

*В.И. Козлов, В.А. Муллаяров,  
Л.Д. Тарабукина, А.А. Торопов*

## ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ МЕЖДУ ОНЧ- И КНЧ-РАДИОИМПУЛЬСАМИ РАЗРЯДОВОЙ МОЛНИИ

Проведен анализ некоторых характеристик 180 ОНЧ- и соответствующих им КНЧ-сигналов, вызванных наземными разрядами и предположительно разрядами между облаком и нижними слоями ионосферы, проявляющихся в виде красных излучений – спрайтов. Получены значения длительности самого КНЧ-импульса (6-56 мс), а также запаздывания после сигнала молнии до появления соответствующего ему КНЧ-сигнала (до 7 мс). По данным анализа было получено наиболее вероятное значение задержки в 1-2 мс.

*Ключевые слова:* ОНЧ-радиосум, положительные разряды наземных молний, разряд «облако-ионосфера», спрайт, КНЧ-радиосигнал сферика молнии, атмосферик.

Проявление красного излучения на высоте 40-90 км над землей после наземного разряда молнии – спрайта является оптическим следствием разряда, происходящего в пространстве между облаком и нижними слоями ионосферы. Помимо спрайтов оптические явления от высотных разрядов, именуемые люминесцентными переходными событиями – Transient Luminous Events (TLE), представлены синими джетами, эльфами, гало и т.д. Все они классифицированы подобным образом из-за разной высоты появления, возможных свечений, длительности и т.д. Их изучение представляется весьма актуальным, так как такие высотные разряды играют большую роль в работе глобальной электрической цепи и химическом составе атмосферы. Ввиду редкого появления наиболее изученным из всех разновидностей TLE к данному моменту является спрайт.

Существует несколько теорий относительно появления высотных разрядов. В настоящее время наиболее согласованной с наблюдениями и условиями возникновения молний, и в частном случае спрайтов, гипотезой

является теория пробоя на убегающих электронах – явление лавинообразного размножения в веществе быстрых электронов [1]. Эта модель успешно пояснила необычные условия появления разрядов при недостаточной напряженности электрического поля, большой разности высот. Появление пробоя требует наличия затравочных частиц высоких энергий, которыми в природных условиях могут являться вторичные электроны космических лучей.

Считается, что высотные разряды возникают после положительного разряда «облако-земля». Теория пробоя на убегающих электронах имеет объяснение и для этой особенности. В квазистационарном состоянии поле на высоте возникновения спрайта практически отсутствует, но после положительного разряда на Землю (положительные молнии переносят заряд до 100 Кл) баланс нарушается. Таким образом, может возникнуть необходимое для пробоя поле. При этом оно направлено к Земле, и поэтому происходит ускорение электронов по направлению к ионосфере.

В начале 20 века было выдвинуто предположение об ускорении электронов до релятивистских энергий в поле грозового облака. Экспериментальное подтверждение генерации релятивистских частиц и квантов высокочастотного излучения в атмосфере, коррелирующих с грозовой активностью, стало возможно только недавно. Был выявлен аномальный рост интенсивности рентгеновского и гамма-излучения (на два-три порядка) в течение примерно минуты с максимумом спектра в области 50-60 кэВ. Наземные наблюдения обнаружили интенсивные вспышки рентгеновского излучения с энергией квантов в несколько сотен кэВ, появление которых коррелировало с формированием лидера молниевой вспышки и стреловидного лидера триггерной молнии. Также

---

*КОЗЛОВ Владимир Ильич* – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Института космофизических исследований и аэронауки СО РАН.

E-mail: v.kozlov@ikfia.ysn.ru,

*МУЛЛАЯРОВ Виктор Арсланович* – к.ф.-м.н., ст. научный сотрудник Института космофизических исследований и аэронауки СО РАН.

E-mail: mullayarov@ikfia.ysn.ru,

*ТАРАБУКИНА Лена Дмитриевна* – студентка ФТИ ЯГУ.

