

УДК 004.942; 654.924.56

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.53.2.011](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.53.2.011)

## Метод гибридной фильтрации информации с пожарных датчиков на основе взвешенного медианного фильтра с конечной импульсной характеристикой и фильтра Калмана

С. Сингх✉, А.В. Прибыльский

*Южный федеральный университет, Таганрог, Российская Федерация*

**Резюме.** Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения устойчивости рекурсивных систем прогнозирования пожароопасных ситуаций к разнотипным возмущениям – вибрациям, электромагнитным помехам и накапливающимся ошибкам прогноза. В таких системах даже незначительные искажения спрогнозированных временных рядов могут привести к ложным срабатываниям или пропуску угроз, что особенно критично в объектах с высокой плотностью пребывания людей, например, в метрополитенах. Существующие фильтры, применяемые изолированно, не обеспечивают одновременного подавления гауссовских и импульсных помех, сохранения резких изменений сигнала и минимизации фазового сдвига. В связи с этим в работе разработан и исследован гибридный метод фильтрации, сочетающий фильтр Калмана и взвешенный КИХ-гибридный медианный фильтр. Эффективность метода оценена на синтетических и реальных данных (включая ~6 млн отсчетов с датчиков метрополитена) по комплексу метрик: MAE, MSE, SNR, точности воспроизведения производной и быстродействию. Показано, что предложенный гибрид обеспечивает наилучшие результаты: снижение MAE до 0,419, рост SNR до 2,05 дБ и сохранение Accuracy на уровне 99,98 %. Материалы статьи представляют практическую ценность для разработчиков систем пожарной безопасности и специалистов по обработке сенсорных данных в реальном времени.

**Ключевые слова:** фильтрация, пожарные датчики, гибридный фильтр, КИХ фильтр, фильтр Калмана, взвешенный медианный фильтр.

**Для цитирования:** Сингх С., Прибыльский А.В. Метод гибридной фильтрации информации с пожарных датчиков на основе взвешенного медианного фильтра с конечной импульсной характеристикой и фильтра Калмана. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(2). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/article?id=2176> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.53.2.011

## A method for hybrid filtering of information from fire sensors based on a weighted median filter with a finite impulse response and a Kalman filter

S. Singh✉, A.V. Pribylskiy

*Southern Federal University, Taganrog, the Russian Federation*

**Abstract.** The relevance of this study necessitated improving the resilience of recursive fire hazard prediction systems to various types of disturbances, such as vibrations, electromagnetic interference, and cumulative forecast errors. In such cases, even a minor impact on predicted time series can lead to false alarms or missed threats, which is especially critical in areas with high occupant illumination, such as subways. Existing filters, when used in isolation, do not consistently suppress Gaussian and impulsive signals, preserving sharp signal changes and minimizing phase shift. Therefore, a hybrid filter method combining a Kalman filter and a weighted FIR hybrid median filter was developed and evaluated. The method's effectiveness is evaluated using synthetic and in-house data (including ~6 million samples from subway sensors) using a combination of metrics: MAE, MSE, SNR, derivative result accuracy,

and response time. The proposed hybrid is shown to provide the best results: a reduction in MAE to 0.419, an increase in SNR to 2.05 dB, and an accuracy level of 99.98%. The papers' materials are of practical value to fire safety system developers and early sensor data processing specialists.

**Keywords:** filtering, fire detectors, hybrid filter, FIR filter, Kalman filter, weighted median filter.

**For citation:** Singh S., Pribylskiy A.V. A method for hybrid filtering of information from fire sensors based on a weighted median filter with a finite impulse response and a Kalman filter. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(2). (In Russ.). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/article?id=2176> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.53.2.011

## Введение

В системах раннего обнаружения пожаров, применяемых в объектах с высокой плотностью пребывания людей (например, в метрополитенах), одним из важнейших требований к алгоритмам обработки данных является устойчивость к шумам и возмущающим воздействиям, а также способность корректно воспроизводить динамику изменения параметров, например, в условиях предиктивной аналитики. В реальных условиях функционирования данные от пожарных датчиков подвержены влиянию различных дестабилизирующих факторов – вибраций, электромагнитных помех, изменения влажности, а также ошибок, накапливающихся при использовании прогнозирующих моделей в режиме реального времени. Такие искажения могут приводить к ложным срабатываниям или, наоборот, к пропуску важной информации об окружающей среде, состоянии объекта и т. п. В этих условиях задача постобработки спрогнозированных временных рядов с сохранением их динамических характеристик и одновременным подавлением шумов становится необходимым этапом проектирования надежной системы мониторинга.

