

УДК 537.874

Научная статья

## Статистическая связь между вистлерами и спрайтами по данным AWDANET и WWLLN


*Е. И. Малкин, Е. А. Казаков, Д. В. Санников, Н. В. Чернева, Л. С. Марченко, Г. И. Дружин*

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, с.Паратунка, Елизовский район, Камчатский край, Российская Федерация

E-mail: Malkin@ikir.ru


По данным международной сети автоматического обнаружения вистлеров AWDANET, глобальной сети регистрации импульсных грозовых разрядов WWLLN и ОНЧ-пеленгатора ИКИР ДВО РАН проведён статистический анализ с целью обнаружения источников генерации вистлеров. Из базы данных WWLLN были отобраны пары разрядов с временным интервалом следования менее 100 мс и расстоянием между ними менее 40 км. Полученный временной ряд показал высокую степень корреляции с временным рядом зарегистрированных вистлеров в данных AWDANET.

*Ключевые слова: грозовой разряд, вистлер, спрайт, ионосфера.*

 DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-178-190

Поступила в редакцию: 06.12.2022

В окончательном варианте: 07.12.2022

Для цитирования. Малкин Е. И., Казаков Е. А., Санников Д. В., Чернева Н. В., Марченко Л. С., Дружин Г. И. Статистическая связь между вистлерами и спрайтами по данным AWDANET и WWLLN // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2022. Т. 41. № 4. С. 178-190.  DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-178-190

Контент публикуется на условиях лицензии *Creative Commons Attribution 4.0 International* (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Малкин Е. И. и др., 2022

## Введение

Основным природным источником импульсного излучения в диапазоне очень низких частот (30 Гц-30 кГц) являются грозовые разряды. Эти радиоимпульсы распространяются на большие расстояния с малым затуханием в волноводе Земля-ионосфера и носят устоявшееся название атмосферерики. Также возможно проникновение атмосферериков в ионосферу и магнитосферу. Согласно [8], в результате распространения через ионосферу и магнитосферный канал электромагнитное излучение претерпевает частотную дисперсию: сначала приходят высокочастотные

**Финансирование.** Исследования выполнены в рамках государственного задания ИКИР ДВО РАН по теме АААА-А21-121011290003-0

составляющие сигнала, затем, с нарастающим запаздыванием, более низкие частоты. Такие сигналы называются вистлеры (свистящие атмосферники, свисты).

Возможность обнаружения вистлера в волноводе Земля–ионосфера сильно зависит от напряженности поля импульсного радиосигнала иницирующего разряда в точке инжекции ионосферной волны. При этом путь распространения вистлера в волноводе может составлять до 2500 км [3]. Это было подтверждено на основе наблюдения вистлеров в Данидине, Новая Зеландия [2]. Интерес к наблюдению за вистлерами в Данидине вызван также тем, что грозы достаточно редкие, а вистлеры появляются в относительно большом количестве. Одной из причин возникновения этого эффекта является вулканическая деятельность. Сопоставление рядов данных регистрации вистлеров и вулканических молний при извержениях вулканов Окмок (12 июля 2008), Касаточи (7 августа 2008), Редут (26 марта 2009) показали их высокую корреляцию [1].

Изучение механизма распространения вистлеров актуально для получения новых, более точных сведений о параметрах плазмосферы планеты. Являясь связующим звеном между солнечной активностью и процессами, происходящими в атмосфере, механизм помогает нам прогнозировать разрушительные явления космической погоды [3]. Также вистлеры используют в качестве индикатора активных воздействий на ионосферу [11]. Детектирование вистлеров и определение их параметров в глобальном масштабе осуществляется сетью мониторинга AWDANet [5].