E-mail: taddy-9@mail.ru,

*ТОРОПОВ Анатолий Анатольевич* – мл. научный сотрудник Института космофизических исследований и аэронауки СО РАН.

E-mail: v.kozlov@ikfia.ysn.ru

были получены данные наблюдений всплесков гамма- (с энергией квантов порядка и более МэВ), рентгеновского и ультрафиолетового излучений атмосферного происхождения от спутников. Установлено, что гамма-всплески приходят с Земли из района наиболее интенсивного грозообразования. Теория генерации убегающих электронов и пробой на убегающих электронах дают пояснение и этой стороне явления спрайтов [1]. Энергичные кванты могут возникать в результате тормозного излучения быстрых электронов, взаимодействующих с молекулами воздуха. Как ожидалось в модельных расчетах, длительность наблюдаемых гамма-всплесков составляет несколько мс, и энергетический спектр соответствует спектру при пробое на убегающих электронах.

Известно, что грозовые разряды производят низкочастотное радиоизлучение, распространяющееся с малым затуханием в атмосферном волноводе «земля-ионосфера». На расстоянии порядка 200 км от точки возникновения разряда формируется атмосферик, состоящий из группы квазисинусоидальных колебаний с максимумом энергии в полосе 5-10 кГц и низкочастотной части. А так как спрайт является следствием высотного разряда, то некоторые его свойства можно получить из импульсов, входящих в состав радиошумов. Экспериментально доказано соответствие КНЧ-хвоста после положительного атмосферика молнии появлению спрайта. В исследованиях С.Р. Barrington-Leigh and al [2] это утверждение было подтверждено на основании из-

мерений фотометром, магнитной антенной и высокоскоростными видеозаписями.

На территории Якутии ведется постоянная регистрация хода низкочастотных радиошумов, существенный вклад в которые вносится от молниевых разрядов. В работе В.А. Муллаярова и др. [3] было получено распределение положительных наземных разрядов в Якутии, которые, как выше оговаривалось, возможно, провоцируют высотный разряд (рис. 1) Из этого рисунка хорошо видны две основные области грозовой активности, где, как и следовало ожидать, наблюдается и распределение положительных разрядов – южный и западный. Но наибольший интерес вызывают районы повышенной частоты появления положительных разрядов «облако-земля» по сравнению с отрицательными: северный и северо-восточный. Такое распределение очагов положительных разрядов и тем более доминирование восточного и северо-восточного очагов в некоторые годы, вообще говоря, не соответствуют известной зависимости общей грозовой активности от уровня местности. И если северо-восточный очаг положительных разрядов в какой-то степени соответствует этому условию (хотя он и высокогорный, основная его часть располагается между Верхоянским хребтом и хребтом Черского), то восточный очаг в этом отношении представляет особый случай. В нашей работе [3] возможными причинами этого указываются близость Охотского моря и проникновение в последние годы восточных циклонов на северо-восток Сибири.

