



## XXI.D.140 – Дистанционный метод определения источника свистящих атмосфериков

Малкин Е. И. (1), Казаков Е.А. (1), Чернева Н. В. (1), Чернева В.И. (2), Махлай Д.О. (2), Санников Д.В. (1), Lichtenberger J. (3,4), Koroncay D. (4)

(1) Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия

(2) Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (ИТМО), г. Санкт-Петербург, Россия

(3) Eötvös Loránd University, Budapest, Hungary (Будапешт, Венгрия)

(4) HUN-REN-ELTE Space Research Group, Budapest, Hungary (Будапешт, Венгрия)

**Цель работы** – анализ парных разрядов, выделенных в базе данных WWLLN и импульсов, зарегистрированных комплексом ОНЧ-пеленгатора ИКИР ДВО РАН с целью обнаружения статистической связи между вистлерами и спрайтами.

**Данные** по грозовой активности были взяты из базы данных местоположения грозовых разрядов глобальной сети WWLLN, для анализа вистлеров были использованы данные станций сети AWDANET, полученные на стационаре «р.Карымшина» (Karymshina) (53.0° N, 158.7°E) за период с 14.07.2015 по 27.09.2021 и Данидин (Dunedin) (45.7°S, 170.5°E) за период с 01.01.2017 по 31.12.2020.

### Анализ

Основным природным источником импульсного излучения в диапазоне очень низких частот (30 Гц - 30 кГц) являются грозовые разряды – атмосферерики. В результате распространения через ионосферу и магнитосферу [1], электромагнитное излучение претерпевает частотную дисперсию, в результате чего сначала регистрируются высокочастотные составляющие сигнала, а затем, с нарастающим запаздыванием – более низкие частоты. Диспергированный сигнал называется вистлером (whistler – свистящий атмосферик, свист). Дистанция распространения вистлера в волноводе Земля – ионосфера может составлять до 2500 км [2] и сильно зависит от напряженности поля молнии в точке инжекции ионосферной волны, что было подтверждено наблюдениями в Данидине, Новая Зеландия [3]. Разряды молний и вистлеры связаны причинно-следственной связью: вистлеры, зарегистрированные в определенной точке на поверхности Земли инициируются молниевыми разрядами в магнито-сопряженном регионе [4].

