



## Распознавание группы вистлеров в радиосигналах ОНЧ-диапазона

*Е. А. Лутцева\*<sup>1</sup>, Г. М. Водинчар<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Камчатский государственный технический университет, 683003, ул. Ключевская, 35, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

<sup>2</sup> Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, ул. Мирная, 7, с. Паратунка, Камчатский край, Россия

**Аннотация.** В данной статье представлен комплексный подход к решению задачи автоматического распознавания групп свистящих атмосфериков (вистлеров) в частотно-временных спектрах (спектрограммах) радиосигналов ОНЧ-диапазона. Такие радиосигналы образуются в результате прохождения атмосферных электрических разрядов через магнитосферный волновод и являются естественными маркерами состояния магнитосферы Земли. Объект исследования: спектрограммы радиосигналов ОНЧ-диапазона, содержащие свистящие атмосферерики. Предмет исследования: алгоритмы автоматического распознавания и идентификации групп свистящих атмосфериков на частотно-временных спектрограммах. Предлагаемый метод включает в себя многоэтапный алгоритм обработки исходного сигнала. На первом этапе происходит фильтрация сигнала, которая состоит из двух частей: модифицированная медианная фильтрация, отбор значимых отсчетов. Далее происходит переход в новую систему координат, которая позволяет трансформировать и «выпрямить» криволинейные образы вистлеров. Это преобразование существенно упрощает последующий анализ. Следующий этап – распознавание вистлера/вистлеров в рассматриваемом фрагменте сигнала (данный этап был рассмотрен авторами ранее). Заключительный этап – поиск групп вистлеров, выпрямленные образы которых пересекаются в одной точке на временной оси. Для тестирования заключительного этапа сгенерированы фрагменты сигналов двух видов: идеальная группа, состоящая из двух прямых линий (вистлеров), которые сходятся в одной точке; две группы прямых линий (вистлеров), приближенных к реальным условиям распространения вистлеров (добавление гауссова шума, снижение интенсивности второго сигнала в группе). Описанный алгоритм позволяет автоматизировать процесс идентификации групп вистлеров, что повышает объективность и скорость анализа по сравнению с визуальными методами.

*Ключевые слова:* свистящие атмосферерики (вистлеры), группа вистлеров, распознавание образов, ОНЧ-излучение.

Получение: 05.11.2025; Исправление: 16.11.2025; Принятие: 23.11.2025; Публикация онлайн: 24.11.2025

**Для цитирования.** Лутцева Е. А., Водинчар Г. М. Распознавание группы вистлеров в радиосигналах ОНЧ-диапазона // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2025. Т. 53. № 4. С. 59-74. EDN: SUEVDS. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2025-53-4-59-74>.

**Финансирование.** Работа выполнена за счет НИР ГВТ ФГБОУ ВО «Камчатский государственный технический университет» (номер государственной регистрации 124022500267-1) и Государственного задания ИКИР ДВО РАН (рег. № НИОКТР 124012300245-2).

**Конкурирующие интересы.** Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

**Авторский вклад и ответственность.** Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

\***Корреспонденция:** ✉ E-mail: [luttsevaea@gmail.com](mailto:luttsevaea@gmail.com)

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License



© Лутцева Е. А., Водинчар Г. М., 2025

© ИКИР ДВО РАН, 2025 (оригинал-макет, дизайн, составление)



## Recognizing a Group of Whistlers in VLF Radio Signals

*E. A. Lutseva*<sup>\*1</sup>, *G. M. Vodinchar*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Kamchatka State Technical University, 683003, Klyuchevskaya st., 35, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

<sup>2</sup> Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 684034, Mirnaya st., 7, Paratunka, Kamchatka, Russia

**Abstract.** This paper presents a comprehensive approach to solving the problem of automatic recognition of groups of whistling atmospheric (whistlers) in the time-frequency spectra (spectrograms) of VLF radio signals. Such radio signals are generated by atmospheric electrical discharges passing through the magnetospheric waveguide and serve as natural markers of the Earth's magnetosphere state. Object of study: spectrograms of VLF radio signals containing whistling atmospheric. Subject of study: algorithms for the automatic recognition and identification of groups of whistling atmospheric on time-frequency spectrograms. The proposed method involves a multi-stage algorithm for processing the source signal. The first stage involves signal filtering, which consists of two parts: modified median filtering and selection of significant samples. Next, a transition to a new coordinate system is performed, which allows for the transformation and "straightening" of the curvilinear patterns of whistlers. This transformation significantly simplifies subsequent analysis. The next stage is the recognition of a single whistler or multiple whistlers in the signal fragment under consideration (this stage was addressed by the authors in previous work). The final stage is the search for groups of whistlers whose straightened patterns intersect at a single point on the time axis. For testing the final stage, signal fragments of two types were generated: an ideal group consisting of two straight lines (whistlers) that converge at a single point; two groups of straight lines (whistlers) approximating real-world whistler propagation conditions (by adding Gaussian noise and reducing the intensity of the second signal in the group). The described algorithm automates the process of identifying whistler groups, which enhances the objectivity and speed of analysis compared to visual methods.

*Key words:* whistlers, whistler group, pattern recognition, VLF radiation.


Received: 05.11.2025; Revised: 16.11.2025; Accepted: 23.11.2025; First online: 24.11.2025

**For citation.** Lutseva E. A., Vodinchar G. M. Recognizing a group of whistlers in VLF radio signals. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2025, 53: 4, 59-74. EDN: SUEVDS. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2025-53-4-59-74>.

**Funding.** The work was carried out within the framework of the research project of the GBT of the FSBEI HE "Kamchatka State Technical University" (state registration number 124022500267-1) and the State Assignment of IKIP FEB RAS (reg. No. NIOKTR 124012300245-2).

**Competing interests.** There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

**Contribution and Responsibility.** All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

\*Correspondence:  E-mail: [lutsevaea@gmail.com](mailto:lutsevaea@gmail.com)

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Lutseva E. A., Vodinchar G. M., 2025

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2025 (original layout, design, compilation)



## Введение

Свистящие атмосферерики (вистлеры) представляют собой класс естественных радиосигналов, спектр которых заключен в диапазоне очень низких частот (ОНЧ). Источником возникновения вистлеров является импульсное излучение грозового разряда. Проникая в магнитосферу Земли, волна движется вдоль силовых линий геомагнитного поля и, преодолев значительное расстояние, возвращается в магнитно-сопряженную точку земной поверхности, где может быть зафиксирована приёмной аппаратурой [1, 2].

