

УДК 551.594

## АТМОСФЕРИКИ, СВЯЗАННЫЕ СО СПРАЙТАМИ, ПО КНЧ/ОНЧ-НАБЛЮДЕНИЯМ НА п-ове КАМЧАТКА

© 2023 г. Г. И. Дружин<sup>1</sup>, \*, Е. И. Малкин<sup>1</sup>, О. В. Капустина<sup>2</sup>, \*\*

<sup>1</sup>Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,  
с. Паратунка (Камчатский край, Елизовский район), Россия

<sup>2</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троцк, Россия

\*e-mail: drug@ikir.ru

\*\*e-mail: olg-kapustina@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.08.2022 г.

После доработки 18.01.2023 г.

Принята к публикации 26.01.2023 г.

Приводятся сведения об основных характеристиках спрайтов и связанных с ними грозовых разрядов. Представлены результаты анализа атмосфериков, зарегистрированных с применением передвижной аппаратуры ИЗМИРАН в экспедиционном пункте у реки Левая Авача в сентябре, октябре 2002 г. и в августе, ноябре 2004 г. на п-ове Камчатка. Приводятся результаты анализа электромагнитных излучений от грозовых разрядов, произошедших на п-ове Камчатка в июле и августе 2017 г. и зарегистрированных аппаратурой ИКИР ДВО РАН в экспедиционном пункте Карымшина. Оценено процентное количество положительных молниевых разрядов на западном и южном побережье Камчатского п-ова, которые могут быть связаны со спрайтами.

DOI: 10.31857/S001679402260051X, EDN: OONIG

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Спрайт (sprite) – вид электрических разрядов холодной плазмы, наблюдаемых в мезосфере и термосфере. Явление спрайтов было теоретически предсказано в 1925 г. Впервые они были задокументированы фотографически 6 июля 1989 г., когда ученые из Университета Миннесоты, используя видеокамеру с низкой освещенностью, случайно получили первое изображение того, что впоследствии получило название “спрайт” [Franz et al., 1990]. Спрайты являются одним из красивейших явлений природы, сравнимым со свечением полярных сияний. Однако, если полярные сияния наблюдались еще в древние времена, а активно изучать их стали со времен Ломоносова, то обнаружение спрайтов привело к интенсивному изучению этого явления лишь в конце XX, начале XXI столетия.

Наблюдения показали, что свечение спрайтов происходит в мезосфере и нижней ионосфере выше наблюдаемых грозовых разрядов, их поперечные размеры ~50 км [Sentman et al., 1995; Lyons, 1996]. До полной яркости свечения развиваются за 1–3 мс [Summer et al., 1998], но их светимость может длиться 10–100 мс [Winckler et al., 1996]. Появление спрайта часто, в среднем в 15–20%,

связано с положительной вспышкой “облако–земля” [Reising et al., 1996; Lyons, 1996].

Наблюдения за спрайтами осуществлялось как в оптическом, так и в КНЧ/ОНЧ-диапазоне. В ОНЧ-диапазоне наблюдается основная часть атмосферика, за которой иногда следует вторая серия колебаний со значительно меньшей частотой и меньшей амплитудой. Эти колебания часто называют “медленный хвост” (или просто хвост). Назовем эти колебания КНЧ-формами, а диапазон частот, ограниченный сверху частотой 1 кГц, условно КНЧ-диапазоном.

Проведенные ранее исследования показали, что: 1) медианные значения амплитуды как дневных, так и ночных КНЧ-форм больше для положительных, чем для отрицательных полярностей; 2) ночью преобладают КНЧ-формы отрицательной полярности, днем – положительной [Terpley, 1959]; 3) Временная задержка хвоста от высокочастотной части атмосферика днем достаточно большая, а с приближением ночных условий становится меньше, особенно для ближних разрядов; среднее значение первого полупериода КНЧ, а также его задержка (0.5–4 мс) по отношению к ОНЧ (обе характеристики с большим разбросом) почти линейно возрастают с увеличением расстояния как днем, так и ночью [Herburn, 1957].