Известно, что разряды молний и вистлеры связаны причинно-следственной связью. Вистлеры, зарегистрированные в определенной точке на поверхности Земли, иницируются молниевыми разрядами в магнито-сопряженном регионе [4]. Существование других атмосферных явлений, помимо обычных грозовых разрядов, было предсказано еще в 1925 году Чарльзом Вильсоном. Одним из таких явлений является спрайт [12]. Спрайты, как класс самостоятельных грозовых разрядов, был открыт относительно недавно. В 1989 в рамках программы «SKYFLASH», осуществляемой в Университете Миннесоты, при помощи высокочувствительных видеокамер были получены первые документальные подтверждения их существования. Пространственные характеристики спрайтов поражают воображение, горизонтальный размер лежит в диапазоне от нескольких километров до 50 км. Вертикальные же размеры достигают значений в 90 км, с интенсивной областью свечения на высоте около 60–70 км. Так как концентрация кислорода на этой высоте незначительна, то за максимальную интенсивность излучения в спектре отвечает азот, что обуславливает красный цвет разряда в спрайте. Фотометрические измерения показывают, что длительность свечения спрайтов составляет порядка 3 мс и возникает спрайт в основном после иницирующего удара положительной молнии облако-земля (Cloud-Ground – CG) [6]. Так как разряд спрайта происходит непосредственно возле нижней границы ионосферы, то вероятность инициировать вистлер должна быть выше, чем у остальных типов грозовых разрядов.

## Атмосферика иницированные спрайтами

Примерно 20% положительных разрядов облако-земля (CG) вызывают спрайты [4]. Время задержки между иницирующими разрядами и спрайтами достигает 70 мс, а расстояние – до 40 км. В работе [4], отмечено, что в паре положительных разрядов облако-земля второй разряд в 96% случаев является спрайтом. Исходя из этих утверждений, в данных WWLLN можно выделить парные разряды, соответствующие критериям, описанным выше. Можно утверждать, что этот разряд является иницирующим разрядом с последующим спрайтом. Для проверки истинности последнего утверждения был проведен анализ парных разрядов, выделенных в базе данных WWLLN и импульсов, зарегистрированных комплексом ОНЧ-пеленгатора ИКИР ДВО РАН [10]. Критерием отбора парных событий по базе данных WWLLN являлась удалённость грозовых разрядов от местоположения ОНЧ-пеленгатора, которая не должна превышать 1000 км. Временной интервал, за который проводилось сравнение, составил 6 лет – с 01.01.2015 по 31.12.2021 гг. За весь период сравнения было отобрано 27511 парных разрядов, 82% (22519) из которых представляют собой пары положительных разрядов (+CG, +CG). Пример электрической составляющей сигнала таких пар, зарегистрированных ОНЧ-пеленгатором, приведен на рис. 1.

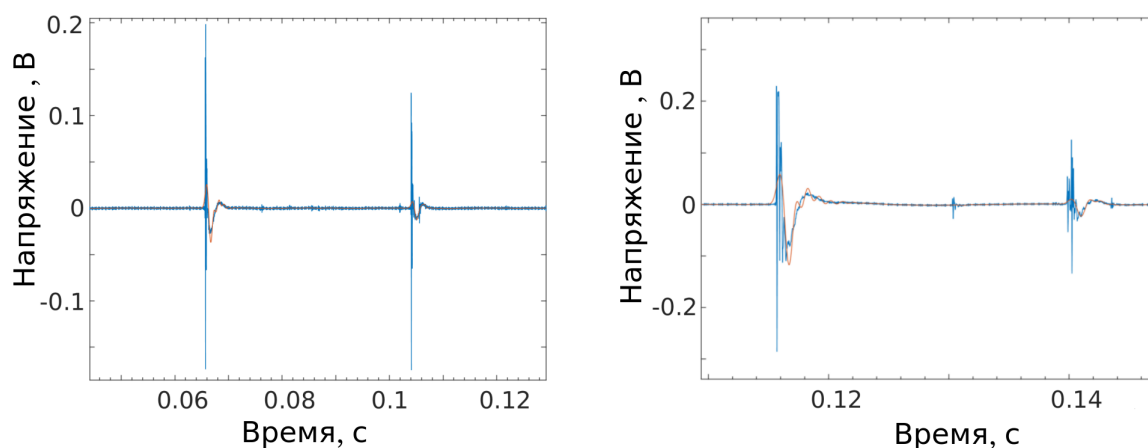


Рис. 1. Примеры парных разрядов, отобранных из базы данных WWLLN и зарегистрированных ОНЧ-пеленгатором.