При распространении вистлера наблюдается частотная дисперсия, приводящая к тому, что высокочастотные компоненты сигнала прибывают раньше, чем низкочастотные. Свистящие атмосферерики поддаются четкой идентификации исключительно на спектрограмме, где непосредственным образом вистлера является характерная саблевидная кривая (рис. 1).

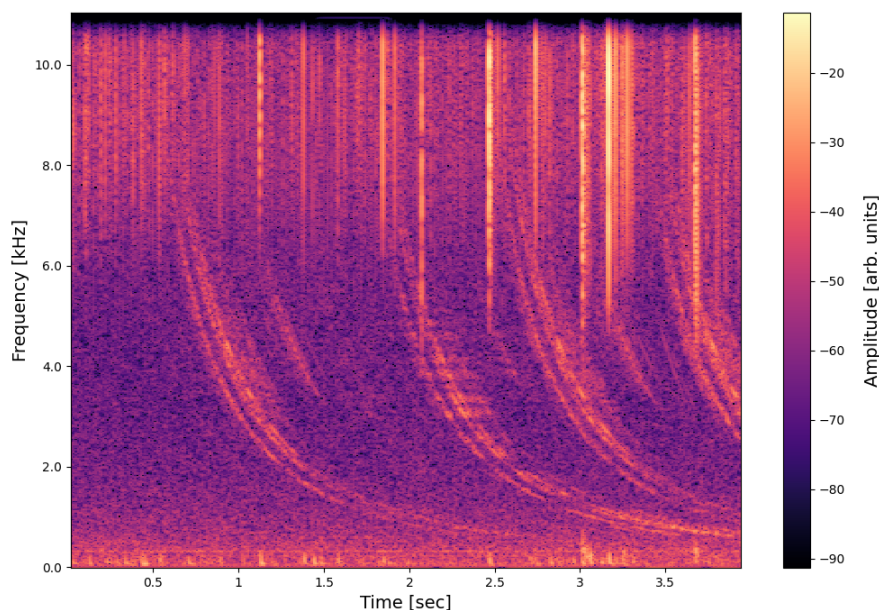


Рис. 1. Характерный вид вистлеров на спектрограмме. Цветовая шкала соответствует интенсивности сигнала в условных единицах

Figure 1. Characteristic appearance of whistlers on a spectrogram. The color scale corresponds to the signal intensity in arbitrary units

Изучение свистящих атмосферериков представляет значительный научный интерес для исследования космической погоды, поскольку они выступают в роли естественных маркеров, характеризующих состояние плазмосферы Земли [3]. Кроме того, их анализ вносит существенный вклад в исследование природы грозовой активности [4–6], установление корреляций между процессами в ионосфере и магнитосфере, а также в оценку последствий естественного и антропогенного воздействия на верхние слои атмосферы [7].

Глобальный мониторинг вистлеров осуществляется при помощи сети станций AWDANet (Automatic Whistler Detector and Analyzer system), координируемой в рамках международного проекта «Plasmon» [8, 9]. Одну из таких станций разместили в обсерватории «Карымшина», которая принадлежит Институту космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН. При этом, для исследования задач космической погоды, а также исследований, связанных с магнитосферой и ионосферой Земли, необходимо создание системы автоматического распознавания вистлеров в радиосигналах ОНЧ-диапазона. В ИКИР ДВО РАН имеется система распознавания, основанная на методе двумерной корреляции спектра исходного сигнала и спектра сигнала-эталона [10]. Однако разработанная система имеет существенный недостаток – она не работает в режиме реального времени. Ранее в ИКИР использовались зарубежные системы распознавания, описанные в работах [9, 11], однако сейчас их использование не представляется возможным. Таким образом, существует необходимость в разработке и внедрении новой системы распознавания, способной идентифицировать образы вистлеров в режиме реального времени.

В статье [12] авторами был подробно описан подход к распознаванию вистлера (вистлеров) в рассматриваемом фрагменте сигнала. В данной статье предлагается подход к распознаванию группы вистлеров. Под группой вистлеров понимается ситуация, когда в спектрограмме присутствует несколько вистлеров, выпрямленные образы которых пересекаются в одной точке на временной оси. Распознавание таких групп представляет особый интерес: пересечение в одной точке на временной оси означает, что вистлеры сформированы одним атмосфериком. Группы вистлеров в реальных спектрограммах наблюдаются крайне редко, фактически авторам известен один случай ручного выделения такой группы [13]. Однако по техническим причинам доступ именно к этому фрагменту данных сейчас невозможен. Поэтому предлагаемый алгоритм пока удалось протестировать только на искусственно синтезированных данных.

## Постановка задачи распознавания

Исходными данными для решаемой задачи распознавания свистящих атмосфериков в системе мониторинга ИКИР являются 15-минутные WAV-файлы ОНЧ-радиосигнала. Исходные файлы разбиваются на четырёхсекундные окна, и алгоритм распознавания обрабатывает спектрограммы этих фрагментов. Каждая спектрограмма представляется в виде двумерного массива амплитуд  $A = \{A_{ij}\}$ ,  $i = 0, \dots, N - 1$ ,  $j = 0, \dots, M - 1$ , где  $N = 513$  и  $M = 338$ . По вертикали индекс  $i$  нумерует отсчеты частоты  $f_i$ , а по горизонтали индекс  $j$  – отсчеты времени  $t_j$ .

Основная идея предлагаемого алгоритма состоит в распознавании «выпрямленного» образа вистлера, поскольку идентификация прямой линии является алгоритмически более простой задачей, чем распознавание линии саблеобразной формы. Выпрямление вистлера достигается путем

нелинейного преобразования координатных осей, формулы которого выводятся из закономерностей распространения вистлеров в магнитосфере [1, 2].

В общем виде алгоритм распознавания состоит из следующих этапов: фильтрация сигнала, преобразование системы координат, поиск образов вистлеров, поиск групп вистлеров.

## Модифицированная медианная фильтрация

Из рис.1 видно, что в анализируемом сигнале, помимо образа свистящего атмосферика, присутствуют  $\delta$ -образные компоненты (импульсы грозовых разрядов, так называемые атмосферерики) и узкополосные составляющие (техногенные и аппаратные шумы), которые проявляются в виде протяженных прямолинейных структур вертикальной и горизонтальной ориентации. Оба типа таких сигналов являются помехами с точки зрения задачи распознавания вистлеров. Поэтому сначала целесообразно отфильтровать спектрограмму от таких помех.

Медианный фильтр широко известен как эффективный инструмент для подавления импульсных помех [14]. В частности, в работе [15] был предложен модифицированный алгоритм медианной фильтрации, разработанный для устранения протяженных вертикальных помех в спутниковых снимках. В рассматриваемой работе данный алгоритм был адаптирован для подавления вертикальных и горизонтальных помех на спектрограммах.