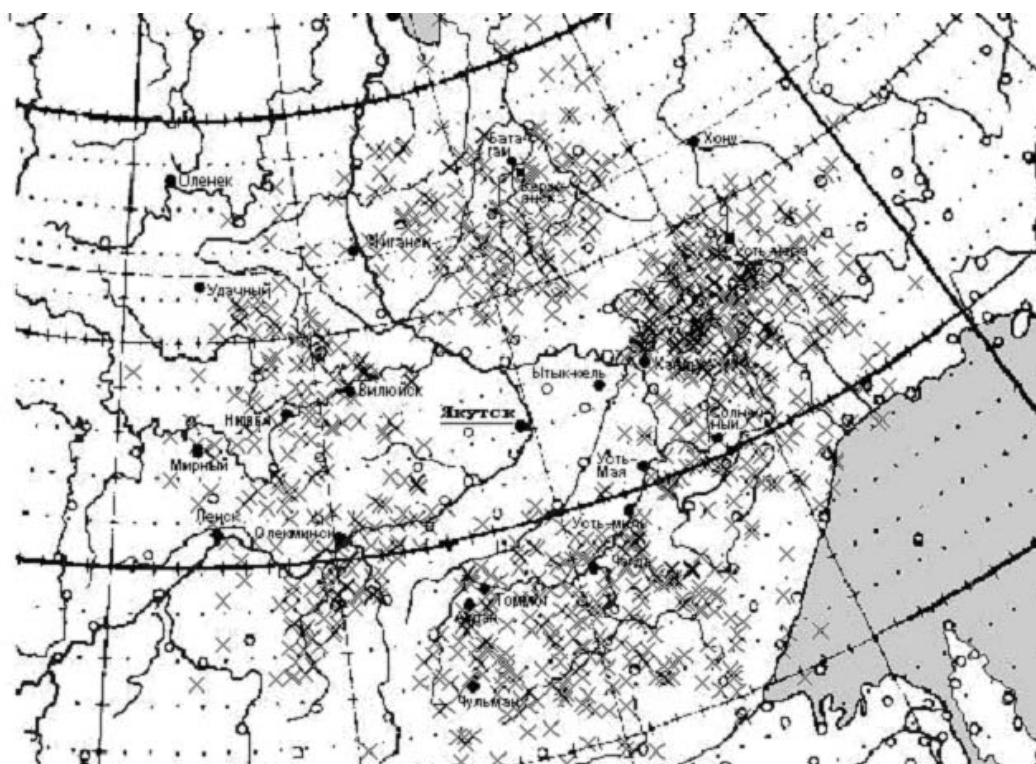


Рис. 1. Пространственное распределение положительных разрядов

В данной работе приводятся материалы записей ОНЧ-радиосуммов, полученных в ходе экспедиции в Верхоянне летом 2008 г. Сигнал принимался на штыревую антенну длиной 10 м, подключенную через усилитель (коэффициент усиления – 40) с делителем напряжения (4,3/(15+2)) ко входу АЦП переносного компьютера с частотой дискретизации 62,5 кГц и порогом 5 В в окрестностях пункта Батагай в точке с координатами  $\varphi = 67.95^\circ$ ,  $\lambda = 134.95^\circ$  на высоте  $\approx 450$  м над уровнем моря (рис. 2). Условия записи были благоприятны с точки зрения отсутствия каких-либо сетевых и промышленных радиопомех.

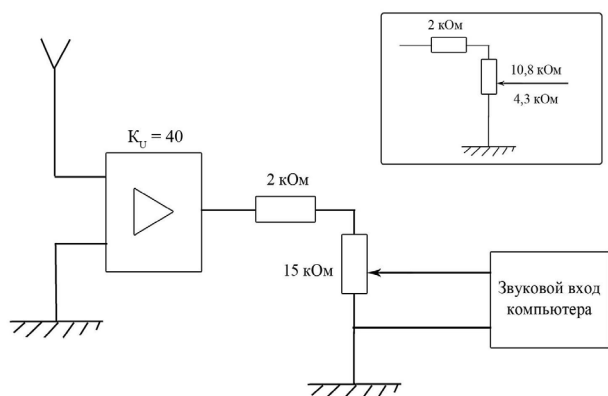


Рис. 2. Схема подключения антенны

На рис. 3 приведен характерный принимаемый радиосигнал, состоящий из атмосферика и задержанного на 2 мс последовавшего за ним положительного радиоимпульса от спрайта.

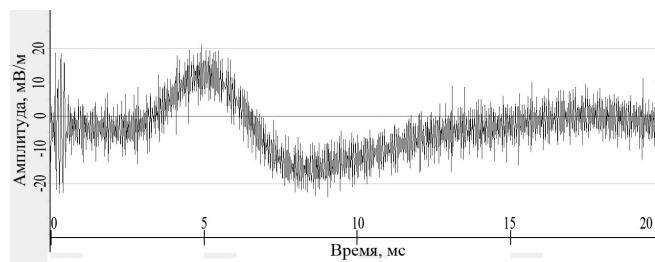


Рис. 3. Радиосигнал сферика молнии и спрайта

Из записей от 28 августа 2008 года, которая составляла несколько часов, был взят участок сигналов, принятых после 17 часов по местному времени, из которого и выделялись требующиеся импульсы.