Фильтр Калмана остается базовым инструментом для оценки состояния в динамических системах, однако его эффективность сильно зависит от точности априорной информации о шумах. Для повышения робастности предлагается рассмотреть методы оптимизации его параметров с помощью метаэвристических алгоритмов [1]. В условиях неопределенности и высокого уровня помех показана целесообразность комбинирования фильтра Калмана с фильтрами с конечной импульсной характеристикой (КИХ), в том числе несмещенными (UFIR), что позволяет снизить зависимость от статистик шума и улучшить устойчивость оценки [2].

Медианные и гибридные КИХ-медианные фильтры демонстрируют высокую эффективность при обработке сигналов с резкими изменениями и импульсными помехами, особенно в биомедицинских и сенсорных приложениях. Модификации фильтров, такие как введение весов или замена медианы на мириаду, позволяют гибко настраивать баланс между подавлением шума и сохранением структуры сигнала [3].

Гибридные подходы, совмещающие линейные (Калман, КИХ) и медианные фильтры, все чаще рассматриваются как перспективное направление для повышения надежности систем мониторинга, включая задачи отслеживания объектов и распределенной оценки в сенсорных сетях [4, 5]. В контексте пожарной безопасности фильтр Калмана применяется в основном в ансамблевых и децентрализованных формах для ассимиляции данных и уточнения прогнозных моделей, однако без явного сочетания с медианными фильтрами [6]. Существующие фильтрационные методы, применяемые изолированно, не обеспечивают в полной мере требуемого баланса между подавлением шумов, сохранением скачков сигнала и минимальным фазовым сдвигом, что обуславливает актуальность разработки и исследования гибридных подходов к фильтрации.

Целью настоящего исследования является повышение устойчивости рекурсивной системы прогнозирования пожароопасных ситуаций [7] за счет разработки и применения гибридного метода фильтрации, сочетающего фильтр Калмана и взвешенный гибридный медианный фильтр с конечной импульсной характеристикой (ВКГМФ) [8]. Для достижения этой цели в работе решаются следующие задачи: разрабатывается метод гибридной фильтрации способного функционировать в реальном времени и обеспечивать устойчивость как гауссовским, так и импульсным шумам; формируется репрезентативный набор синтетических и реальных тестовых сценариев, охватывающих стабильные, критические, скачкообразные, шумовые и гибридные режимы работы датчиков; реализуется процедура объективного сравнения эффективности различных подходов к фильтрации по комплексу метрик, включая точность воспроизведения сигнала, сохранение динамики, подавление шума; проводится экспериментальная валидация предложенного метода на данных, полученных из реальных систем мониторинга метрополитена.

### Материалы и методы

Учитывая особенности рекурсивного прогнозирования (накопление ошибок, зависимость выхода от предыдущих прогнозов, повышенная чувствительность к шуму, необходимость устойчивой и быстрой фильтрации в реальном времени) [9], разработан метод гибридной фильтрации на основе ВКГМФ и фильтра Калмана. Работает данный фильтр в режиме реального времени в два этапа.

Этап 1: фильтр работает, как обычный фильтр Калмана [10] до заполнения окна фильтра ВКГМФ.

Этап 2: к выходу фильтра Калмана применяется ВКГМФ фильтрация, с задержкой  $d = 7$  отсчетов (этот параметр настраиваемый).

Опишем работу ВКГМФ фильтрации на этом этапе:

1. Формируется окно  $W_t$ , размером  $2d + 1 = 15$  значений фильтра Калмана в промежутке  $[k - d, k + d]$ , где  $k$  – номер такта (момента):

$$W_t = \left\{ x_{Kalman}[k - 7], x_{Kalman}[k - 6], \dots, x_{Kalman}[k], \dots, x_{Kalman}[k + 6], x_{Kalman}[k + 7] \right\}, \quad (1)$$

где  $x_{Kalman}[i]$  – вектор состояния системы в  $i$ -й момент.