Дальнейшие экспериментальные исследования атмосфериков выявили следующие закономерности. С увеличением расстояния от источника высокочастотный максимум смещается в область более высоких частот, и величина его уменьшается, максимум низкочастотной части, наоборот, смещается в область более низких частот, а его величина относительно высокочастотной части увеличивается. Длительность, а также количество полупериодов КНЧ-атмосфериков увеличивается с расстоянием [Белянский и Михайлова, 1961; Михайлова, 1962, 1965]. Значение среднего потока энергии высокочастотной части спектра ОНЧ-атмосфериков (1–30 кГц) последовательно уменьшается с увеличением расстояния. На частотах ниже 1 кГц такой закономерности не наблюдается. Энергия излучения отдельных разрядов изменяется в довольно широких пределах [Михайлова, 1967, 1969]. Одновременные наблюдения электромагнитных и оптических явлений во время грозы показали, что спрайты, яркие свечения, наблюдаемые в мезосфере над грозовыми облаками на высотах 50–90 км, производятся теми положительными разрядами облако–Земля, которые возбуждают атмосферники с усиленной КНЧ-частью. При этом ее первый полупериод задерживается во времени после всплеска ОНЧ-сигнала на величину, зависящую от дальности распространения [Reising et al., 1996]. В работе [Pasko et al., 1997] отмечается, что появление спрайта согласуется с необходимостью снижения оставшегося большого заряда в облаке после его разряда на землю.

Первое экспериментальное доказательство того, что электрические токи, текущие в теле спрайта, производят КНЧ электромагнитную энергию на уровне, сравнимом с уровнем родительского разряда молнии, приводится в публикации [Cummer et al., 1998]. Механизм КНЧ-излучения от спрайтов обсуждался в работах [Cummer et al., 1998; Pasko et al., 1998a; b]. В статье [Reising et al., 1999] приводятся данные широкополосных измерений КНЧ/ОНЧ-атмосфериков для изучения характеристик тех вспышек облако–земля, которые приводят к возникновению спрайтов. Эти исследования показали, что энергия КНЧ-атмосфериков может быть использована для оценки количества спрайтов, вызванных грозой. Измерения на большом расстоянии (12000 км) на ст. Palmer, Антарктида, подтвердили возможность применения этого критерия для гроз, где отсутствуют видеозаписи наблюдений за спрайтами. В работе [Козлов и др., 2009] проведен анализ некоторых характеристик 180 ОНЧ- и соответствующих им КНЧ-сигналов, вызванных наземными разрядами и предположительно разрядами между облаком и нижними слоями ионосферы, проявляющимися в виде красных излучений – спрайтов.

Целью настоящей работы является анализ электромагнитных излучений в КНЧ/ОНЧ-диапазоне, зарегистрированных на Камчатском п-ове, для обнаружения, выделения КНЧ-атмосфериков и оценки их возможной связи со спрайтами.

## 2. РЕГИСТРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ В ПУНКТЕ ЛЕВАЯ АВАЧА

По инициативе Ю.М. Михайлова (ИЗМИРАН) для мониторинга влияния естественных и искусственных явлений на распространение низкочастотных электромагнитных волн в сейсмически активном регионе (Камчатка) был организован наземный передвижной пункт регистрации. Экспедиционный пункт был установлен около реки Левая Авача (54° N, 158° E). Активным участником этой экспедиции был Михайлов Ю.М. В течение нескольких месяцев (сентябрь, октябрь 2002 г. и август–начало ноября 2004 г.) в экспедиции проводились наблюдения с применением аппаратуры, разработанной в ИЗМИРАН [Михайлов и др., 2010]. Питание ее осуществлялось от аккумуляторной батареи, которая, в свою очередь, подзарядкалась от солнечных батарей. Электромагнитные сигналы в широкой полосе 10 Гц–20 кГц регистрировались приемником, имеющим две магнитные антенны и, оцифрованные с шагом по времени 20 мкс, записывались на ноутбук в режиме 1 мин в начале каждого часа круглосуточно. Обработка данных проводилась в стационарных условиях, в ИЗМИРАН.