Для обработки последовательно отобрано 180 разрядов, большая часть которых выбиралась без перекрытия событий по времени, то есть как изолированные сигналы. Так как перекрытия по времени привели бы к наложению радиосигналов друг на друга и, как следствие, к неправильной оценке характеристик. Сигналы с отсутствием, очень резким перепадом амплитуды или очень малой амплитудой ОНЧ-радиоимпульсов отбраковывались в качестве неподходящих к условиям спрайтов. Также не

рассматривались ОНЧ-сигналы без предшествующего сферика молнии, который, возможно, был неразличим от постоянной шумовой компоненты. Амплитуда грозового разряда бралась по величине квазиполупериода атмосферика с максимальной амплитудой, в относительных единицах АЦП. Величина же КНЧ-сигнала предварительно усреднялась, чтобы избавиться от шумовой составляющей, и затем только находилась его амплитуда (также в разрядах АЦП). Интервал временной задержки между разрядом молнии и рассматриваемым импульсом определялся по начальному полученному сигналу с ценой деления в 1 мс. Меньшего порядка длительности невозможно было достичь из-за ограниченных характеристик оборудования. Знак импульсов устанавливался по знаку первого квазиполупериода. Так как компонента шума составляет значительную долю от величины полезного сигнала, то определение знака было довольно затруднительным для некоторого числа данной характеристики. Было установлено, что задержка между ОНЧ-атмосфериком и КНЧ-излучением лежала в пределах 7 мс, с наиболее вероятными значениями в 2 и 1 мс (37,7% и 36,6% соответственно) (рис. 4). Вероятность отсутствия задержки составила 10%, а появление радиоимпульса с максимальной длительностью в 6-7 мс – 1,67%.

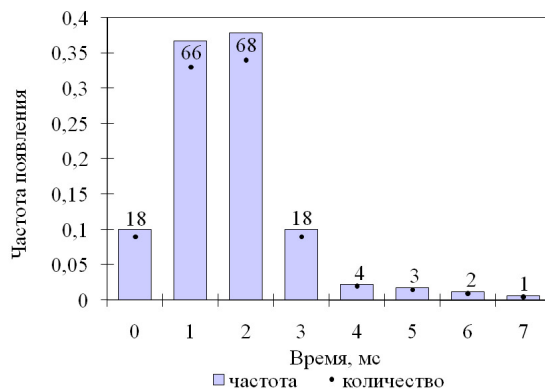


Рис. 4. Гистограмма временной задержки

По данным обработки, 76,7% положительных разрядов «облако-земля» сопровождалось зарегистрированным КНЧ-излучением. 23,3% событий КНЧ-импульсов порождены отрицательными разрядами. Но нужно отметить, что в 9,4% случаев из этих 23,3% определение знака было затруднено из-за малого соотношения сигнал – шум. Большинство КНЧ-сигналов имели положительный знак первого квазиполупериода при положительном сферике – 63,3%. Таким образом, констатировалось утверждение о необходимости положительного разряда для возникновения КНЧ-излучения [1].

Согласно рис. 5, для наиболее вероятных запаздываний по времени между сфериком молнии и последующим КНЧ-излучением – 1 и 2 мс соответствуют 2 либо 3 квазиполупериода КНЧ-сигнала.