2. Вычисляются весовые компоненты  $a, a_1, b, b_1$ :

$$\begin{aligned} a &= x_{kalman}[t - 4] + x_{Kalman}[t - 5], \\ a_1 &= x_{kalman}[t - 2] + x_{Kalman}[t - 1], \\ b &= x_{kalman}[t - 6] + a, \\ b_1 &= x_{kalman}[t] + a_1. \end{aligned} \quad (2)$$

3. Формируется набор значений  $S$  для медианной фильтрации:

$$S = \left[ x(k - 3), x(k - 4), x(k - 2), \frac{a}{2}, \frac{a}{2}, \frac{a}{2}, \frac{a_1}{2}, \frac{a_1}{2}, \frac{b}{3}, \frac{b}{3}, \frac{b}{3}, \frac{b}{3}, \frac{b_1}{3}, \frac{b_1}{3}, \frac{b_1}{3}, \frac{b_1}{3} \right]. \quad (3)$$

4. Представим итоговое отфильтрованное значение выходного сигнала  $y(t)$  в момент времени  $k$  при наборе медианной фильтрации  $S$  в виде:

$$y(t) = \text{median}(S). \quad (4)$$

Стратегию переключения фильтра можно описать следующим образом:

1) Для  $k < d$  значения выходного сигнала равны фильтру Калмана:

$$y(t) = x_{Kalman}(t), \quad k < d. \quad (5)$$

2) Для  $d \leq t \leq N - d$  применяется комбинированный подход с ВКГМФ (4), где  $N$  – длина обрабатываемой выборки.

3) Для последних  $d$  отсчётов ( $k \geq N - d$ ) снова используется только фильтр Калмана:

$$y(t) = x_{Kalman}(k), k \geq N - d. \quad (6)$$

*Данные для тестирования фильтра.* Для оценки эффективности предложенного и альтернативных методов фильтрации использован комбинированный подход, включающий синтетические и реальные данные.

Синтетические данные [11, 12] сгенерированы в соответствии с пятью типовыми сценариями, отражающими различные режимы функционирования пожарных датчиков:

– Стабильный сценарий имитирует штатный режим эксплуатации: температура и задымленность находятся в допустимых пределах (температура 10–35 градусов, задымленность 60000–60125 аналоговых отсчетов) и изменяются плавно с незначительными колебаниями (для температуры колебаний  $\pm 2$  градуса, а для задымленности – допустимые вариации в пределах 60000–60125 аналоговых отсчетов, отражающие реальную динамику вентиляции и пассажиропотока. Плавный характер этих изменений соответствует физическим процессам в подземных сооружениях метрополитена, где инерционность теплообмена между воздухом и грунтовым массивом (коэффициент теплопроводности  $\lambda \approx 2,08$  Вт/(м·°С), теплоемкость  $c \approx 1,55$  кДж/кг·°С), а также инерционность вентиляционной системы исключают резкие скачки параметров воздушной среды. Такая динамика обусловлена суточной периодичностью движения поездов, сезонной вариативностью климатических условий на поверхности и постоянной циркуляцией воздуха в замкнутом объеме тоннеля, что полностью соответствует режиму штатной эксплуатации действующих метрополитенов с двухпутными и однопутными перегонными тоннелями. Такой тип динамики позволяет оценить способность фильтра сохранять стабильность без избыточного сглаживания.

– Критический сценарий моделирует развитие пожароопасной ситуации: параметры монотонно приближаются к пороговым значениям, что даёт возможность оценить, насколько точно фильтр воспроизводит динамику тренда и не вносит фазового запаздывания, критичного для раннего обнаружения угрозы.

– Скачкообразный сценарий воспроизводит кратковременные импульсные возмущения (например, открытие дверей, включение оборудования, электромагнитные помехи) и позволяет проверить устойчивость фильтра к выбросам и его способность сохранять истинные скачки сигнала.