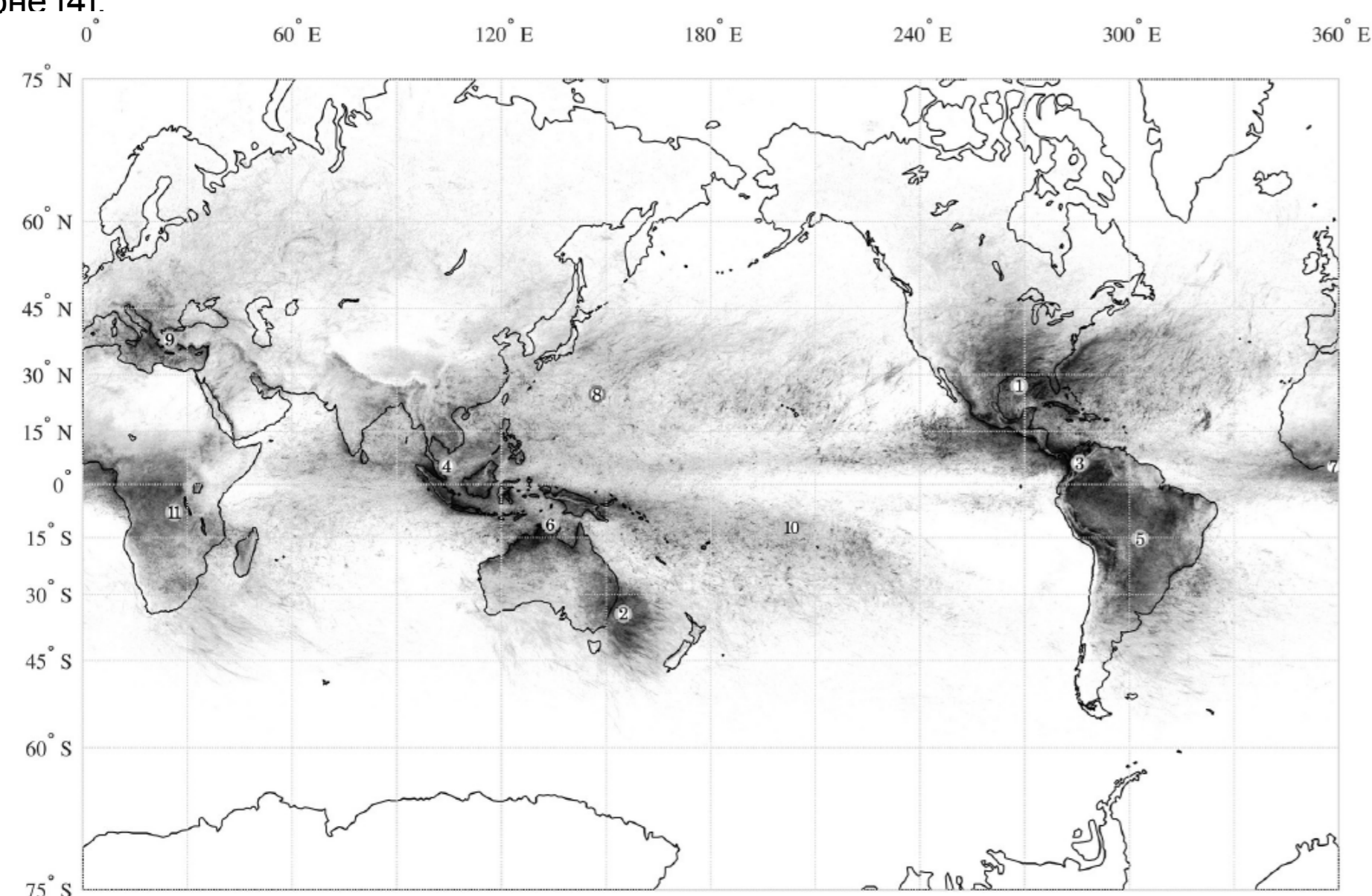


Рис. 1. Карта распределения плотности грозовых разрядов для станции «р.Карымшина» (Karymshina) с обозначенными цифрами центрами кластеров, вошедших в максимум распределения, показанного на рис.3.

На карте отмечены все местоположения зарегистрированных молний, вошедшие в шестилетний временной интервал, за который проводился анализ, с 01.01.2015 по 31.12.2021. Данные молнии распределены по всей Земле, но очевидна определенная структура их поверхностной плотности, по которой можно объединить все местоположения зарегистрированных молний в 11 четко различных кластеров. Используя метод кластеризации k-средних (выбрана самая удачная симуляция с наименьшей суммой расстояний), получены центры регионов возможных источников вистлеров. Для того, чтобы однозначно выделить регион источников вистлеров, было вычислено распределение времён задержек для отдельно взятых регионов, явный максимум в распределении сохранился только в случае региона 2, который совпал с магнито-сопряженным регионом для станции Карымшина (рис.3). Таким образом, мы повторили результат, опубликованный в работе [4]. Все дальнейшие выборки инициирующих разрядов молний были ограничены магнито-сопряженным регионом. После инициирующего удара положительной молнии облако-земля (Cloud-Ground) возникает спрайт (sprite – фея, молния ионосфера-облако +IC). Разряд спрайта происходит непосредственно возле нижней границы ионосферы, поэтому вероятность инициировать вистлер у него выше, чем у остальных типов грозовых разрядов. В работе [5] показано, что ~ 20% положительных разрядов облако-земля (+CG) вызывают спрайт. Время задержки между инициирующими разрядами и спрайтами не превышает 70 мс, а расстояние < 40 км и в паре положительных разрядов второй в 96% случаев является спрайтом. Чтобы показать наличие статистической связи между вистлерами и спрайтами по описанным выше критериям из данных WWLLN были выделены парные разряды (один из пары – инициирующий разряд, другой – спрайт) и проведён анализ парных разрядов и импульсов, зарегистрированных комплексом ОНЧ-пеленгатора ИКИР ДВО РАН [6]. Критерием отбора парных событий по данным WWLLN являлась удалённость от ОНЧ-пеленгатора, которая не должна превышать 1000 км. За весь период сравнения было отобрано 27511 парных разрядов, 82% из которых представляют собой пары положительных разрядов (+CG +IC). Пример таких пар приведен на рис. 2.