[Figure 1. Examples of doubles selected from the WWLLN database and recorded by the VLF direction finder.]

Интересен факт того, что парные отрицательные разряды (-CG, -CG) наблюдались лишь в 7% случаев, а пары отрицательный разряд – положительный разряд (-CG, +CG) в в 9%. Пары положительный разряд – отрицательный разряд (+CG, -CG) не наблюдались. Примерно в 2% случаев на выходе ОНЧ-пеленгатора отсутствовали какие-либо разряды атмосфериков, или был лишь один. Исходя из проведенного анализа можно утверждать, что парные разряды, отобранные из ба-

зы данных WWLLN и соответствующие критериям временной задержки до 70 мс, разнесенными в пространстве не более чем на 40 км, действительно являются парами положительных разрядов облако – земля (+CG) и спрайта (CI).

## Вистлеры и спрайты

Чтобы показать наличие статистической связи между вистлерами и спрайтами, были использованы данные, полученные на станциях Карымшина ( $53.0^{\circ}\text{N}$ ,  $158.7^{\circ}\text{E}$ ), за период с 14.07.2015 по 27.09.2021 гг. и Данидин ( $45.7^{\circ}\text{S}$ ,  $170.5^{\circ}\text{E}$ ), за период с 01.01.2017 по 31.12.2020 гг. Станции входят в состав сети AWDANET. Параметры грозовой активности были взяты из базы данных местоположения грозových разрядов глобальной сети WWLLN. На станции Карымшина за анализируемый период всего было зарегистрировано  $1.3 \cdot 10^6$  вистлера, а количество грозových разрядов, произошедших за данный период, составило  $1,28 \cdot 10^9$ , из которых критериям парных разрядов удовлетворяло  $2,8 \cdot 10^8$ . На станции Данидин: зарегистрировано  $2.8 \cdot 10^6$  вистлеров; общее количество разрядов за период  $8.4 \cdot 10^8$ , парных разрядов  $1.9 \cdot 10^8$ .

Проиллюстрировать связь между вистлерами и грозowymi разрядами можно, построив распределение времён задержек. Эта связь вычисляется как разность между временем регистрации вистлера и временем происхождения грозového разряда. Если события не связаны, то распределение должно быть равномерным. На рис. 2 представлено полученное распределение, из которого видно наличие максимума  $\sim +1.1 \pm 0.2$  секунды, которое свидетельствует о том, что действительно вистлеры связаны с атмосфериками причинных молний. Отметив на карте все местоположения зарегистрированных молний, вошедшие в распределение, получим, что данные молнии распределены по всей Земле, но очевидна определённая структура их поверхностной плотности (рис. 3).

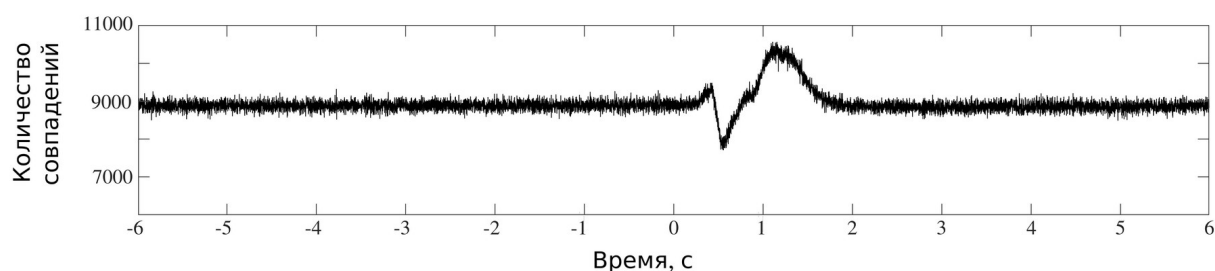


Рис. 2. Распределение количества совпадений от времени задержки между моментами регистрации вистлеров и моментами происхождением грозových разрядов. Ряд центрирован относительно времени регистрации вистлеров.