В первую очередь необходимо получить два одномерных массива  $X$  и  $Y$ , элементы которых являются средними значениями по строкам и столбцам исходного массива  $A$ .

$$\begin{aligned} X_i &= \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} A_{ij}, \quad i = 0, \dots, N-1, \\ Y_j &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} A_{ij}, \quad j = 0, \dots, M-1. \end{aligned} \quad (1)$$

Теперь каждая горизонтальная и вертикальная помеха будет сконцентрирована в нескольких соседних отсчетах массивов  $X$  и  $Y$  соответственно (рис. 2). На рисунке видно, что ярко выраженные вертикальные помехи в спектрограмме проявляются в массиве  $Y$  (рис. 2б) в виде сильных пиков. Горизонтальные помехи не столь явно выражены на спектрограмме и в массиве  $X$  (рис. 2в) присутствуют небольшие пики в районе 0.2 – 0.3 кГц. Соответствующие узкополосные сигналы тоже просматриваются на спектрограмме.

Далее полученные массивы подвергаются одномерной медианной фильтрации:

$$\begin{aligned} X_i^{\text{med}} &= \text{median}\{X_{i+k} | k = -L_X, \dots, L_X\}, \quad i = L_X, \dots, N - L_X - 1, \\ Y_j^{\text{med}} &= \text{median}\{Y_{j+k} | k = -L_Y, \dots, L_Y\}, \quad j = L_Y, \dots, M - L_Y - 1, \end{aligned} \quad (2)$$

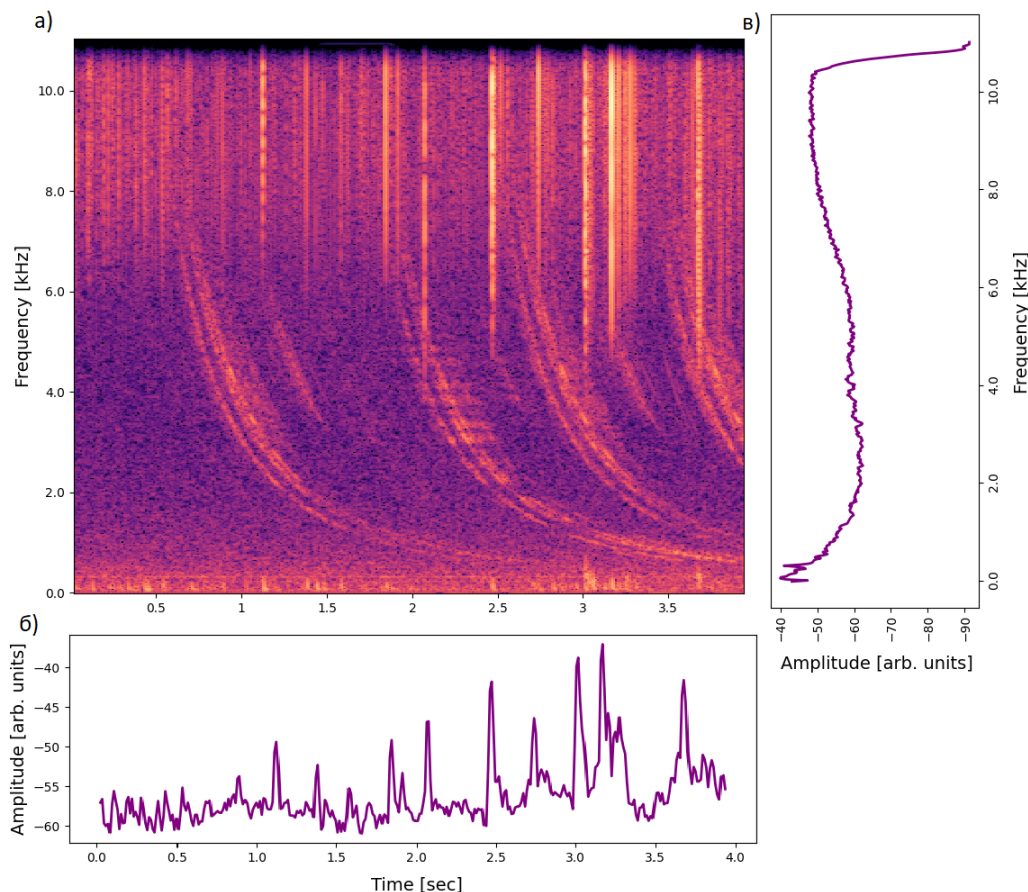


Рис. 2. Спектрограмма и одномерные массивы: а) исходная спектрограмма; б) усредненный массив  $Y$ ; в) усредненный массив  $X$

Figure 2. Spectrogram and one-dimensional arrays: a) original spectrogram; б) averaged array  $Y$ ; c) averaged array  $X$

где  $2L_X + 1$  и  $2L_Y + 1$  длины масок фильтров. Затем определяются массивы шумов:

$$\Delta X_i = X_i - X_i^{\text{med}}, \Delta Y_j = Y_j - Y_j^{\text{med}}. \quad (3)$$

Фильтрованную спектрограмму  $\hat{A}$  (рис. 3) определим далее по правилу

$$\hat{A}_{ij} = \min[A_{ij} - \Delta X_i; A_{ij} - \Delta Y_j]. \quad (4)$$

Понятно, что эффективность процесса фильтрации по данному алгоритму существенно зависит от длины масок фильтра. Когда маска очень маленькая, фильтрации практически не будет; наоборот, при избыточно длинной маске все образы на спектрограмме будут "размазаны". Поэтому существуют некоторые оптимальные размеры масок, которые определялись эмпирически. В результате экспериментов с размерами масок оптимальными оказались значения  $L_X = L_Y = 15$ .

Результаты показывают, что предложенный алгоритм фильтрации успешно подавляет образы атмосфериков и узкополосные шумы (рис. 3). Сильные пики в массиве  $Y$  эффективно подавлены как и два незначительных пика в массиве  $X$ .