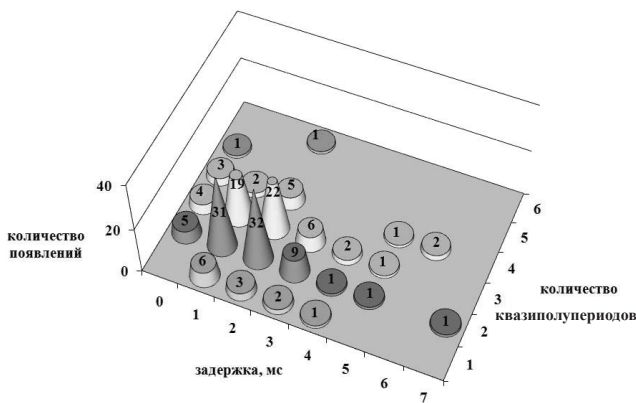


Рис. 5. Время запаздывания по количеству квазипериодов

В данной записи длительность сигнала лежала в интервале от 6 до 56 мс, с модой в 14 мс (рис. 6). Наиболее вероятная длительность первого квазипериода КНЧ-импульса равна 4 мс, а второго – 7 мс.

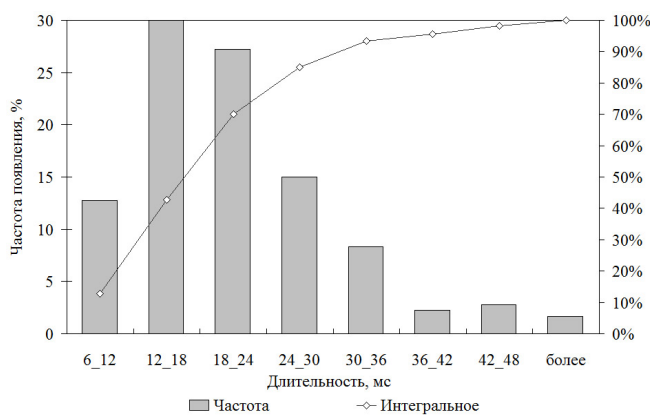


Рис. 6. Длительность спрайта

На рис. 7 показан разброс частот первого, второго и третьего квазипериодов КНЧ-сигнала. Для первого квазипериода имеет место ярко выраженный максимум при значении 166,7 Гц, что соответствует длительности 3 мс. Частота второго квазипериода импульса уже имеет менее острый максимум, приходящийся на значение 71,4 Гц или для длительности в 7 мс. Для третьего квазипериода равновероятны уже три значения частот: 56 Гц, 62,5 Гц и 71,4 Гц.

Сопоставление максимальных значений сигнала наземной молнии с соответствующими максимальными значениями первого (рис. 8) и второго (рис. 9) квазипериодов КНЧ-излучения не дает точной зависимости между этими величинами. Но некоторая корреляция все же наблюдается.

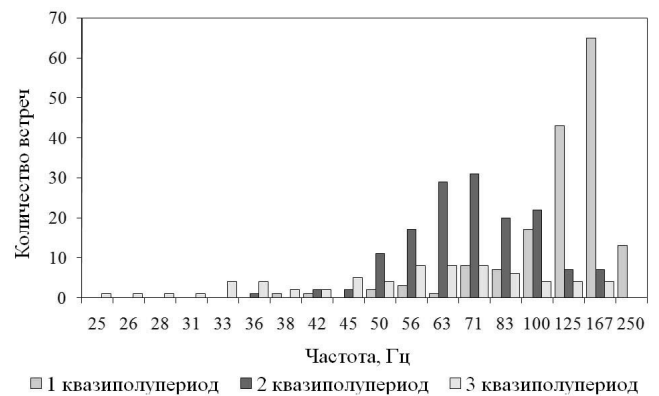


Рис. 7. Частота (Гц) квазипериодов КНЧ-сигнала

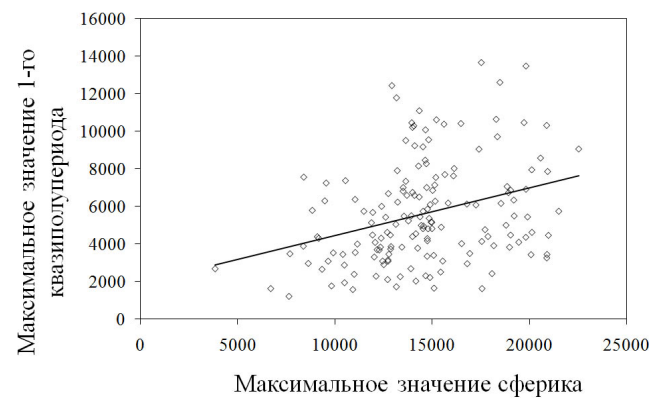


Рис. 8. Максимальные значения сигналов наземной молнии с соответствующими максимальными значениями первого квазипериода КНЧ-излучения