[Figure 2. The distribution of the number of coincidences from the delay time between the moments of whistler registration and the moments of the origin of lightning discharges. The series is centered relative to the time of whistler registration.]

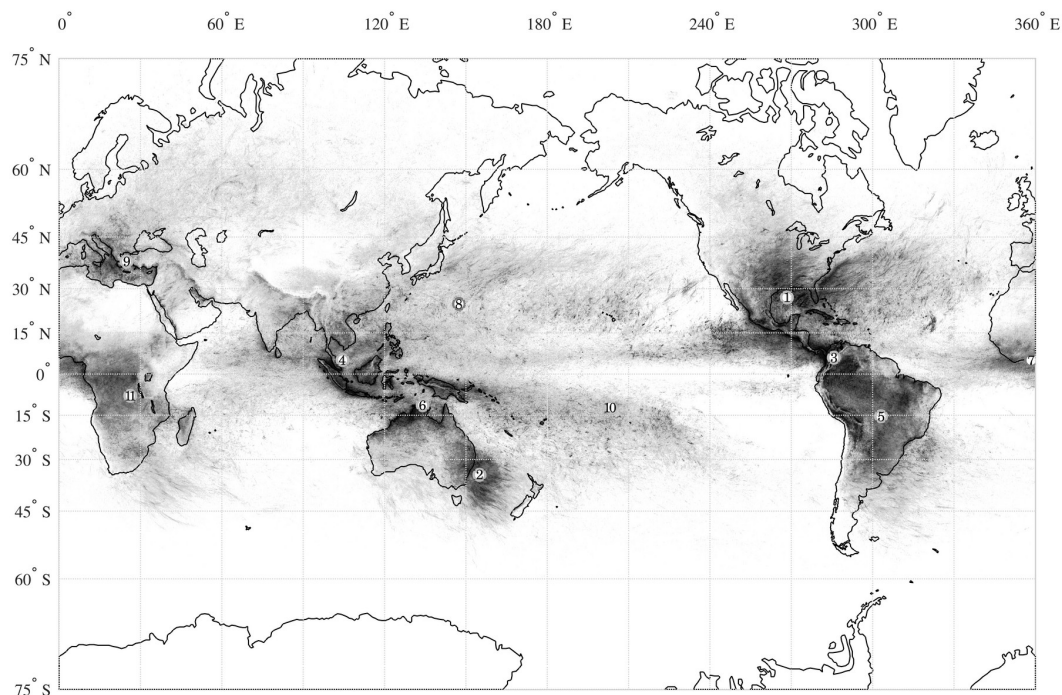


Рис. 3. Карта распределения плотности грозовых разрядов с обозначенными цифрами центрами кластеров, вошедших в максимум распределения, показанного на рис. 2.

[Figure 3. The distribution map of the density of lightning discharges with the centers of clusters, included in the maximum of the distribution shown in Fig. 2, indicated by numbers.]

Исходя из очевидной структуры плотности распределения грозовых разрядов, представленном на рис. 3 можно объединить все местоположения зарегистрированных молний в 11 четко различимых кластеров. Используя метод кластеризации к-средних (выбрана самая удачная симуляция с наименьшей суммой расстояний), получим центры регионов возможных источников вистлеров. Для того, чтобы однозначно выделить регион источников вистлеров, было вычислено распределение времён задержек для отдельно взятых регионов, показанных на рис. 4. Номера графиков совпадают с номерами центров регионов на рис. 3.

Из рис. 4 видно, что явный максимум в распределении сохранился только в случае региона 2, который совпадает с магнито-сопряженным регионом для станции Карымшина. Таким образом, мы повторили результат, опубликованный в работе [4]. Все дальнейшие выборки инициирующих разрядов молний мы ограничим только магнито-сопряженным регионом.

Относительно механизма образования вистлера. Принято считать, что мощный разряд молнии создаёт широкополосный импульс, способный проникнуть через ионосферу в магнитосферу, где вследствие своего распространения по магнитосферному каналу, диспергируя, переходит в вистлер [8].