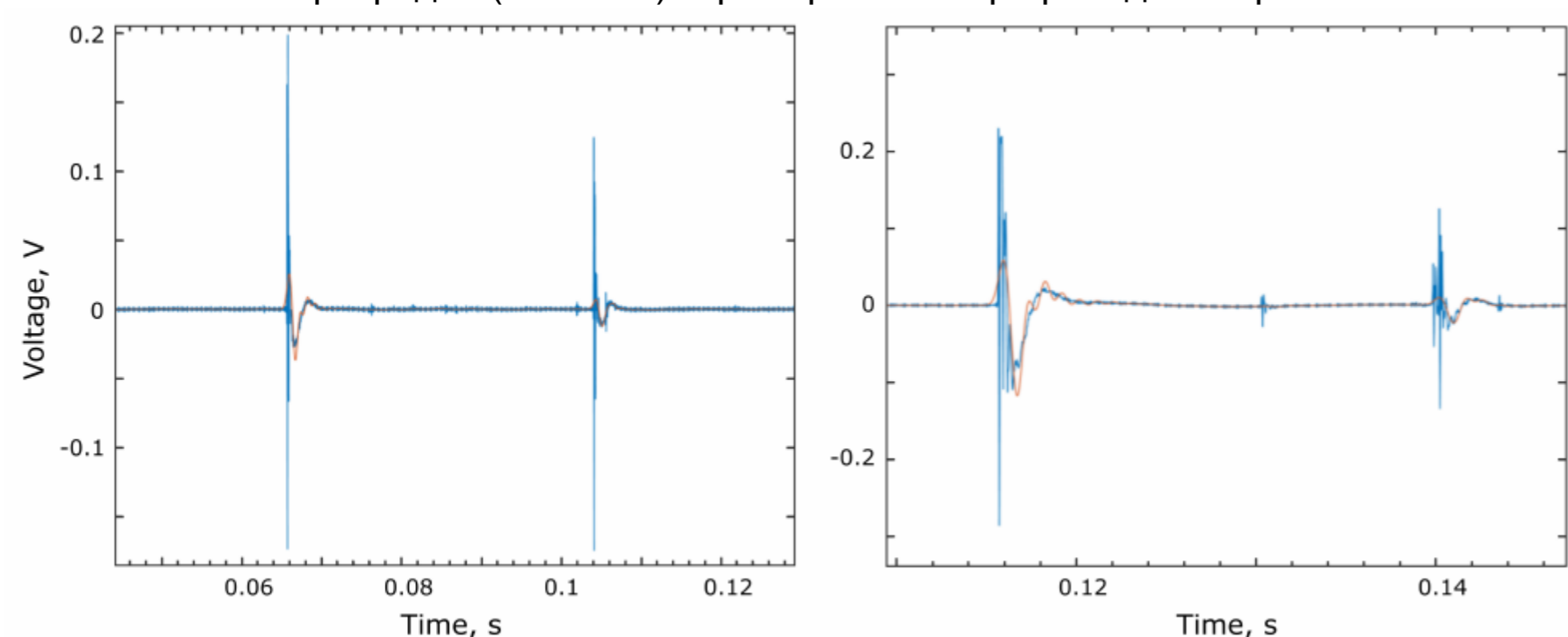


Рис.2. Примеры парных разрядов отобранных из базы данных WWLLN и зарегистрированных ОНЧ-пеленгатором ИКИР ДВО РАН