– Шумовой сценарий имитирует условия сильных вибраций или электромагнитных помех за счет высокого уровня случайных колебаний и используется для оценки эффективности подавления шума при сохранении общей формы сигнала.

– Гибридный сценарий последовательно объединяет фазы всех перечисленных режимов, что обеспечивает проверку адаптивности фильтра к смене условий.

На Рисунке 1 представлен пример синтетических данных из гибридного сценария.

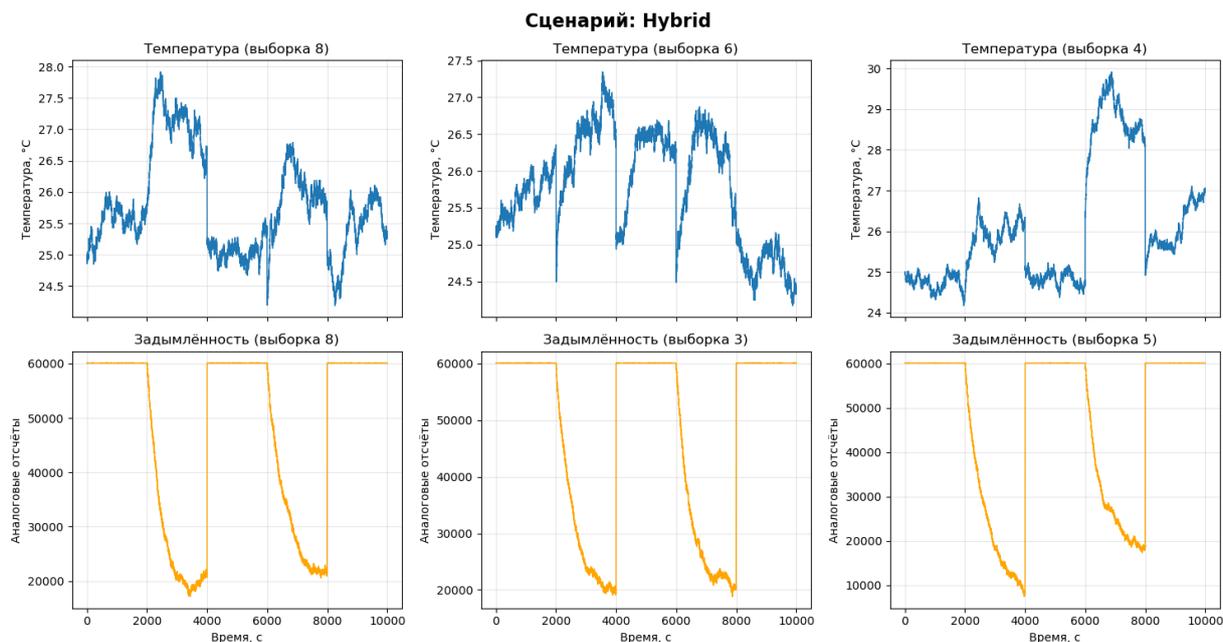


Рисунок 1 – Пример синтетических данных из гибридного сценария  
Figure 1 – Example of synthetic data from a hybrid scenario

В исследовании каждый синтетический сценарий содержит 30 независимых выборок по 20000 отсчётов. Диапазон значений температуры – от  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , задымленности – от 0 до 60125 аналоговых отсчетов.

Реальные сценарии, имеют одинаковый диапазон изменения температуры и задымленности, однако количество выборок две: данные показателей датчиков в метро и данные показателей датчиков в школе. В первую выборку входит  $\sim 6$  миллионов ежесекундных отчетов по каждому датчику, во вторую выборку  $\sim 1$  миллион ежесекундных отчетов.

## Результаты

Оценка эффективности разработанного гибридного фильтра Калман-ВКГМФ проводилась в сравнении с рядом альтернативных подходов: классическим скользящим средним, фильтром Калмана, фильтром Савицкого-Голея, отдельно применяемым ВКГМФ, а также гибридом фильтра Калмана и Савицкого-Голея.