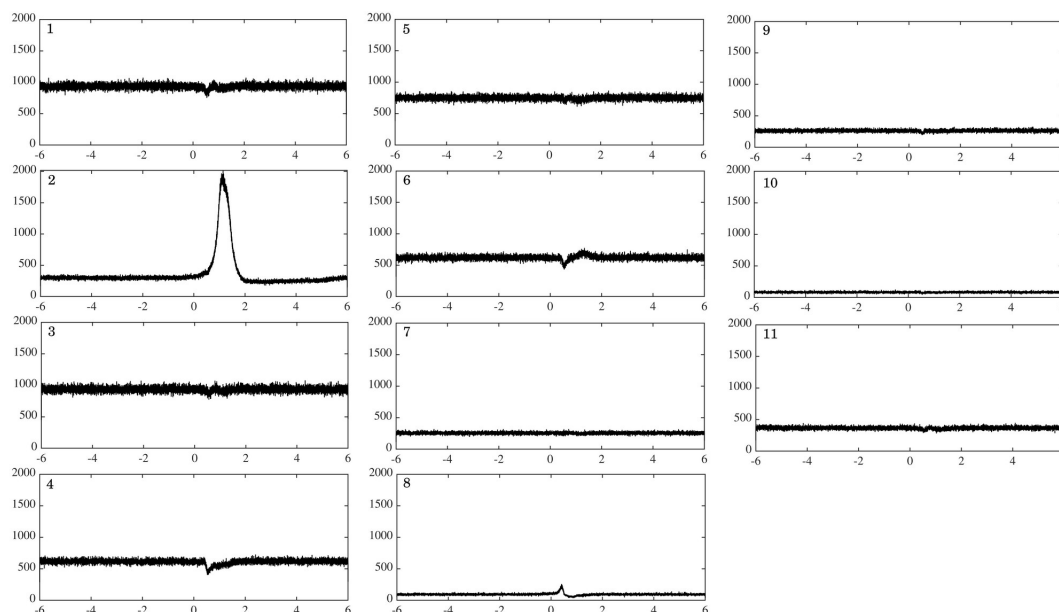


Рис. 4. Распределение количества совпадений от времени задержки между моментами регистрации вистлеров и моментами происхождением грозовых разрядов, произошедших в регионах с удалением от его центра не более 1400 км. Номера графиков соответствуют номерам центров регионов, показанных на рис.3.

[Figure 4. The distribution of the number of coincidences from the delay time between the moments of whistler registration and the moments of the origin of lightning discharges that occurred in regions with a distance of no more than 1400 km from its center. The numbers of the graphs correspond to the numbers of the centers of the regions shown in Fig.3.]

Возбуждение вистлера электромагнитной волной – один из двух очевидных механизмов, второй механизм состоит в непосредственном изменении электронной плотности у основания магнитосферного канала. Данный механизм вполне может осуществляться в результате удара грозового разряда в основание магнитосферного канала. Спрайты, являясь разрядами, протекающими между верхней кромкой грозового облака и нижней границей ионосферы, нейтрализуют избыточный отрицательный заряд грозового облака [9]. При этом атмосферик, порождённый спрайтом, имеет положительный КНЧ импульс (рис.1).

Как было показано выше, существует четкий маркер определения спрайта в данных WWLLN. Исходя из этого было проведено сравнение двух распределений времён задержек:

- между временем регистрации вистлеров и временем регистрации спрайтов (вторых разрядов в паре);
- между моментами регистрации вистлеров и моментами регистрации всех разрядов, исключая спрайты.

Оба распределения показаны на рис. 5.

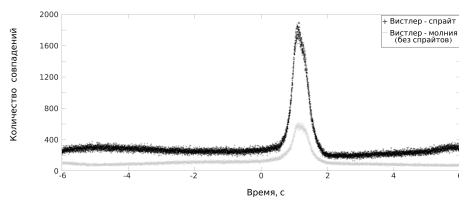


Рис. 5. Распределение времён задержек : + между моментами регистрации вистлеров и моментами регистрации спрайтов; – между моментами регистрации вистлеров и моментами регистрации всех разрядов исключая спрайты.