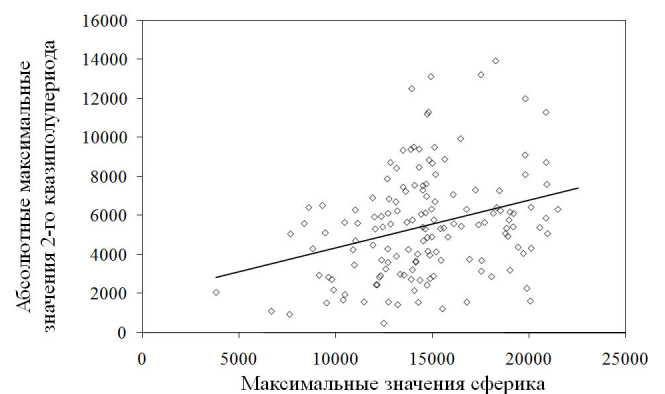


Рис. 9. Максимальные значения сигнала наземной молнии с соответствующими максимальными значениями второго квазипериода КНЧ-излучения

Так, с ростом значений сферика молнии отмечается относительный рост второго параметра. Отсутствуют значения высокой амплитуды квазипериодов для малых величин сферика.

Анализ амплитуд выбранных сфериков (рис. 10), представленных в соответствие с задержкой радиосигнала от высотного разряда относительно радиосигнала, вызвавшего атмосферик, показывает, что после мощных разрядов может быть задержка длительностью как в 1-3 мс или без нее. Для временных интервалов в 1 и 2 мс соответствует самый широкий разброс значений амплитуд сфериков, т.е. задержка не зависит от величины вызвавшего спрайт молниевый разряд в пределах точности 10%.

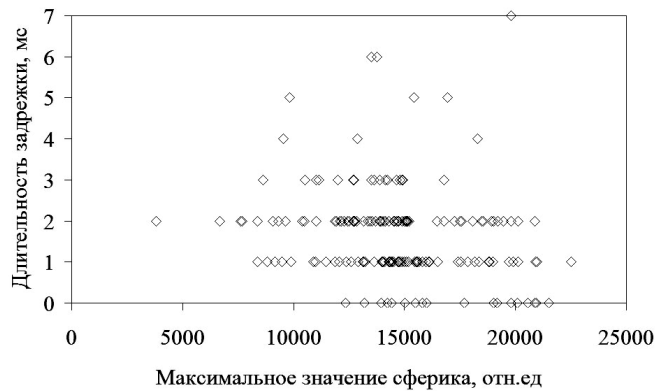


Рис. 10. Зависимость задержки между сфериком и спрайтом от амплитуды сферика

В табл. приведены материалы статистической обработки длительности КНЧ-сферика и запаздывания сигнала.

Таблица

**Статистические характеристики длительности КНЧ-сферика и его задержки относительно ОНЧ-атмосферика**

	Длительность, мс	Задержка, мс
Количество измерений	180	180
Limit	6 – 56	0 – 7
Среднее	20,5	1,7
Мода	14	2
Медиана	18	2
Стандартная ошибка	0,72	0,08
Экссесс	2,04	3,9
Асимметрия	1,27	1,44

Полученная длительность интервала задержки между атмосфериком и КНЧ-сфериком составила 1-2 мс, что не согласуется с результатами работы [4], по которой данный параметр находится в пределах 10-20 мс. Регистрация в указанной работе проводилась на станции университета Аляски и штата Юта от грозового очага, находившегося в центральной части США, штат Канзас. Использовались видеокамеры (30 кадр/с, 25 кадр/с), синхронизированные, с часами GPS. Каждый кадр занимал примерно 16,7 мс. Визуально были зарегистрированы 47 событий спрайтов. Исследователи предположили,

что данное время должно расходоваться на установление переходного электрического поля в мезосфере. Такие результаты обсуждались и в постановке стримерной теории высотных разрядов. В наших регистрациях такие значения не наблюдались.