Результаты моделирования фильтрации данных (показателей датчиков в метро) с описанными фильтрами на примере датчика температуры приведены в Таблице 1. При обработке реальных данных, полученных от датчиков метрополитена, использовалось 6 миллионов отсчетов, поэтому фактически даже изменение точности в 0,01 % уже составляет 600 отсчетов. Это объясняется тем, что в реальных данных примерно 99 % отсчетов содержат информацию без существенных отклонений от нормальных значений датчиков.

Анализ полученных результатов гибридного фильтра Калман-ВКГМФ по всем ключевым критериям качества показал следующие: снижение среднеквадратической ошибки (MSE) на 44,1 % и рост отношения сигнал-шум (SNR) на 4,36 дБ относительно базового фильтра Калмана свидетельствуют об эффективном подавлении как гауссовских, так и импульсных помех одновременно. Сравнительные испытания на датчике задымленности показали идентичные закономерности, что указывает на устойчивость метода к различным типам сенсорных сигналов, характерных для распределенных систем мониторинга метрополитена. Незначительное отклонение

производной ( $-0,009$ ) представляет фиксированный фазовый сдвиг, величина которого допустима для практического применения в задачах раннего обнаружения угроз.

Таблица 1 – Показатели качества фильтрации для параметра температуры при реальном сценарии

Table 1 – Filtration quality indicators for the temperature parameter in real-life scenario

Наименование фильтра	MAE	MSE	Accuracy, %	SNR, дБ	Сохранение производной	Время обработки, мс/отсчет
Скользящее среднее	0,536	0,472	99,71	-0,29	0,010	~0
Калмана	0,560	0,492	99,60	-0,47	0,025	0,0007
Савицкого-Голея	0,548	0,472	99,62	-0,30	0,012	~0
ВКГМФ	0,542	0,463	99,61	-0,21	-0,002	0,00175
Калман- + Савицкого-Голея	0,432	0,294	99,98	1,76	0,022	0,0008
<b>Калман-ВКГМФ</b>	<b>0,419</b>	<b>0,275</b>	<b>99,98</b>	<b>2,05</b>	<b>-0,009</b>	<b>0,00179</b>

Пример отфильтрованных данных (показателей датчиков в метро) представлен на Рисунке 2.