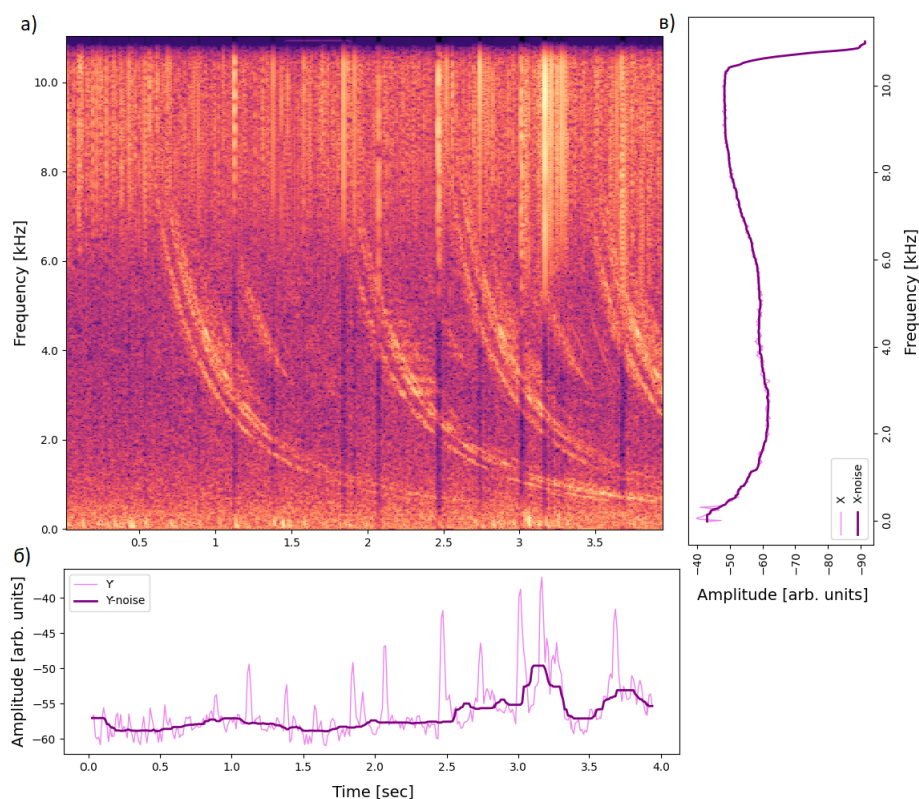


Рис. 3. Результат модифицированной медианной фильтрации: а) фильтрованная спектрограмма; б) одномерный массив  $Y$  до и после фильтрации; в) одномерный массив  $X$  до и после фильтрации

Figure 3. Result of modified median filtering: a) filtered spectrogram; b) one-dimensional array  $Y$  before and after filtering; c) one-dimensional array  $X$  before and after filtering

## Отбор значимых отсчетов спектрограммы

Обеспечение работы алгоритма в режиме реального времени требует сокращения объема обрабатываемых данных.

Для сигналов, поступающих с пункта мониторинга ИКИР ДВО РАН, полезный частотный диапазон свистящих атмосфериков представляет собой полосу от 2 до 7 кГц. Выделение этого диапазона основано на следующих соображениях. Визуальный анализ большого числа спектрограмм показал, что за пределами этого частотного диапазона присутствуют сильные шумы. Хотя на некоторых спектрограммах вистлеры просматриваются в диапазоне от 1 до 8 кГц. Спектрограмма на рис. 1 относится как раз к таким малоза шумленным. Однако и на ней видно, что на частотах менее 1 кГц и более 7 кГц уровень зашумленности выше.

Поэтому все точки, не попадающие в диапазон от 2 до 7 кГц, из дальнейшего анализа исключаются. Для демонстрации результатов модифицированной медианной фильтрации выше было показано ее применении ко всей спектрограмме.

Однако в процессе реальной обработки сначала выполняется выделение полезного частотного диапазона, и только после этого происходит этап фильтрации.

Далее происходит отбор значимых отсчетов для каждого столбца фильтрованной спектрограммы  $\hat{A}$ . Для этого применяется методика, основанная на теореме Шустера, которая позволяет классифицировать спектральные компоненты как принадлежащие полезному сигналу или белому шуму. Квадраты элементов столбца спектрограммы  $\hat{A}$  рассматриваются как периодограмма Шустера соответствующего фрагмента ОНЧ-сигнала. Далее на уровне значимости  $\alpha$  выполняется проверка гипотезы о том, принадлежит ли рассматриваемый отсчет белому шуму или же он принадлежит полезному сигналу [16]. Понятно, что результат такой фильтрации будет зависеть от закладываемого уровня значимости. Если  $\alpha$  избыточно мал, то к белому шуму будут отнесены отсчеты полезного сигнала. При избыточно больших  $\alpha$  фильтром будет пропускаться много шумовых компонент. Экспериментируя с уровнем значимости и визуально сопоставляя исходные и фильтрованные спектрограммы, мы остановились на  $\alpha = 0.00001$ .

Если выполняется условие

$$\hat{A}_{ij} < \frac{-\sigma_j^2(\ln\alpha)}{N}, \quad (5)$$

то отсчет  $\hat{A}$  считается незначимым (шумом), в противном случае – значимым. В данном неравенстве  $\sigma_j^2$  – дисперсия сигнала, которая вычисляется по каждому  $j$  столбцу через спектральные компоненты  $\hat{A}$ :

$$\sigma_j^2 = 2 \sum_{i=0}^{N-1} A_{ij}^2. \quad (6)$$

На основе обработанной спектрограммы формируется массив значимых отсчетов для последующего анализа, что позволяет сократить объем данных приблизительно на порядок. Массив значимых отсчетов можно составлять двумя способами. Первый способ – «бинарный подход», при котором в элементе массива сохраняются только координаты значимого отсчета. Второй способ – «взвешенный подход», при котором помимо координат сохраняется и значение амплитуды. Это позволяет в дальнейшем использовать значение амплитуды или возрастающей функции от нее в качестве весового коэффициента значимости точки. Оба способа не имеют принципиального различия в объеме данных, отличаясь примерно в 2 раза.

На рис. 4 представлена спектрограмма сигнала, после отбора значимых отсчетов.

## Преобразование системы координат

Из теории распространения радиоволн диапазона 1-8 кГц в магнитосферной плазме известно [1, 2], что форма вистлера, пришедшего в момент  $t_0$ , хорошо описывается уравнением

