifting scheme: A construction of second generation wavelets. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 29(2), 511–546. <https://doi.org/10.1137/S0036141095289051>
- [12] Calderbank, A. R., Daubechies, I., Sweldens, W., & Yeo, B.-L. (1998). Wavelet transforms that map integers to integers. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 5(3), 332–369. <https://doi.org/10.1006/acha.1997.0238>
- [13] Coifman, R. R., & Wickerhauser, M. V. (1992). Entropy-based algorithms for best basis selection. *IEEE Transactions on Information Theory*, 38(2), 713–718. <https://doi.org/10.1109/18.119732>
- [14] Lavielle, M. (2005). Using penalized contrasts for the change-point problem. *Signal Processing*, 85(8), 1501–1510. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2005.01.012>
- [15] Fryzlewicz, P. (2014). Wild binary segmentation for multiple change-point detection. *The Annals of Statistics*, 42(6), 2243–2281. <https://doi.org/10.1214/14-AOS1245>
- [16] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38(4), 393–422. [https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4)
- [17] Hunter, G. W., Akbar, S., Bhansali, S., Daniele, M., Erb, P. D., Johnson, K., Liu, C.-C., Miller, D., Oralkan, O., Hesketh, P. J., Manickam, P., & Vander Wal, R. L. (2020). Editors' choice—Critical review—A critical review of solid state gas sensors. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(3), Article 037570. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab729c>
- [18] Chai, H., Zheng, Z., Liu, K., Xu, J., Wu, K., Luo, Y., Liao, H., Debliquy, M., & Zhang, C. (2022). Stability of metal oxide semiconductor gas sensors: A review. *IEEE Sensors Journal*, 22(6), 5470–5481. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3148264>
- [19] El Barkani, M., Benamar, N., Talei, H., & Bagaa, M. (2024). Gas leakage detection using Tiny Machine Learning. *Electronics*, 13(23), Article 4768. <https://doi.org/10.3390/electronics13234768>
- [20] Yoldoshev, J. F., & Pisetskiy, Y. V. (2025). A model of decision-making based on telecommunication data in emergency monitoring systems. *Muhammad al-Xorazmiy avlodlari*, 3(33), 76–79.
- [21] Pisetskiy, Y. V., Votinov, K. A., & Yuldoshev, J. F. (2026). Особенности промышленных беспроводных сетей управления на основе стандартов WIA и перспективы их развития. *Yangi Renaissance Ilm-Fan Taraqqiyoti*, 1(7), 362–368. <https://phoenixpublication.net/index.php/YRIF/article/view/11350>

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Давронбеков, Д. А. & Писецкий, Ю. В. (2026). Настройка вейвлетного порога с ограничением потери вероятности обнаружения опасного выброса газов. *Цифровые технологии в промышленности*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.44>