### Цитируемая литература

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. V. 246, № 908, P. 113-141, <https://doi.org/10.1098/rsta.1953.0011>.
2. Collier A. B., Bremner S., Lichtenberger J., Downs J. R., Rodger C. J., Steinbach P., McDowell G. Global lightning distribution and whistlers observed at Dunedin, New Zealand // J. Ann. Geophys., 2010. 28, 499-513, <https://doi.org/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. V. 104(A8), P. 17369-17378, <https://doi.org/10.1029/1999JA900160>.
4. Koroncay D., Lichtenberger J., Clilverd M. A., Rodger C. J., Lotz S.L., Sannikov D. V., et al. The source regions of whistlers // Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2019. V. 124, P.5082-5096. <https://doi.org/10.1029/2019JA026559>
5. Reising S. C., Inan U. S., Bell T. F. ELF spheric energy as a proxy indicator for sprite occurrence // Geophys. Res. Lett., 1996. T. 26(7), C. 987-990, <https://doi.org/10.1029/1999GL900123>.
6. Дружин Г. И., Пухов В. М., Санников Д. В., Малкин Е. И. ОНЧ-пеленгатор грозовых разрядов // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки, 2019. Т. 27(2), С. 95-104, <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2019-27-2-95-104>.
7. Winkler J. R. The cloud-ionosphere discharge: A newly observed thunderstorm phenomenon // Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1997. T. 94, C. 10512-10519.
8. Малкин Е.И., Казаков Е.А., Санников Д.В., Чернева Н.В., Марченко Л.С., Дружин Г. И. Связь между вистлерами и спрайтами по данным AWDANET и WWLLN // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. - 2022. - Т. 41. - No 4. С.178-190. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2022-41-4-178-190>



Двадцать первая международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

13 - 17 ноября 2023 г. в Москве,

Проиллюстрировать связь между вистлерами и грозовыми разрядами можно, построив распределение времён задержек, которое вычисляется как разность между временем регистрации вистлера и временем происхождения грозового разряда в магнито-сопряженной точке. Если события не связаны, то распределение должно быть равномерным. На станции «р.Карымшина» за анализируемый период было зафиксировано  $1,3 \cdot 10^6$  вистлера, а количество грозовых разрядов, произошедших за данный период составило  $1,28 \cdot 10^9$ , из них критериям парных разрядов удовлетворяло  $2,8 \cdot 10^8$ .

Наличие максимума  $\sim +1.1 \pm 0.2$  секунды, показанное на рис.3 говорит о том, что действительно вистлер связан с грозовым разрядом как следствие причинной молнии.