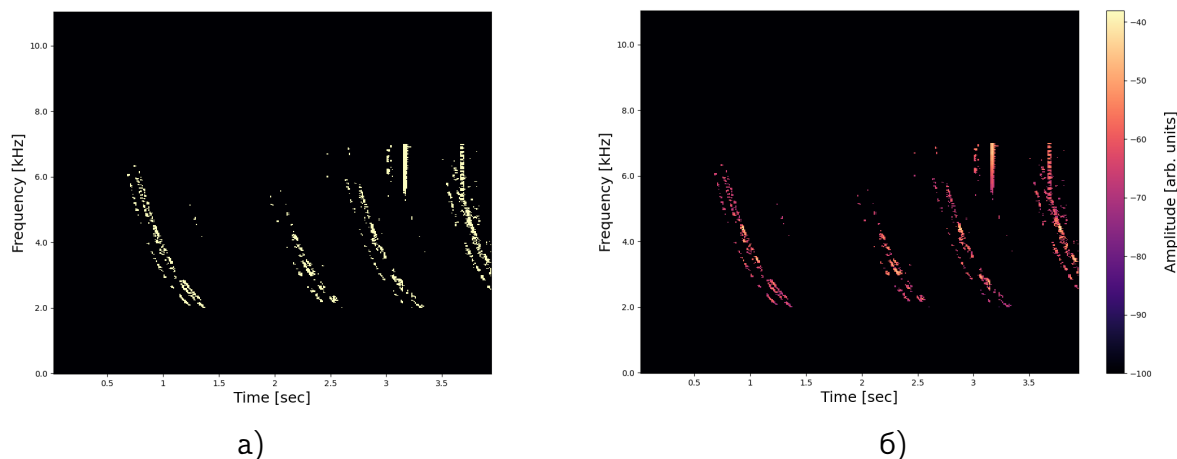


Рис. 4. Значимые точки спектрограммы: а) бинарное представление; б) представление с амплитудами  
 Figure 4. Significant points of the spectrogram: a) binary representation; b) amplitude representation

$$t - t_0 = \frac{D}{\sqrt{f}}, \quad (7)$$

где постоянный коэффициент  $D > 0$  называют дисперсией. Согласно (7), если ввести преобразование  $s = f^{-1/2}$ , то в плоскости координат  $(t, s)$  образ вистлера выпрямляется, и уравнению (7) будет соответствовать  $t - Ds - t_0 = 0$ , т.е. наклонная прямая, образующая ненулевой острый угол с положительным направлением оси времени. Соответствующие значимым отсчетам точки  $Q_m = (t_{j_m}, s_{i_m})$  изображены на рис. 5. На этом рисунке показаны только точки без цветовой индикации амплитуды.

В связи с тем, что распознавание прямой является алгоритмически менее затратной задачей по сравнению с распознаванием кривой, последующие этапы алгоритма выполняются в плоскости  $(t, s)$ . О наличии вистлера в этом случае свидетельствует скопление точек вблизи наклонной прямой. Если в сигнале присутствует несколько вистлеров, в плоскости  $(t, s)$  будет наблюдаться соответствующее количество таких наклонных прямых.

## Поиск группы вистлеров

Следующим этапом алгоритма распознавания является обнаружение вистлера (вистлеров) в рассматриваемом фрагменте сигнала. Данный алгоритм подробно описан в статье [12]. Идея алгоритма была основана на рассмотрении пучка прямых в плоскости  $(t, s)$ , которые параметризуются углом наклона  $\varphi$  и расстоянием от прямой до начала координат  $D$ . В настоящей работе с целью обнаружения группы вистлеров рассматривается другая параметризация пучка прямых, где вместо параметра  $D$  используется точка пересечения прямой с осью времени.

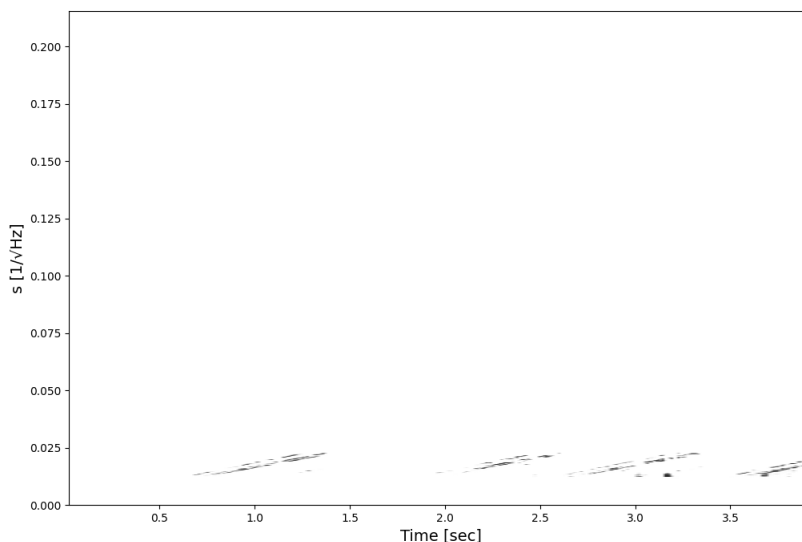


Рис. 5. Соответствующие значимым отсчетам спектрограммы точки в плоскости  $(t, s)$

Figure 5. The points on the  $(t, s)$  plane corresponding to the significant samples of the spectrogram

Чтобы идентифицировать группу вистлеров, требуется проверить, пересекаются ли их выпрямленные образы в одной точке на временной оси. Для поиска точки пересечения прямой линии воспользуемся уравнением

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{s - s_0}{t - T}, \quad (8)$$

где  $\varphi$  – угол, образуемый прямой с осью времени, а  $(s_0, T)$  – координаты точки пересечения с осью времени.

Параметры угла  $\varphi$  и временного интервала были выбраны на основе анализа реальных спектрограмм, содержащих вистлеры. Значения угла  $\varphi$  ограничены диапазоном от  $\varphi_{\min} = 0^\circ$  до  $\varphi_{\max} = 2^\circ$ , что соответствует эмпирически установленным характеристикам вистлеров. Диапазон значений точек пересечения задан в интервале от  $T_{\min} = -4$  до  $T_{\max} = 4$  секунд. Такой выбор обусловлен особенностью распространения вистлеров, когда их точка пересечения может находиться за пределами анализируемого четырёхсекундного фрагмента, в том числе в области отрицательных значений временной оси.

Пучок прямых, проходящих через точку  $Q_m$ , задается уравнением, которое определяет линию в области от  $\varphi_{\min} < \varphi < \varphi_{\max}$ ,  $T_{\min} < T < T_{\max}$  в плоскости параметров  $(\varphi, T)$ :

$$T = t_{j_m} - \frac{s_{i_m}}{\operatorname{tg}\varphi}. \quad (9)$$

Введем равномерные сетки  $\{\varphi_k\}$  и  $\{T_l\}$  для возможных диапазонов углов и точек пересечения с осью времени. Для каждой значимой точки  $Q_m$  будем находить

значение угла  $\varphi_r$ , соответствующее координате пересечения с осью времени  $(-4, 0)$ . Далее для каждого угла  $\varphi_k$  из диапазона от  $\varphi_{r+1}$  до  $\varphi_{\max}$  по уравнению (9) определяется точка пересечения с осью времени  $T$ , после чего найденное значение округляется до ближайшего  $T_l$ . В результате формируется двумерная гистограмма  $H(\varphi, T)$  распределения точек  $Q_m$  в плоскости  $(\varphi, T)$ . На рис. 6 представлен пример гистограммы, полученный для рассматриваемого в данной статье фрагмента реального вистлера, изображенного на рис. 1.