Первичная обработка широкополосных записей выполнялась с помощью программы спектрально-временного анализа с временным окном длительностью ~20 мс и усреднением ~100 мс (разрешение по частоте ~50 Гц). Анализ этих спектров показал, что на Камчатке наблюдаются различные типы сигналов в диапазоне частот КНЧ/ОНЧ:

1 – ОНЧ-атмосферики, имеющие различный спектральный состав с редкими сильными амплитудными максимумами на частотах 4–5 кГц и многочисленными слабыми по амплитуде максимумами на частотах 7–9 кГц;

2 – КНЧ-атмосферики, так называемые хвосты (slow tails), в диапазоне частот ниже 1 кГц;

3 – твики, в диапазоне 1.6–2.2 кГц, наблюдаемые главным образом ночью: утром и вечером формы твиков менее выражены, их амплитуда и длительность, как правило, значительно меньше ночных;

4 – свистящие атмосферники (свисты), чаще слабые, но хорошо выраженные в диапазоне частот 2–5 кГц (ниже амплитудных максимумов атмосфериков), иногда очень сильные, перекрывающие почти весь частотный диапазон от 1 до 15 кГц и даже выше;

5 – всплески излучения на частотах ~1 кГц длительностью 10–60 мс.

### 2.1. Методика поиска и подсчета атмосфериков и их хвостов

Поиск атмосфериков проводился в полуавтоматическом режиме. Алгоритм состоял в следующем. При чтении данных из файла проводился поиск максимальных по модулю амплитуд на интервале 1.28 мс, которые сравнивались с заданным уровнем. Если было превышение уровня, в графической форме на дисплей выводился массив данных и, чтобы не пропустить полную форму сигнала, предыдущий и последующие массивы такой же длины (всего выдавались на дисплей монитора общий массив длительностью 10.24 мс). В пределах анализируемого интервала 5.12 мс оператор подсчитывал количество атмосфериков (от 1 до 4) по характерным признакам, а именно: 1) длительность от 1 до 4 мс, 2) уменьшение периода со временем и 3) достаточно крутое возрастание и более медленное убывание амплитуды.

При отсутствии сигналов с характерными признаками, после нажатия оператором клавиши "Enter", программа переходила к следующему интервалу. Если наличие сигнала или сигналов было обнаружено, после нажатия оператором одной из кнопок с цифрами 1, 2, 3, 4 эта величина заносилась в память и суммировалась с предыдущим значением, а сигнал пропускаться через цифровой фильтр с верхней частотой 1 кГц и анализировался на превышение заданного уровня. Превышение уровня являлось признаком возможности существования КНЧ-атмосферика (хвоста, "slow tail"). В этом случае в дополнительный файл (с тем же именем, но с другим расширением — \*.dat) записывалось время, соответствующее началу интервала, и другие параметры, в том числе подсчитанное с начала минуты количество атмосфериков (промежуточный результат). При выходе из программы по признаку конца файла или по нажатии клавиши "Esc" в этот файл в конце записывалось количество атмосфериков, количество предварительно автоматически оцениваемых положительных и отрицательных КНЧ-максимумов и, для продолжения обработки при повторном обращении к файлу, время прерывания программы.

Количество КНЧ-хвостов, в том числе положительной и отрицательной полярности, уточнялось с помощью другой программы. На дисплей последовательно выводилась временная форма тех отрезков записи, в которых было обнаружено превышение заданного уровня амплитуды в КНЧ-диапазоне, который был определен как  $2\Omega$  по отношению к уровню фона, т.е. в отсутствие атмосфериков, и визуально определялось наличие хвоста, знак первого полупериода хвоста, превышающего заданный уровень. В конце просмотра всех данных записи создавался еще один файл с тем же именем и расширением третьего

типа (\*.dt), в котором сохранялись полученные результаты.