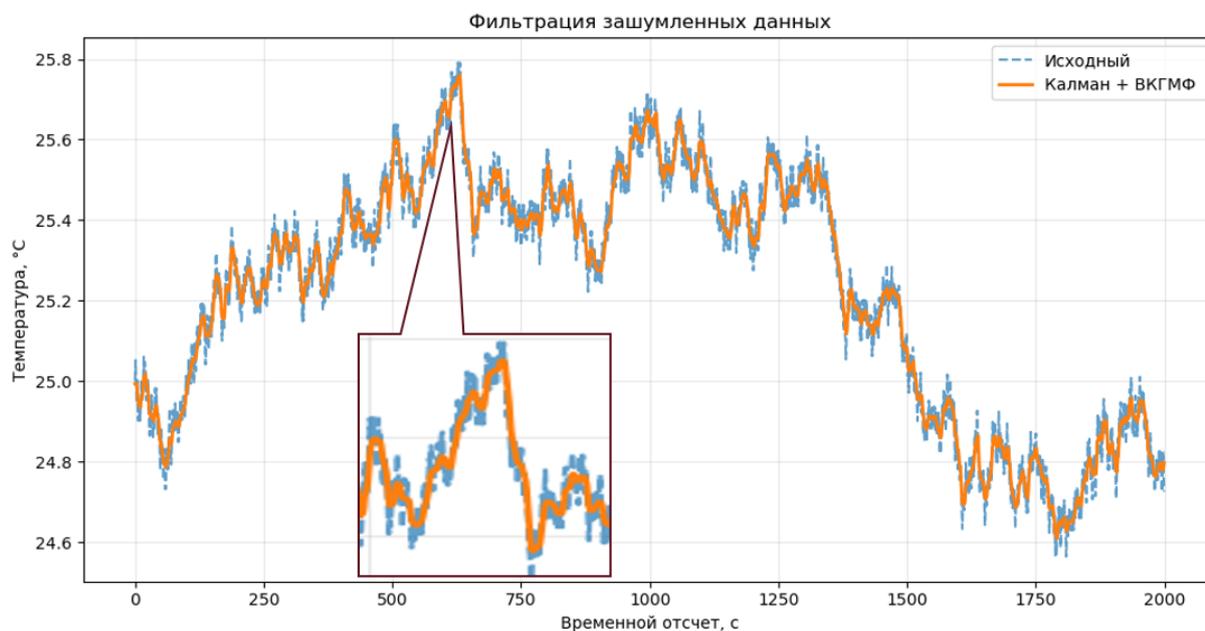


Рисунок 2 – График сравнения отфильтрованных и исходных данных при реальном сценарии  
Figure 1 – Comparison graph of filtered and original data for real scenario

### Обсуждение

Полученные результаты исследований подтверждают, что предложенный гибридный фильтр Калман-ВКГМФ обеспечивает наилучшее соотношение между подавлением шума, сохранением динамики сигнала и устойчивостью к выбросам по сравнению с рассмотренными альтернативами. В частности, снижение MAE и MSE по сравнению с базовыми фильтрами (на 20–25 % относительно фильтра Калмана и скользящего среднего) демонстрирует значительный выигрыш в точности

восстановления истинного сигнала. Одновременно высокий уровень SNR (2,05 дБ) указывает на эффективное подавление как гауссовских, так и импульсных помех, что важно в условиях метрополитена, где присутствуют как вибрации, так и электромагнитные наводки.

Следует отметить, что гибридный фильтр Калман-Савицкого-Голея также показал высокие результаты по метрикам точности и SNR, однако его работа основана на линейной аппроксимации сигнала полиномами, что делает его менее устойчивым к резким скачкам и выбросам. В отличие от него, ВКГМФ сохраняет нелинейную структуру сигнала за счет медианной обработки расширенного взвешенного набора, что особенно проявляется в скачкообразных и гибридных сценариях.

Наблюдаемое незначительное отклонение производной ( $-0,009$ ) указывает на наличие фиксированного фазового сдвига, обусловленного симметричным окном ВКГМФ длиной  $2d + 1 = 15$  отсчетов.

### Заключение

Разработанный гибридный метод фильтрации, сочетающий фильтр Калмана и ВКГМФ, продемонстрировал высокую эффективность при обработке временных рядов от пожарных датчиков в условиях рекурсивного прогнозирования. Метод обеспечивает устойчивость к широкому спектру возмущений – от гауссовского шума до импульсных выбросов – при сохранении динамических особенностей сигнала, критически важных для своевременного обнаружения угроз. Экспериментальная оценка на синтетических и реальных данных (данные показателей датчиков в метро) подтвердила превосходство предложенного подхода по ключевым метрикам MAE, MSE, SNR и точности воспроизведения производной.

В будущем планируется модифицировать предложенный гибридный метод фильтрации, чтобы уменьшить влияние ненулевой фазы, возникающей при использовании медианной фильтрации, двумя способами:

- изменить структуру и вес в наборе  $S$ , уменьшая или увеличивая их в зависимости от приоритета – подавление шума или минимизация задержки;
- реализовать адаптивное изменение структуры и весов в наборе  $S$  на основе локальных характеристик сигнала, например, градиента, кривизны или скорости изменения тренда.

Такой подход позволит перейти от статической к динамически настраиваемой фильтрации, обеспечивая оптимальный баланс между точностью, устойчивостью и временем отклика в реальных условиях эксплуатации систем пожарной безопасности, а также может снизить или вовсе компенсировать фазовый сдвиг фильтра.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Janjanam L., Saha S.K., Kar R., Mandal D. Adaptive recursive system identification using optimally tuned Kalman filter by the metaheuristic algorithm. *Soft Computing*. 2024;28:7013–7037. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-09503-z>
2. Zhou Y., Jing Zh., Dong P., Huang J. Robust median consensus cubature Kalman filter for distributed sensor networks. *Digital Signal Processing*. 2024;153. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2024.104629>
3. Tulyakova N., Trofymchuk O. Application of myriad filtering in real-time trend detection algorithms. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2024;69(6):91–106.
4. Pale-Ramon E.G., Shmaliy Y.S., Morales-Mendoza L.J., Lee M.G. Finite Impulse Response (FIR) Filters and Kalman Filter for Object Tracking Process. In: *6<sup>th</sup> International Technical Conference on Advances in Computing, Control and Industrial*