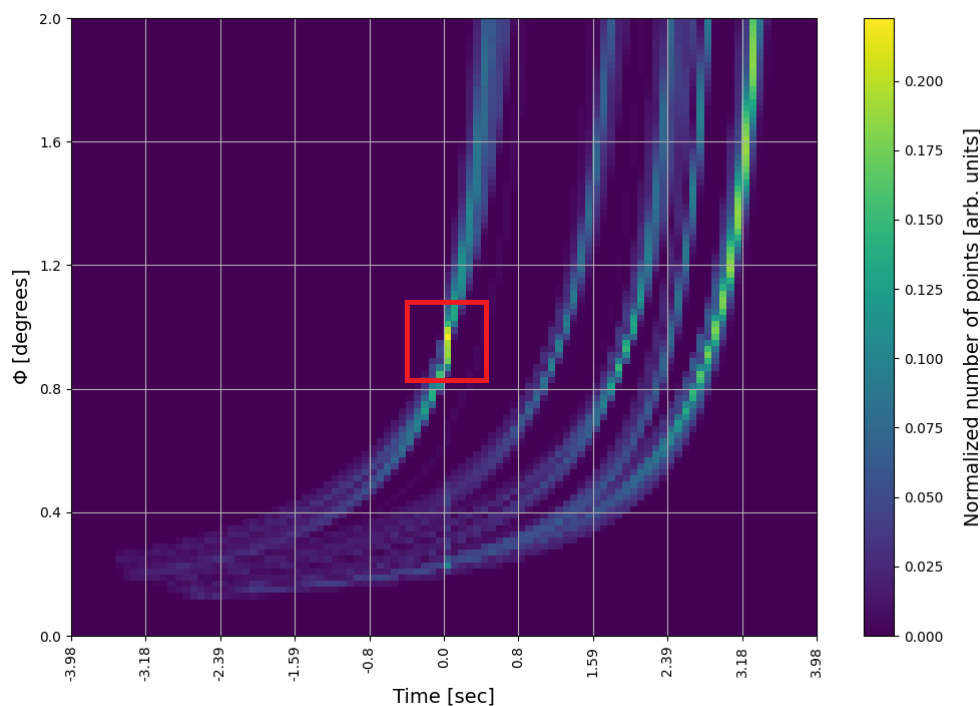


Рис. 6. Двумерная гистограмма распределения пар  $(\varphi, T)$

Figure 6. Two-dimensional histogram of the  $(\varphi, T)$  pair distribution

Идентификация группы вистлеров заключается в поиске локальных максимумов на гистограмме. Например, на гистограмме на рис. 6 виден один явно локализованный максимум, выделенный прямоугольной областью. При наличии группы, состоящей из двух вистлеров, на гистограмме можно ожидать два ярко выраженных максимума различной интенсивности, расположенных на одной временной координате, но соответствующих разным значениям углов. Эти максимумы должны быть разной интенсивности, поскольку соответствуют вистлеру и его эху.

На этом этапе результат выделения определяется шагами сеток по углу  $\varphi$  и времени  $T$ . При увеличении этих размеров происходит ухудшение локализации отдельно взятой точки спектрограммы на гистограмме, но при этом относительная величина максимумов гистограммы неизбежно будет выше. Поэтому идентификация самого максимума будет надежнее, однако неопределенность в локализации этого максимума на плоскости  $(\varphi, T)$  будет

выше. При малых шагах сетки локализация точки гистограммы будет выше, но максимумы на спектрограмме будут менее выражены. Поэтому, уменьшая шаги сеток и повышая локализацию отсчета точки на спектрограмме, мы ухудшаем локализацию максимума на гистограмме, и наоборот. Эксперименты с размерами сеток это подтвердили. В расчетах, приведенных в данной статье, использовались размеры сеток, равные 100.

Решение о присутствии вистлера или группы вистлеров принимается на основе превышения максимумов гистограммы определенного порогового значения  $N_{\text{крит}}$ . Величина этого порогового значения может быть определена экспериментально.

## Тестирование алгоритма на синтезированных данных

Для тестирования предложенного алгоритма были сгенерированы фрагменты сигналов двух видов. Первый фрагмент представляет собой идеальную группу, состоящую из двух прямых линий (вистлеров), которые сходятся в одной точке на оси времени. Все точки такого сигнала являются значимыми и в точности соответствуют заданным уравнениям прямых. На рис. 7а представлены сгенерированные прямые, рис. 7б – соответствующая гистограмма.

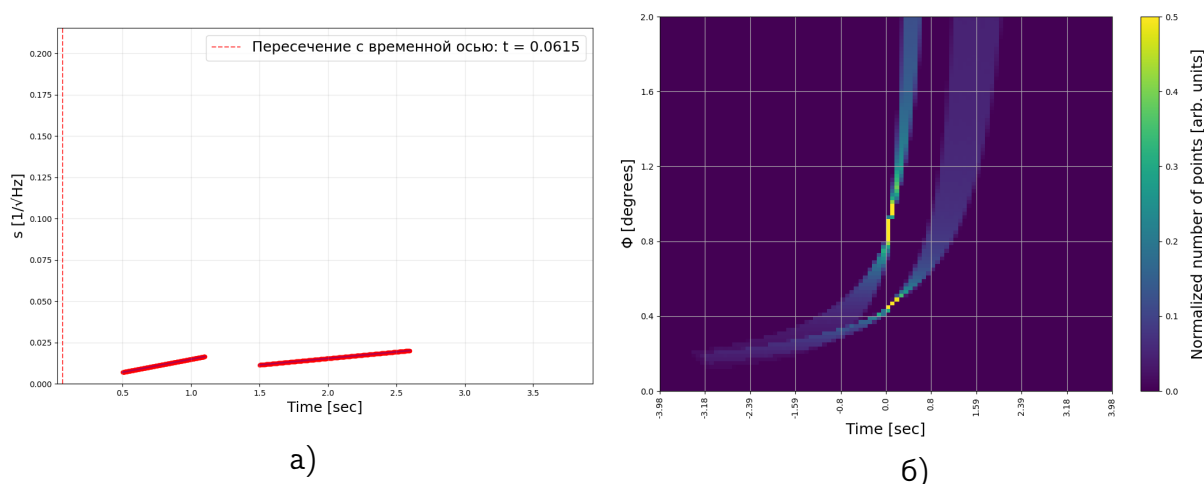


Рис. 7. Тестирование алгоритма на сгенерированных данных: а) синтезированные идеальные прямые; б) соответствующая гистограмма  
Figure 7. Testing the algorithm on generated data: a) synthesized ideal lines; b) the resulting histogram

Можно увидеть, что на гистограмме есть два явно выраженных локальных максимума, находящихся на одинаковой временной координате, но при этом имеющих различные угловые значения.