Для определения возможности существования спрайта последовательно применялась оценка энергии  $W$  в отфильтрованных данных (0–1 кГц) на интервале в 20 мс по величине магнитных компонент. Автоматически выбирался интервал, на котором уровень энергии  $W_i$  превышал среднее значение на 7 дБ. Затем на этом интервале оценивались спектральные максимумы в ОНЧ- и КНЧ-диапазонах, определялась полярность первого полупериода КНЧ-сферика, выделенного на этом интервале, и его задержка по отношению к ОНЧ-сферика.

Оценка вероятности существования спрайта осуществлялась по методике, аналогичной приведенной в работе [Reising et al., 1999], которая была взята за основу. Применение этой методики было обусловлено результатами, полученными при сравнении оптических и КНЧ/ОНЧ-измерений, когда экспериментально была обнаружена связь спрайтов с КНЧ-излучениями.

### 3. РЕГИСТРАЦИЯ ГРОВОВЫХ РАЗРЯДОВ КАМЧАТКИ В ПУНКТЕ КАРЫМШИНА

Анализ данных, полученных при регистрации излучений около реки Левая Авача, проводился по всем наблюдаемым на Камчатке атмосферикам. В дальнейшем мы продолжили исследования атмосфериков, способных приводить к возникновению спрайтов, регистрируемых на Камчатке. Для этого был выполнен анализ гроз, возникших только на территории Камчатского п-ова. Грозовые разряды регистрировались КНЧ/ОНЧ-аппаратурой, разработанной в ИКИР ДВО РАН [Дружин и др., 2019] и установленной в стационарном экспедиционном пункте Карымшина ( $\varphi = 52.492^\circ \text{N}$ ,  $\lambda = 158.072^\circ \text{E}$ ). Дата и время прихода атмосфериков на территорию, отстоящую от пункта наблюдения менее чем на 500 км, были взяты из данных всемирной сети регистрации грозных разрядов WWLLN (<https://wwlln.net/>). Синхронизация по времени прихода атмосфериков осуществлялась по системе GPS.

На рис. 1 приведены местоположения молниевых разрядов, зарегистрированных сетью WWLLN в июле и августе 2017 г. Видно, что 3 июля грозы происходили в западной части Камчатского п-ова, в основном над Охотским морем, 14 июля гроза наблюдалась на южном побережье Камчатки, а 22 августа — в западной части, над сушей полуострова. За один зарегистрированный грозовой разряд принимался первый основной молниевый импульс и повторные импульсы, происходившие после основного в течение 250 мс. За первым импульсом продолжительностью до 3 мс обычно следовал второй и в меньшем количестве после-