По более поздним работам [5] были зарегистрированы спрайты как с длительной задержкой появления после предварительного разряда молнии, так и с короткой, приближенной к длительности, полученной в данной работе. Существует предложение различать спрайты по дополнительным подвидам из-за большого разброса значений задержек между КНЧ-сигналом и атмосфериком.

Как показывают наши экспериментальные данные, предварительный положительный разряд «облако-земля» в большем количестве случаев вызывает появление спрайта, чем отрицательный. Так 76,7% сигналов было зарегистрировано после положительного разряда. Данный факт поясняется особым распределением зарядов в грозовом облаке. В верхней части облака, в основном, сосредоточены положительные заряды, тогда как в ее нижней части преобладает отрицательный заряд. Поэтому с протеканием положительного заряда по каналу молнии связан появляющийся после наземного разряда пробой между облаком и нижним слоем ионосферы. Но все же часть спрайтов (23,3% из зарегистрированных) была ассоциирована с отрицательным разрядом «облако-земля», что установлено и в других работах [6, 7].

Интересно проследить изменение характера затухания частот диспергированного КНЧ-импульса с течением времени. Для первого, второго и третьего квазиполупериодов соответствуют значения квазичастот: 166,7 Гц, 71,4 Гц и 62,5 Гц. Следует заметить также, что число квазиполупериодов после запаздывания в 1-2 мс вероятнее всего равно двум или трем (рис. 5). Большее количество квазиполупериодов (четыре, пять и шесть) и наименьшее (один) имеют значительно меньшую частоту появления, соответственно 8% и 7%.

Полученные длительности КНЧ-радиосигналов после соответствующих им сфериков молний не противоречат полученным ранее результатам [5, 8, 9]. По этим данным спрайт может длиться от 10 до 100 мс. Однако более поздние работы дают длительность спрайтов от единиц до десятков миллисекунд. Полученные нами данные показывают, что наиболее вероятное значение спрайта составляет 14 мс. Изменение величины длительности КНЧ-сигнала имеет пределы от 6 мс до 56 мс.

Авторы выражают благодарность организаторам экспедиции «Верхоянье-Полнос холода», в ходе которой были проведены эксперименты.

**Л и т е р а т у р а**

1. Гуревич А.В., Зыбин К.П. Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы // УФН. – 2001. – Т. 171. – № 11. – С. 1177-1199.

2. Barrington-Leigh, C.P., Inan, U.S., and M. Stanley. Identification of Sprites and Elves with Intensified Video and Broadband Array Photometry // Journal of Geophysical Research, vol. 106, No. A2, 2001, P. 1741-1750.

3. Муллаяров В.А., Торопов А.А., Козлов В.И., Каримов Р.Р. Особенности пространственного распределения положительных газовых разрядов на Востоке Сибири // Метеорология и гидрология, в печати (2009).

4. Fernanda T. São Sabbas; Davis D. Sentman, Eugene M. Wescott, Osmar Pinto Jr., Odim Mendes Jr., Michael J. Taylor. Statistical analysis of space-time relationships between sprites and lightning // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 65, 2003. P. 525-535.

5. Li, J., Cummer, S.A., Lyons, W.A., and Nelson, T.E. Coordinated analysis of delayed sprites with high speed images and

remote electromagnetic field // Journal of Geophysical Research, vol. 113, 2008, D20206, doi<sup>10.1029/2008JD010008</sup>.

6. Barrington-Leigh, C.P., Inan, U.S., M. Stanley, and Cummer, S.A. Sprites triggered by negative lightning discharges // Geophysical Research Letters 26, No. 24, 1999, P. 3605.