Второй сгенерированный фрагмент содержит две группы прямых линий (вистлеров). Для приближения модели к реальным условиям на сгенерированные прямые линии был наложен гауссов шум, что привело к случайным отклонениям точек от заданной прямой. Помимо этого, каждая последующая прямая в группе имеет сниженную интенсивность (амплитуду). Это условие отражает

физику формирования группы вистлеров: первый сигнал в группе соответствует исходному вистлеру, а каждый следующий – его эхо, которое прошло в магнитно-сопряженную точку земного шара и вернулось обратно.

Для расчета сниженной интенсивности использовался следующий метод. В отфильтрованных данных реального сигнала, содержащего вистлеры, были выбраны минимальное и максимальное значения амплитуды. Далее эти значения использовались для расчета амплитуды синтезированных сигналов (амплитуды генерировались как случайные значения из заданного диапазона: от реального минимального до реального максимального значения). Для каждой второй прямой из группы при расчете амплитуды использовался понижающий коэффициент  $k = 0.8$ . Также количество точек для вторых прямых было уменьшено.

На рис. 8а представлены сгенерированные прямые линии, а на рис. 8б – соответствующая гистограмма.

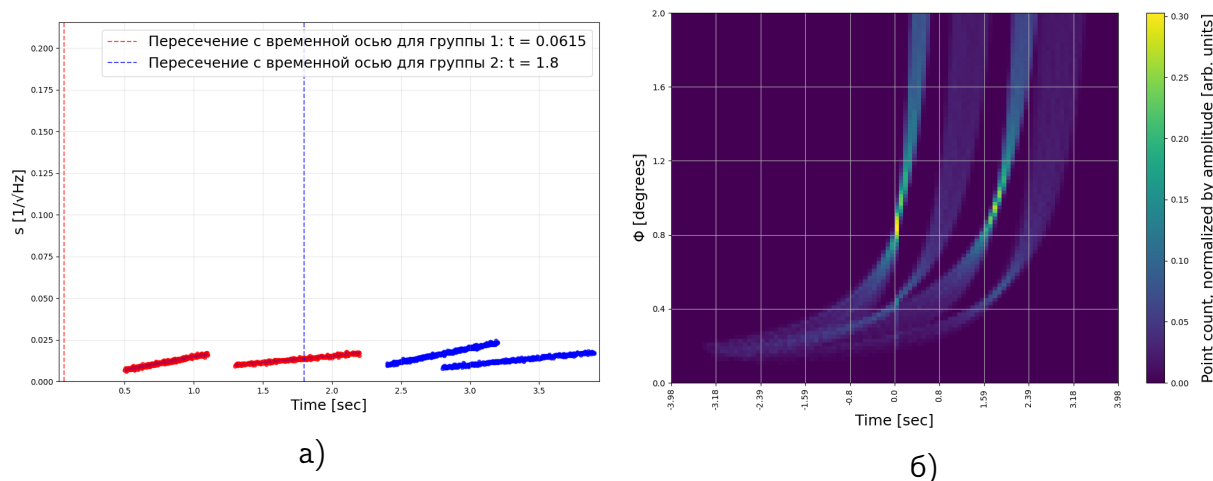


Рис. 8. Тестирование алгоритма на сгенерированных данных, близких к реальным условиям: а) синтезированные прямые; б) получившаяся гистограмма  
Figure 8. Testing the algorithm on generated data: a) synthesized ideal lines; b) the resulting histogram

Проведенные эксперименты с синтезированными данными показывают формирование ожидаемых максимумов гистограммы. Критическое значение  $N_{\text{крит}}$  для принятия решения о наличии группы может быть определено только по результатам обработки реальных спектрограмм.

Авторы благодарят сотрудников лаборатории электромагнитных излучений ИКИР ДВО РАН Н.В. Черневу, Е.И. Малкина за любезно предоставленные спектрограммы ОНЧ-радиосигналов.

## Заключение

В данной работе описана общая идея распознавания группы свистящих атмосфериков в ОНЧ-спектрограммах. Предложенный алгоритм состоит из четырех основных этапов: фильтрация сигнала (модифицированная медианная

фильтрация, отбор значимых отчетов), преобразование системы координат, распознавание образа вистлера/вистлеров, поиск группы вистлеров. Проведено тестирование алгоритма на искусственно синтезированных данных. Апробация на реальных данных в настоящее время невозможна из-за технических ограничений, не позволяющих получить доступ к базе данных спектрограмм с группами вистлеров.

## Список литературы


1. Storey L.R.O. An investigation of whistling atmospherics // *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, 1953. vol. 246, pp. 113-141.
2. Гершман Б. Н., Угаров В. А. Распространение и генерация низкочастотных электромагнитных волн в верхней атмосфере // *Успехи физических наук*, 1960. Т. LXXII, № 2, С. 235-270.
3. Carpenter D. L. Remote sensing of magnetospheric plasma by means of whistler mode signals // *Rev. Geophys.*, 1988. vol. 26, pp. 535-549.
4. Collier A. B., Hughes A. R. W., Lichtenberger J., Steinbach P. Seasonal and diurnal variation of lightning activity over southern Africa and correlation with European whistler observations // *Annales Geophysicae*, 2006. vol. 24, pp. 529-542 DOI: 10.5194/angeo-24-529-2006.
5. Collier A. B., Delport B., Hughes A. R. W., Lichtenberger J., Steinbach P., Öster J., Rodger C. J. Correlation between global lightning and whistlers observed at Tihany, Hungary // *J. Geophys. Res.*, 2009. vol. 114, 07210 DOI: 10.1029/10.1029/2008JA013863.
6. Чернева Н. В., Holzworth R. H., Иванов А. В., Дружин Г. И., Мельников А. Н. Перспективы использования всемирной сети локаций гроз (WWLLN) для определения пепловых извержений вулканов на Камчатке / *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России*, Труды Третьей научно-технической конференции. Обнинск, ГС РАН, 2011, С. 415-419.
7. Сивоконь В. П., Кубышкин А. В., Богданов В. В. и др. Вистлеры как возможные индикаторы активных воздействий на ионосферу // *Труды МФТИ*, 2014. Т. 6, № 2, С. 174-179.
8. Plasmon Research Group *Automatic Whistler Detector and Analyzer System*, Eötvös Loránd University, <http://plasmon.elte.hu/>.
9. Lichtenberger J., Ferencz C., Hamar D., Steinbach P., Rodger C. J., Collier A. B. Automatic Whistler Detector and Analyzer system: Automatic Whistler Detector // *J. Geophys. Res.*, 2008. vol. 113, no. 12 DOI: 10.1029/2008JA013467.
10. Агранат И. В., Чернева Н. В. поставление с грозовой активностью / *Природная среда Камчатки*, Материалы XI региональной молодежной научной конференции, 16 апреля 2012 г. Петропавловск-Камчатский, 2012, С. 89-100.
11. Lichtenberger J. A new whistler inversion method // *J. Geophys. Res.*, 2009. vol. 114, 07222 DOI: 10.1029/2008JA013799.
12. Водинчар Г. М., Лутцева Е. А. Алгоритм распознавания вистлеров в частотно-временных спектрах радиосигналов ОНЧ-диапазона // *Информатика и системы управления*, 2025. Т. 84, № 2, С. 34-43 DOI: 10.22250/18142400\_2025\_84\_2\_34.
13. Malkin E. I., Shevtsov B. M., Cherneva N. V., Kazakov E. A., Lichtenberger J. High-Altitude Discharges and Whistlers of Volcanic Thunderstorms // *Atmosphere*, 2024. vol. 15, no. 12, 1503 DOI: 10.3390/atmos15121503.
14. Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений*. М.: Техносфера, 2012.
15. Гектин Ю. М., Зайцев А. А. Разработка и применение модифицированного алгоритма медианной фильтрации при бортовой коррекции изображений дистанционного зондирования // *Труды МФТИ*, 2014. Т. 6, № 4, С. 103-106.
16. Марпл С. Л. *Цифровой спектральный анализ и его приложения*. М.: Мир, 1990.