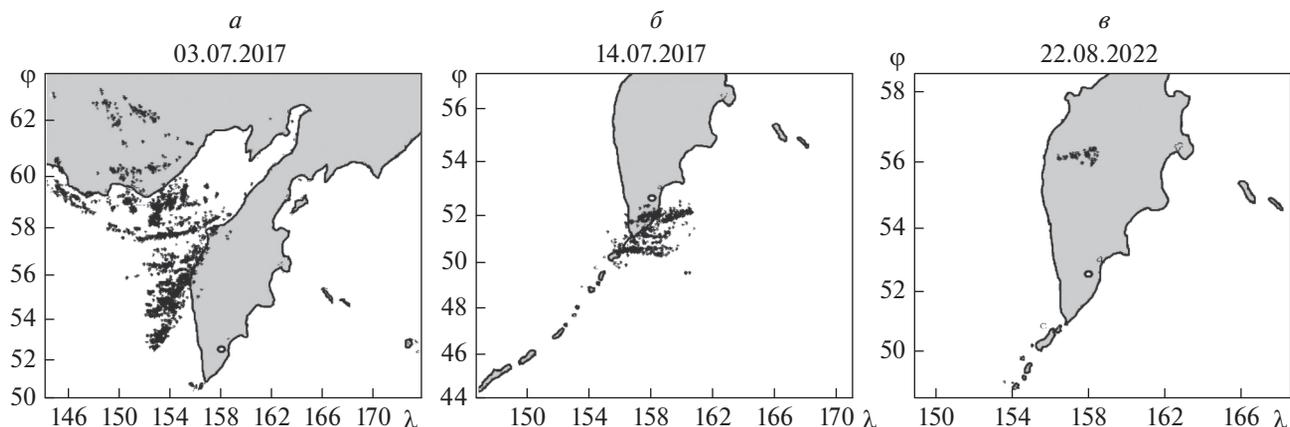


Рис. 1. Грозовые разряды на п-ове Камчатка, произошедшие 3 (а), 14 (б) июля и 22 (в) августа 2017 г.

\* – грозовой разряд, о – пункт наблюдения Карымшина.

дующие. Импульсы обнаруживались по превышению значения сигнала первого импульса среднеквадратичного значения КНЧ-сигнала в 5 раз (17 дБ, 1-й порог) на выбранной реализации сигнала 500 мс. Этот временной интервал включал в себя 150 мс записи сигнала до основного импульса, определяемого по данным WWLLN, 250 мс записи сигнала с молниевыми импульсами и запись нулевых уровней в течение 100 мс. Второй импульс регистрировался по превышению уровню порога энергии 7 дБ через 3 мс после начала первого импульса, чтобы исключить его влияние. Время выборки включает в себя 2 мс до начала КНЧ-импульса и 20 мс после его начала, как это было выполнено в работе [Reising et al., 1999]. Последующие импульсы регистрировались по выбранному 1-му порогу 17 дБ через 3 мс после предыдущего импульса, чтобы также исключить его влияние. В нашем случае наблюдалось до пяти импульсов и очень редко – больше пяти.

Примеры электрической составляющей волновых форм, полученных в п. Карымшина, в диапазоне частот до 1 кГц, показаны на рис. 2а, 2б, 2в. На рис. 2г приведен пример формы КНЧ-атмосферика из работы [Reising et al., 1999], где первый импульс связан с ударом молнии облако–земля, а второй приходит через ~56 мс, совпадает по времени со временем образования спрайта, наблюдаемого в оптическом диапазоне, и является индикатором спрайта. Видно большое сходство излучений как по форме, так и по времени задержки второго импульса относительно первого, полученных в п. Карымшина и в пункте Юкка-Ридж (Yucca Ridge), США (40°40'06" N, 104°56'24" W). Некоторые различия в формах импульсов, полученных в этих пунктах, обусловлены несколькими причинами. При грозовых разрядах этими причинами являются: разница в распределении зарядов в грозовых облаках; расстояния от

облаков до земной поверхности и ионосферы; расстояния от источника излучений до пунктов регистрации; приемники излучений; применяемые электрические фильтры. Так, например, в п. Карымшина прием сигналов осуществлялся на электрическую антенну, с которой принимается электрическая составляющая электромагнитного излучения, а в п. Yucca Ridge принималась магнитная составляющая, в большей степени реагирующая на токи в грозовых источниках. Отметим, что молния, волновая форма которой показана на рис. 2а, произошла на западе Камчатки, на расстоянии 323 км от п. Карымшина, молния, приведенная на рис. 2б – на юге Камчатки, на расстоянии 175 км, а молния, показанная на рис. 2в – на западе Камчатки на расстоянии 344 км. Сигнал от молнии, зарегистрированный в Yucca Ridge (рис. 2г), получен на расстоянии ~550 км.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Причиной возникновения спрайтов могут быть процессы, изложенные в работе [Гуревич и Зыбин, 2001], связанные с явлением лавинообразного размножения в веществе быстрых электронов, получившим название пробоя на убегающих электронах. Для осуществления пробоя необходимо выполнение условия превышения напряженности электрического поля критического значения, когда пространственный размер области превышения поля должен превосходить длину экспоненциального роста лавины электронов. Кроме этого, должны существовать затравочные быстрые электроны. Все эти условия выполняются в грозовой атмосфере. Критическое поле пробоя на порядок ниже порогового поля обычного пробоя, размер области превышения поля достаточен для роста лавины электронов, а роль затравочных электронов выполняют косми-