- Engineering (CCIE 2021), 16–17 October 2021, Hangzhou, China*. Singapore: Springer; 2022. P. 665–684. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-3927-3\\_66](https://doi.org/10.1007/978-981-19-3927-3_66)
5. Kou L., Wang P., Ba R., Liu J., Deng Q., Zhang H. Study on Ensemble Kalman Filter Based Building Fire Prediction and Dynamic Situation Awareness for Emergency Response. In: *ASME 2023 Heat Transfer Summer Conference collocated with the ASME 2023 17<sup>th</sup> International Conference on Energy Sustainability, 10–12 July 2023, Washington, DC, USA*. New York: ASME; 2023. <https://doi.org/10.1115/ht2023-106757>
  6. Сингх С., Прибыльский А.В., Косенко Е.Ю. Разработка и исследование алгоритмов прогнозирования пожароопасных ситуаций. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2025;(1):65–81. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2025-1-65-81>  
Singh S., Pribylskiy A.V., Kosenko E.Y. Development and research of algorithms for forecasting fire hazardous situations. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2025;(1):65–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2025-1-65-81>
  7. Su Q., Hu G., Liu Zh. Research on Fire Detection Method of Complex Space Based on Multi-Sensor Data Fusion. *Measurement Science and Technology*. 2024;35(8). <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad437d>
  8. Guan Sh., Liu B., Chen Sh., et al. Adaptive median filter salt and pepper noise suppression approach for common path coherent dispersion spectrometer. *Scientific Reports*. 2024;14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66649-y>
  9. Сингх С., Прибыльский А.В. Синтез системы сверхбыстрого обнаружения пожароопасных ситуаций на основе комплекса взаимосвязанных датчиков. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2024;(2):121–132. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2024-2-121-132>  
Singh S., Pribylskiy A.V. Synthesis of a system for ultra-fast detection of firehazardous situations based on a complex of interconnected sensors. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2024;(2):121–132. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2024-2-121-132>
  10. Wang T., Hu J., Ma T., Song J. Forest fire detection system based on Fuzzy Kalman filter. In: *2020 International Conference on Urban Engineering and Management Science (ICUEMS), 24–26 April 2020, Zhuhai, China*. IEEE; 2020. P. 630–633. <https://doi.org/10.1109/ICUEMS50872.2020.00138>
  11. Jiang Y. Fire detection system based on improved multi-sensor information fusion. In: *Fifth International Conference on Computer Information Science and Artificial Intelligence (CISAI 2022), 16–18 September 2022, Chongqing, China*. SPIE; 2023. <https://doi.org/10.1117/12.2667524>
  12. Lin Ch.-Ch., Wang L. Real-Time Forecasting of Building Fire Growth and Smoke Transport via Ensemble Kalman Filter. *Fire Technology*. 2017;53(3):1101–1121. <https://doi.org/10.1007/S10694-016-0619-X>

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Сингх Сани**, ассистент, аспирант, Южный федеральный университет, Таганрог, Российская Федерация.

*e-mail*: [singkh@sfedu.ru](mailto:singkh@sfedu.ru)

ORCID: [0009-0002-9470-4596](https://orcid.org/0009-0002-9470-4596)

**Singh Sanni**, Assistant, Postgraduate, Southern Federal University, Taganrog, the Russian Federation.

**Прибыльский Алексей Васильевич**, кандидат технических наук, доцент, Южный федеральный университет, Таганрог, Российская Федерация.

**Alexey V. Pribylsky**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southern Federal University, Taganrog, the Russian Federation.

*e-mail:* [apribylsky@sfedu.ru](mailto:apribylsky@sfedu.ru)

*Статья поступила в редакцию 08.01.2026; одобрена после рецензирования 11.02.2026; принята к публикации 24.02.2026.*

*The article was submitted 08.01.2026; approved after reviewing 11.02.2026; accepted for publication 24.02.2026.*