7. Barrington-Leigh, C.P., and Inan, U.S. Elves triggered by positive and negative lightning discharges // Journal of Geophysical Research 26, No. 6, 1999, P. 683-686.

8. Marshall, R.A., Inan, U.S., T. Neubert, A. Hughes, G. Satori, J. Bor, A. Collier, and T.H. Allin. Optical observations geomagnetically conjugate to sprite-producing lightning discharges // Annales Geophysicae 23, 2005, P. 2231-2237.

9. Cummer, S.A., Inan, U.S., Bell, T.F., and Barrington-Leigh, C.P. ELF Radiation Produced by Electrical Currents in Sprites // Geophysical research letters, vol. 25, № 8, 1998, P. 1281-1284

Работа поддержана грантами РФФИ 08-02-00348-а, 09-05-98540-р\_восток\_а и программами Президиума РАН 16 и АВЦП, проект № РНП 2.1.1/2555.

*V.I. Kozlov, V.A. Mullayarov, L.D. Tarabukina, A.A. Toropov*

### Temporal interval between VLF-and-ELF-radio-impulses of lightning discharge

The article presents an analysis of some characteristics of 180 VLF and related ELF-signals caused by ground discharge and presumably, by discharge between a cloud and lower layers of the ionosphere that are revealed in the form of red radiation-sprites. The authors received indices for duration of the ELF-impulse (6-56 ms) and lag after lightning signal before the related ELF-signal appears (up to 7 ms). Upon the completion of the analysis we have received the most probable lag meaning in 1-2 ms

*Key-words:* VLF-radio-noise, positive discharge of ground lightning, "cloud-ionosphere" discharge, sprite, ELF-radio-signal, lightning sphere, atmospheric.



УДК 621.791

*Г.И. Слепцов, М.Н. Сивцев, С.С. Семенов, М.М. Эверстов*

### ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ СВАРКИ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Описана методика оценки технологической прочности сварных соединений замедленного разрушения образцов-вставок при разных технологических процессах сварки с помощью метода акустико-эмиссионной диагностики и фрактографических исследований. Показано, что совокупность параметров акустической эмиссии может служить критерием структурного состояния и основой неразрушающего метода оценки прочностных свойств сварного соединения, выбора оптимальных режимов проведения сварки.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия, технологическая прочность сварных соединений, стационарный режим сварки, адаптивно-импульсный режим сварки, замедленное разрушение.

*СЛЕПЦОВ Гавриил Николаевич* – мл. научный сотрудник Института физико-технических проблем Севера (ИФТПС) СО РАН.

Е-mail: [g.n.sleptsov@iptpn.ysn.ru](mailto:g.n.sleptsov@iptpn.ysn.ru)

*СИВЦЕВ Михаил Николаевич* – к.т.н., ведущий научный сотрудник ИФТПС СО РАН.

Е-mail: [m.n.sivtsev@iptpn.ysn.ru](mailto:m.n.sivtsev@iptpn.ysn.ru)

*СЕМЕНОВ Семен Семенович* – к.ф.-м.н., ст. научный сотрудник ИФТПС СО РАН.

Е-mail: [semensakha@mail.ru](mailto:semensakha@mail.ru)

*Эверстов Михаил Михайлович* – ведущий инженер ИФТПС СО РАН.

Е-mail: [mixe06@mail.ru](mailto:mixe06@mail.ru)

Как известно, в процессе пластической деформации металлических материалов постепенно накапливаются и взаимодействуют дефекты кристаллической решетки. Вследствие этого на определенной стадии деформации в материале зарождаются сначала микротрещины, которые, достигнув критического размера, приводят к необратимой повреждаемости материала и в конечном итоге к катастрофическому разрушению. Выявление степени критической повреждаемости в ответственных металлических конструкциях является в настоящее время одним из важнейших направлений в науке о прочности материалов. Особенно это важно для металлических конструк-