[Figure 5. Distribution of delay times: + between the moments of registration of whistlers and the moments of registration of sprites; – between the moments of registration of whistlers and the moments of registration of all discharges, excluding sprites.]

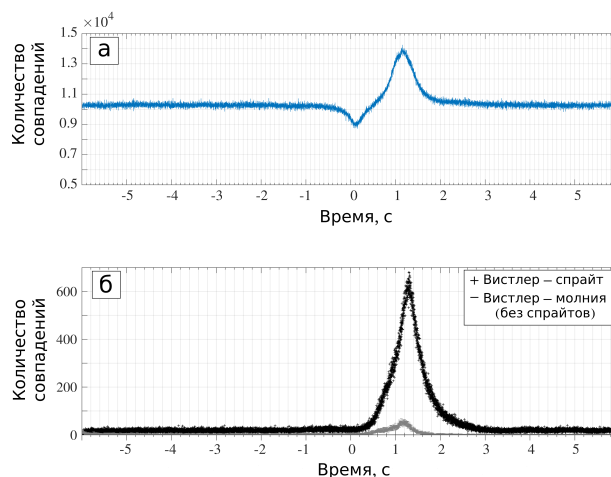


Рис. 6. а) Распределение времён задержек между моментами регистрации вистлеров и моментами происхождением грозовых разрядов. Ряд центрирован относительно времени регистрации вистлеров (Данидин); б) Распределение времён задержек : + между моментами регистрации вистлеров и моментами регистрации спрайтов; – между моментами регистрации вистлеров и моментами регистрации всех разрядов исключая спрайты (Данидин).

[Figure 6. a) Distribution of delay times between the moments of whistler registration and the moments of origin of lightning discharges. The series is centered relative to the time of whistler registration (Dunedin); b) Distribution of delay times: + between the moments of registration of whistlers and the moments of registration of sprites; – between the moments of registration of whistlers and the moments of registration of all discharges, excluding Dunedin sprites]

Сопоставляя распределения задержек времен, построенное с учетом всех разрядов (рис. 4(2)) и полученное с учетом только спрайтов (рис. 5), произошедших в

магнито – сопряженном регионе, получим, что отличие составляет менее чем 10% по абсолютным значениям.

Второе распределение, представленное рис. 6, построено без учета спрайтов (вторых разрядов в парах) – это подтверждает предположение, что именно вторые разряды парных молний являются причиной возникновения вистлеров. Соответственно, исходя из работ [4, 6, 7] можно с высокой степенью уверенности говорить, что спрайты являются источниками вистлеров.

Нами были проделаны аналогичные вычисления для данных AWDANET, полученных в пункте наблюдения Dunedin (45.7°S, 170.5°E). Результат показан на рис. 6б, где распределение временных задержек более ярко демонстрирует утверждение, что именно вторые разряды парных молний являются источниками вистлеров.

## Заключение

Проведён статистический анализ с целью обнаружения источников генерации вистлеров по данным международной сети автоматического обнаружения вистлеров AWDANET, глобальной сети регистрации импульсных грозовых разрядов WWLLN и ОНЧ-пеленгатора ИКИР ДВО РАН. В результате проведенной работы получено:

- распределение количества совпадений от времени задержки между моментами регистрации вистлеров и моментами происхождением грозовых разрядов для станций Карымшина и Данидин;
- распределение количества совпадений от времени задержки между моментами регистрации вистлеров и моментами регистрации спрайтов для станций Карымшина и Данидин;

Проведен сравнительный анализ построенных распределений для всех разрядов, произошедших в магнито-сопряженном регионе, а также с учетом только разрядов, связанных со спрайтами. Который показал, что существует статистическая связь между двумя явлениями, а именно, что спрайты порождают вистлеры.

**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.


## Список литературы

1. Antel C., Collier A. B., Lichtenberger J., Rodger C. J. Investigating Dunedin whistlers using volcanic lightning., *Geophysical Research Letters*, 2014. vol. 41(13), pp. 4420–4426 DOI: 10.1002/2014GL060332.
2. Collier A. B., et. al. Global lightning distribution and whistlers observed at Dunedin, New Zealand, *Ann. Geophys.*, 2010. vol. 28, pp. 499–513 DOI: 110.5194/angeo-28-499-2010.
3. Holzworth R. H., et. al. Lightning whistler waves in the high-latitude magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 1999. vol. 104(A8), pp. 17369–17378 DOI: 10.1029/1999JA900160.