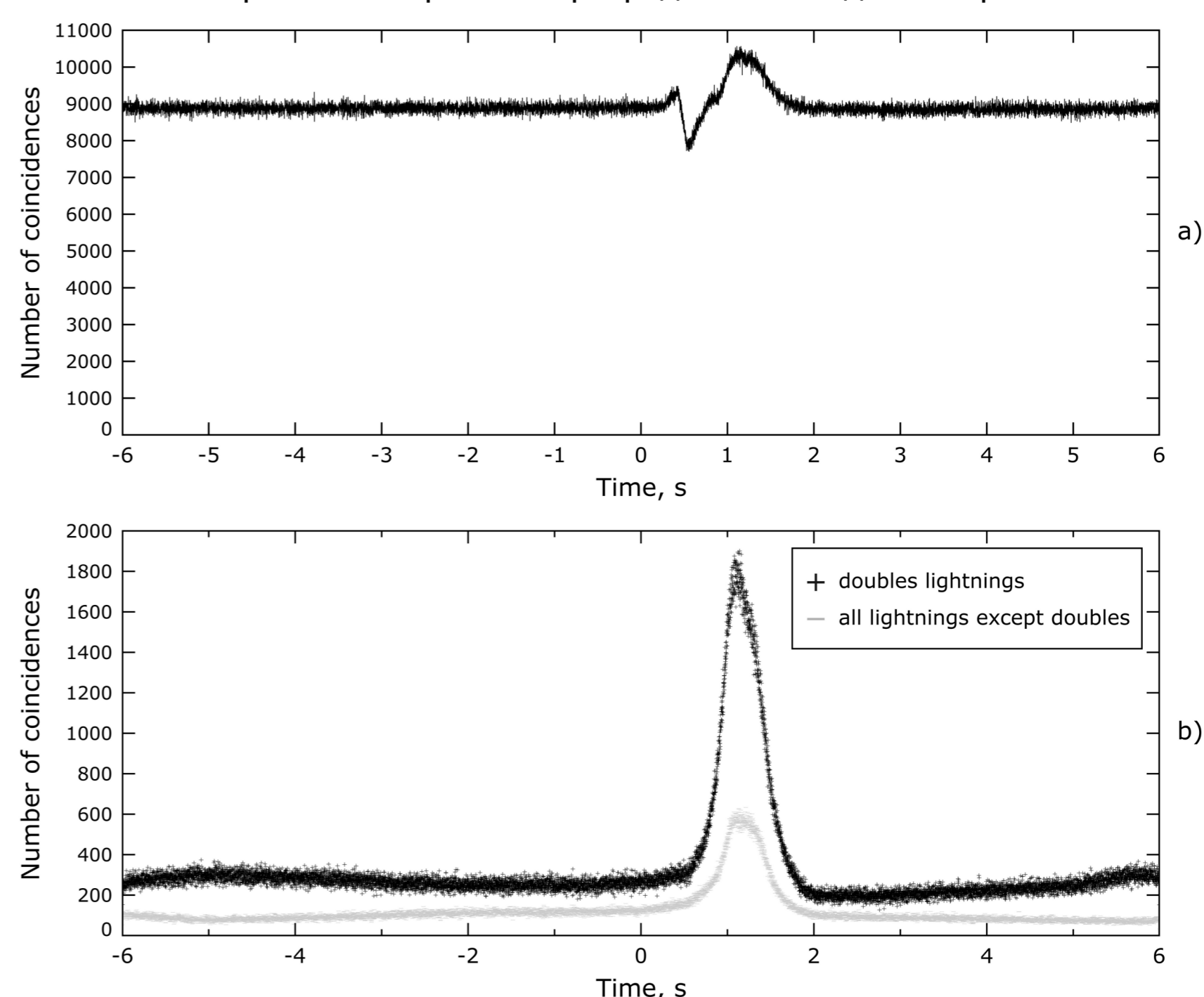


Рис. 3 – Распределение количества совпадений от времени задержки между моментами регистрации вистлеров и моментами происхождением грозовых разрядов. Ряд центрирован относительно времени регистрации вистлеров (a). Распределение времён задержек : + между моментами регистрации вистлеров и моментами регистрации спрайтов; – между моментами регистрации вистлеров и моментами регистрации всех разрядов исключая спрайты (Karymshina). Графики соответствуют номеру 2 из центров регионов грозовой активности, показанных на рис.1 (б).

Возбуждение вистлера электромагнитной волной – это 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 как раз и являются грозовыми разрядами, протекающими между верхней кромкой грозового облака и нижней границей ионосферы, при этом они переносят положительный заряд от ионосферы к грозовому облаку [7], так как регистрируемый атмосферик порождённый спрайтом имеет положительный КНЧ импульс (рис. 2).

Распределение задержек времен относительно времени регистрации вистлера, построенное с учетом всех разрядов произошедших в магнито – сопряженном регионе отличается менее чем на 10% по абсолютным значениям от распределения построенного с учетом только спрайтов. Второе распределение представлено на рис. 3, построено без учета спрайтов (вторых разрядов в парах), что подтверждает предположение что именно вторые разряды парных молний являются причиной возникновения вистлеров.

Соответственно, исходя из работ [4,5,7] можно с высокой степенью уверенности говорить, что именно спрайты являются источниками вистлеров.

Аналогичные вычисления были проделаны для данных AWDANET, полученных в пункте наблюдения Dunedin (рис.4) [8].

