

## Моделирование искусственных вистлеров в среде PyCharm

Л. С. Марченко<sup>1,2</sup>, Р. И. Паровик<sup>✉2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения  
Российской академии наук

683002, Россия, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Северо-Восточное шоссе, 30

<sup>2</sup>Институт космофизических исследований и распространения радиоволн  
Дальневосточного отделения Российской академии наук

684034, Россия, Камчатский край, Елизовский район, с. Паратунка, ул. Мирная, 7

**Аннотация.** В работе был предложен алгоритм компьютерного моделирования искусственного сигнала свистящего атмосферика (вистлера) на языке Python в среде PyCharm 2024.1. Алгоритм опирается на физическую и математическую модели распространения вистлера. С помощью предложенного алгоритма можно моделировать частоту вистлера в зависимости от длительности сигнала, коэффициента дисперсии и частоты дискретизации. В алгоритме реализована возможность построения амплитудной характеристики сигнала, а также его спектрограммы. Модель искусственного сигнала вистлера может быть использована при разработке методики распознавания вистлера в режиме реального времени.

**Ключевые слова:** вистлер, математическая модель, коэффициент дисперсии, частота, модель сигнала, спектрограмма, Python, PyCharm

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Storey L. R. O. An investigation of whistling atmospherics // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1953. Vol. 246. No. 908. Pp. 113–141.

2. Гериман Б. Н., Коробков Ю. С. К теории распространения свистящих атмосфериков // Известия вузов. Серия Радиофизика. 1958. Т. 1. № 2. С. 51–58.

3. Гериман Б. Н., Угаров В. А. Распространение и генерация низкочастотных электромагнитных волн в верхней атмосфере // Успехи физических наук. 1960. Т. 72. № 2. С. 235–271.

4. Lichtenberger J., Ferencz C., Bodnár L. et al. Automatic whistler detector and analyzer system: Automatic whistler detector // Geophys. Res. 2008. Vol. 113.

5. Koronczay D., Lichtenberger J., Clilverd M. A. et al. The source regions of whistlers // Journal of Geophysical Research: Space-Physics, 2019. Vol. 124, Pp. 5082–5096.

6. Li W., Shen X.-C., Menietti J. D. et al. Global distribution of whistler mode waves in Jovian inner magnetosphere // Geophysical Research Letters. 2020. Vol. 47. No. 15. DOI: 10.1029/2020GL088198

7. Morris P.J., Bohdan A., Weidl M. S. et al. Pre-acceleration in the electron foreshock. II. oblique whistler waves // The Astrophysical Journal. 2023. Vol. 944. No. 1. Id. 13. 12 p. DOI: 10.3847/1538-4357/acaec8

8. Sonwalkar V. S., Reddy A. Specularly reflected whistler: A low-latitude channel to couple lightning energy to the magnetosphere // Science Advances. 2024. Vol. 10. No. 33. eado2657. DOI: 10.1126/sciadv.ado2657

9. Чернева Н. В., Водинчар Г. М., Сивоконь В. П. и др. Корреляционный анализ потоков свистящих атмосфериков и грозových разрядов // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2013. Т. 7. № 2. С. 59–67. DOI: 10.18454/2079-6641-2013-7-2-59-67
10. Сивоконь В. П., Богданов В. В., Дружин Г. И. и др. Модуляция вистлеров // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54. № 6. С. 851–851. DOI: 10.7868/S0016794014060182
11. Малыш Е. А. Алгоритм для автоматического распознавания свистящих атмосфериков в режиме реального времени // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2015. № 2(11). С. 82–87. DOI: 10.18454/2079-6641-2015-11-2-82-87
12. Кичигин Г. Н. Структура нелинейных вистлеров, движущихся в плазме под углом к магнитному полю // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4. № 1. С. 28–32. DOI: 10.12737/szf-41201803
13. Малкин Е. И., Казаков Е. А., Санников Д. В. и др. Статистическая связь между вистлерами и спрайтами по данным AWDANET и WWLLN // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2022. Т. 41. № 4. С. 178–190. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-178-190
14. Аксенов А. П. Дифференциальные уравнения в 2 ч. I часть. М.: Юрайт, 2021. 241 с.
15. Bruce M. Van Horn II, Nguyen Q. Hands-on application development with PyCharm: Build applications like a Pro with the ultimate Python development tool. Packt Publishing Ltd.: Birmingham. UK, 2023.
16. Shaw Z. A. Learn Python the hard way. Addison-Wesley Professional, 2024. 352 p.

### **Информация об авторах**

**Марченко Людмила Сергеевна**, ведущий специалист ученого секретариата, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН; 684034, Россия, Камчатский край, Елизовский район, с. Паратунка, ул. Мирная, 7; аспирант, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук; 683002, Россия, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Северо-Восточное шоссе, 30; marchenko@ikir.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3634-2443>, SPIN-код: 8988-7994

**Паровик Роман Иванович**, д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор ДВО РАН, вед. науч. сотр. лаборатории моделирования физических процессов, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН; 684034, Россия, Камчатский край, Елизовский район, с. Паратунка, ул. Мирная, 7; parovik@ikir.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1576-1860>, SPIN-код: 4295-6894