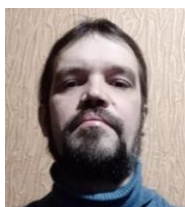
4. Koroncay, et. al The source regions of whistlers, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019. vol. 124, pp. 5082–5096, DOI: 10.1029/2019JA026559.
5. Lichtenberger J., et. al Automatic whistler detector and analyzer system: Automatic whistler detector, *Geophys. Res.*, 2008. vol. 113 DOI: 10.1029/2008JA013467.
6. Lyons W. A. Sprite observations above the U.S. High Plains in relation to their parent thunderstorm systems, *Geophys. Res.*, 1996. vol. 101.
7. Reising S. C., Inan U. S., Bell T. F. ELF sferic energy as a proxy indicator for sprite occurrence, *Geophys. Res. Lett.*, 1996. vol. 26(7), pp. 987-990 DOI: 10.1029/1999GL900123.
8. Storey L. R. O. An investigation of whistling atmospheric, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1953. vol. 246, no. 908, pp. 113–141 DOI: 10.1098/rsta.1953.0011.
9. Winkler J. R. The cloud–ionosphere discharge: A newly observed thunderstorm phenomenon, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1997. vol. 94, pp. 10512–10519.
10. Дружин Г. И., Пухов В. М., Санников Д. В., Малкин Е. И. ОНЧ-пеленгатор грозových разрядов, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2019. Т. 27(2), С. 95–104 DOI: 10.26117/2079-6641-2019-27-2-95-104.
11. Сивоконь В. П., et. al. Амплитудная модуляция вистлеров, *Оптика атмосферы и океана*, 2014. Т. 27(2), С. 167–172.
12. Щербаков Р. Н. "Неброский, но усердный гений". К 150-летию со дня рождения Чарльза Вильсона, *Вестник Российской академии наук*, 2019. Т. 89 (6), С. 629–636 DOI: 10.31857/S0869-5873896629-636.




*Малкин Евгений Ильич* ✉ – младший научный сотрудник лаборатории электромагнитных излучений института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0001-8037-1335.




*Казakov Евгений Анатольевич* ✉ – ведущий программист лаборатории электромагнитных излучений института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0001-7235-4148.




*Санников Дмитрий Викторович* ✉ – ведущий инженер лаборатории электромагнитных излучений института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0002-1369-9522.




*Чернева Нина Володаровна* ✉ – кандидат физико-математических наук, ученый секретарь, ведущий научный сотрудник лаборатории электромагнитных излучений института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0002-6440-7569.



*Марченко Людмила Сергеевна* ✉ – ведущий специалист учёного секретариат института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0003-3634-2443.



*Дружин Геннадий Иванович* ✉ – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электромагнитных излучений института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0002-1009-1044.

MSC 78A40

Research Article

## Statistical relationship between whistlers and sprites according to AWDANET and WWLLN data


*E. I. Malkin, E. A. Kazakov, D. V. Sannikov, N. V. Cherneva,  
L. S. Marchenko, G. I. Drugin*

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS  
684034, Paratunka, Russia

E-mail: Malkin@ikir.ru


According to the data of the international whistler detection network AWDANET, the global network for detecting pulsed lightning discharges WWLLN and the VLF direction finder of the IKIR FEB RAS, a statistical analysis was carried out to identify whistler sources. Pairs of discharges with a repetition time interval of less than 100 ms and a distance between them of less than 40 km were excluded from the WWLLN database. The resulting time series showed a high degree of correlation with the time series of registered whistlers in the AWDANET data.