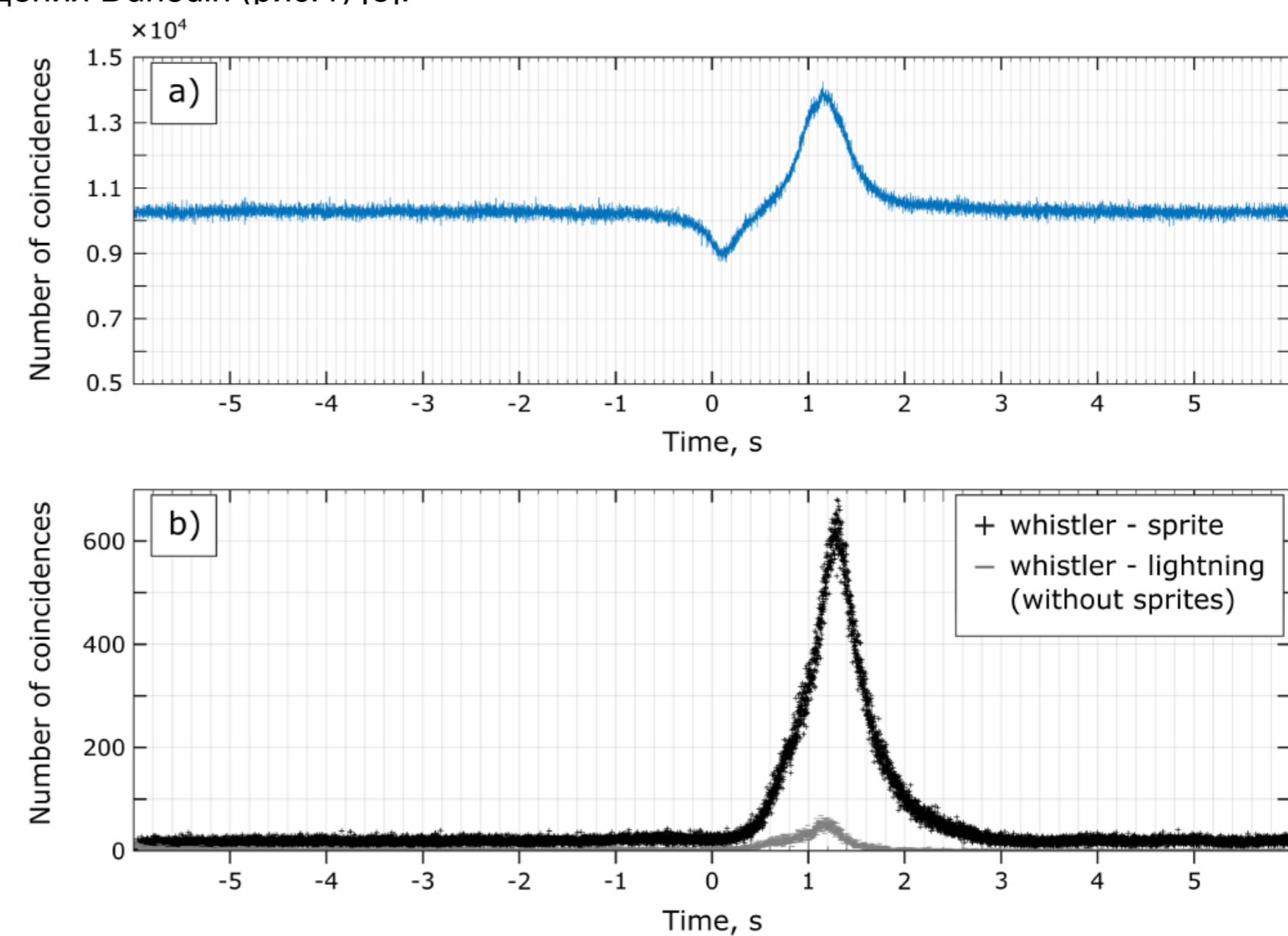


Рис. 4 – а) Распределение времён задержек между моментами регистрации вистлеров и моментами происхождением грозовых разрядов. Ряд центрирован относительно времени регистрации вистлеров (Dunedin). б) Распределение времён задержек : + между моментами регистрации вистлеров и моментами регистрации спрайтов; – между моментами регистрации вистлеров и моментами регистрации всех разрядов исключая спрайты (Dunedin)

**Таким образом, проведенные эксперименты показали взаимосвязь двух явлений, а именно, что спрайты порождают вистлеры. Исследования выполнены в рамках ГЗ по теме AAAA-A21-121011290003-0.**