## References


- [1] Storey L. R. O. An investigation of whistling atmospherics, *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, 1953, vol. 246, pp. 113–141.
- [2] Gershman B. N., Ugarov V. A. Propagation and generation of low-frequency electromagnetic waves in the upper atmosphere, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 1960, vol. LXXII, no. 2, pp. 235–270. (In Russian).
- [3] Carpenter D. L. Remote sensing of magnetospheric plasma by means of whistler mode signals // *Rev. Geophys.*, 1988. vol. 26, pp. 535–549.
- [4] Collier A. B., Hughes A. R. W., Lichtenberger J., Steinbach P. Seasonal and diurnal variation of lightning activity over southern Africa and correlation with European whistler observations // *Annales Geophysicae*, 2006. vol. 24, pp. 529–542 DOI: 10.5194/angeo-24-529-2006
- [5] Collier A. B., Delport B., Hughes A. R. W., Lichtenberger J., Steinbach P., Öster J., Rodger C. J. Correlation between global lightning and whistlers observed at Tihany, Hungary // *J. Geophys. Res.*, 2009. vol. 114, 07210 DOI: 10.1029/10.1029/2008JA013863
- [6] Cherneva N. V., Holzworth R. H., Ivanov A. V., Druzhin G. I., Mel'nikov A. N. Prospects of using the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) for determining volcanic ash eruptions in Kamchatka, In: *Problems of complex geophysical monitoring of the Russian Far East, Proceedings of the Third Scientific and Technical Conference*, Obninsk: GS RAN, 2011, pp. 415–419. (In Russian).
- [7] Sivokon' V. P., Kubyshkin A. V., Bogdanov V. V. et al. Whistlers as possible indicators of active effects on the ionosphere, *Trudy MFTI*, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 174–179. (In Russian).
- [8] [Plasmon Research Group] Automatic Whistler Detector and Analyzer System, Eötvös Loránd University. <http://plasmon.elte.hu/>
- [9] Lichtenberger J., Ferencz C., Hamar D., Steinbach P., Rodger C. J., Collier A. B. Automatic Whistler Detector and Analyzer system: Automatic Whistler Detector // *J. Geophys. Res.*, 2008. vol. 113, no. 12 DOI: 10.1029/2008JA013467
- [10] Agranat I. V., Cherneva N. V. Automatic detection of whistlers and their comparison with thunderstorm activity, In: *Prirodnaya sreda Kamchatki, Materials of the XI Regional Youth Scientific Conference*, April 16, 2012, Petropavlovsk-Kamchatsky, 2012, pp. 89–100. (In Russian).
- [11] Lichtenberger J. A new whistler inversion method, *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, no. A7. DOI: 10.1029/2008JA013799
- [12] Vodinchar G. M., Lutseva E. A. Algorithm for recognizing whistlers in frequency-time spectra of VLF radio signals, *Informatika i sistemy upravleniya*, 2025, vol. 84, no. 2, pp. 34–43. (In Russian DOI: 10.22250/18142400\_2025\_84\_2\_34).
- [13] Malkin E. I., Shevtsov B. M., Cherneva N. V., Kazakov E. A., Lichtenberger J. High-Altitude Discharges and Whistlers of Volcanic Thunderstorms, *Atmosphere*, 2024, vol. 15, no. 12. DOI: 10.3390/atmos15121503
- [14] Gonzalez R., Vuds R. *Cifrovaya obrabotka izobrazhenij* [Digital image processing], M.: Tekhnosfera, 2012. (In Russian).
- [15] Gektin Yu. M., Zaitsev A. A. Development and application of a modified median filtering algorithm for onboard correction of remote sensing images, *Trudy MFTI*, 2014, vol. 6, no. 4, pp. 103–106. (In Russian).
- [16] Marpl S. L. *Cifrovoj spektral'ny'j analiz i ego prilozheniya* [Digital spectral analysis and its applications], M.: Mir, 1990. (In Russian).

### Информация об авторах




*Лутцева Екатерина Александровна* ✉ – старший преподаватель, кафедра «Системы управления», Камчатский государственный технический университет, Петропавловск-Камчатский, Россия,  ORCID 0009-0003-6552-805X.




*Водинчар Глеб Михайлович* ✉ – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, лаборатория моделирования физических процессов, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия; доцент, кафедра «Системы управления», Камчатский государственный технический университет, Петропавловск-Камчатский, Россия,  ORCID 0000-0002-5516-1931.

### Information about the authors



*Lutseva Ekaterina Aleksandrovna* ✉ – Senior Lecturer, Control Systems Department, Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia,  ORCID 0009-0003-6552-805X.



*Vodinchar Gleb Mikhailovich* ✉ – PhD (Phys&Math), Docent, Leading Researcher, Laboratory of Physical Process Modeling, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia; Associate Professor, Control Systems Department, Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia,  ORCID 0000-0002-5516-1931.