*Key words: lightning discharge, whistler, sprite, ionosphere.*

 DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-178-190

Original article submitted: 06.12.2022

Revision submitted: 07.12.2022

**For citation.** Malkin E. I., Kazakov E. A., Sannikov D. V., Cherneva N. V., Marchenko L. S., Drugin G. I. Statistical relationship between whistlers and sprites according to AWDANET and WWLLN data. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2022, 41: 4, 178-190.  DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-178-190

**Competing interests.** The authors declare that 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.

*The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)*

© Malkin E. I. et. al., 2022

## References


- [1] Antel C., Collier A. B., Lichtenberger J., Rodger C. J. Investigating Dunedin whistlers using volcanic lightning, *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(13), 4420–4426 DOI: 10.1002/2014GL060332.

---


**Funding.** The research was carried out within the framework of the state task of IKIR FEB RAS on the topic AAAA-A21-121011290003-0

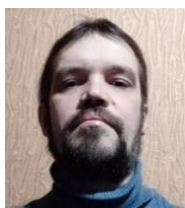
- [2] Collier A. B., et. al. Global lightning distribution and whistlers observed at Dunedin, New Zealand, *Ann. Geophys*, 2010, 28, 499–513 DOI: 10.5194/angeo-28-499-2010.
- [3] Holzworth R. H., Winglee R. M., Barnum B. H., Li Y., Kelley M. C. Lightning whistler waves in the high-latitude magnetosphere // *J. Geophys. Res.*, 1999, 104(A8), 17369–17378, DOI: 10.1029/1999JA900160.
- [4] Koronczay, et al. The source regions of whistlers, *Journal of Geophysical Research: SpacePhysics*, 2019, 124, 5082–5096, DOI: 10.1029/2019JA026559.
- [5] Lichtenberger J., Ferencz C., Bodnar L., Hamar D., Steinbach P. Automatic whistler detector and analyzer system: Automatic whistler detector, *Geophys. Res.*, 2008, 113, DOI:10.1029/2008JA013467.
- [6] Lyons W. A. Sprite observations above the U.S. High Plains in relation to their parent thunderstorm systems, *Geophys. Res.*, 1996, 101.
- [7] Reising S.C., Inan U.S., Bell T.F. ELF sferic energy as a proxy indicator for sprite occurrence, *Geophys. Res. Lett.*, 1996, 26(7), 987-990, DOI: 10.1029/1999GL900123.
- [8] Storey L. R. O. An investigation of whistling atmospherics, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1953, 246:908, 113–141. DOI: 10.1098/rsta.1953.0011
- [9] Winkler J. R. The cloud–ionosphere discharge: A newly observed thunderstorm phenomenon, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1997, 94, 10512–10519.
- [10] Druzhin G. I., Pukhov V. M, Sannikov D. V., Malkin E. I. VLF lightning direction finder, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2019, 27: 2, 95-104. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-27-2-95-104 (In Russian).
- [11] Sivokon V. P., Cherneva N. V., Drugin G. I., Sannikov D. V. Amplitudnaya modulyaciya vistlerov [Whistler amplitude modulation], *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and ocean optics], 2014, 27:2, 167-172 (In Russian).
- [12] Shcherbakov R. N. "Nebroskij, no userdnyj genij". K 150-letiyu so dnya rozhdeniya CHarl'za Vil'sona ["Inconspicuous but diligent genius." To the 150th anniversary of the birth of Charles Wilson], *Vestnik Rossijskoj akademii nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2019, 89:6, 629-636 (In Russian).




*Malkin Evgeny Ilich* ✉ – junior researcher laboratory of electromagnetic propagation Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0001-8037-1335.




*Kazakov Evgeny Anatolevich* ✉ – lead programmer laboratory of electromagnetic propagation Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0001-7235-4148.




*Sannikov Dmitriy Victorovich*✉ – lead engineer laboratory of electromagnetic propagation Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0002-1369-9522.




*Cherneva Nina Volodarovna*✉ – PhD (Phys. & Math.), Scientific Secretary, Leading Researcher laboratory of electromagnetic propagation Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0002-6440-7569.



*Marchenko Ludmila Sergeevna*✉ – leading specialist of the scientific secretariat Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0003-3634-2443.



*Drugin Gennady Ivanovich*✉ – PhD (Phys. & Math.), Leading Researcher laboratory of electromagnetic propagation Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0002-1009-1044.