ческие лучи, плотность потока которых велика. Гуревич и Зыбин [2001] объясняют, что на больших высотах (>20–30 км) превышение напряженности поля критического значения в большой пространственной области возможно только в течение короткого времени после сильного положительного разряда на Землю. Однако и отрицательные разряды также могут приводить к возникновению спрайтов. В работе [São Sabbas et al., 2003] отмечается, что ~27% спрайтов не были связаны с положительными молниевыми разрядами, а по данным обработки атмосфериков, зарегистрированных в Якутии [Козлов и др., 2009], 76.7% положительных разрядов “облако–земля” сопровождалось КНЧ-излучением, а 23.3% событий КНЧ-импульсов были порождены отрицательными разрядами. В работе [Cummer et al., 1998] показано, что второй КНЧ-импульс обусловлен током, текущим в спрайте. Измерения, полученные в США [Reising et al., 1999], показали, что второй КНЧ-импульс может появиться после положительного разряда молнии через 50–70 мс. Максимумы в распределении времени задержки появления спрайта после положительного разряда находятся в диапазоне 10–30 мс [São Sabbas et al., 2003]. Однако анализ атмосфериков, полученных в работе [Козлов и др., 2009], показал, что после мощных разрядов в некоторых случаях может наблюдаться задержка длительностью 1–3 мс. Временным интервалам в 1 и 2 мс соответствует самый широкий разброс значений амплитуд атмосфериков, т.е. задержка не зависит от величины вызвавшего спрайт молниевое разряда в пределах точности 10%. Полученные в Якутии данные показывают, что наиболее вероятное значение длительности спрайта с учетом длительности КНЧ-сигнала составляет 14 мс.

4.1. Анализ результатов измерений в пункте Левая Авача

Мы подробно проанализировали данные измерений в п. Левая Авача за август 2002 г. На рис. 3 приведены графики зависимости от времени числа атмосфериков (кривая 1) и числа хвостов (кривая 2) в минуту (предварительная оценка в полуавтоматическом режиме), а также более точные данные, полученные с помощью просмотра временной формы в диапазоне до 1 кГц (кривая 3) и числа КНЧ-атмосфериков с энергией, превышающей на 7 дБ средний за минуту уровень (кривая 4). Из этого рисунка видно, что число КНЧ-атмосфериков, которые, возможно, имеют непосредственную связь со спрайтами, примерно на 3 порядка меньше общего количества атмосфериков в минуту. В верхней части рис. 3 приведены траектории двух тайфунов (<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/summary/wnp/s/200212.html.en>) и (<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/summary/wnp/s/200213.html.en>), действовавших в августе 2002 г. в северо-западной части Тихого океана, грозовая активность которых проявилась в этот промежуток времени в записи КНЧ/ОНЧ-излучений в пункте Левая Авача. Кривая 5 на рис. 3 показывает давление в центре тайфуна (шкала справа). Следует отметить, что в августе 2002 г. максимальные значения количества ОНЧ-атмосфериков в минуту (до 6000), а также хвостов (до 700) и положительных импульсов, показанных на рис. 3 (кривая 4) (до 4), имеют место во время прохождения тайфуна PHANFONE на стадии депрессии. Спектральный анализ выделенных КНЧ-импульсов показал, что наиболее часто максимум имеет место на частотах  $f = 120–220$  Гц, что соответству-

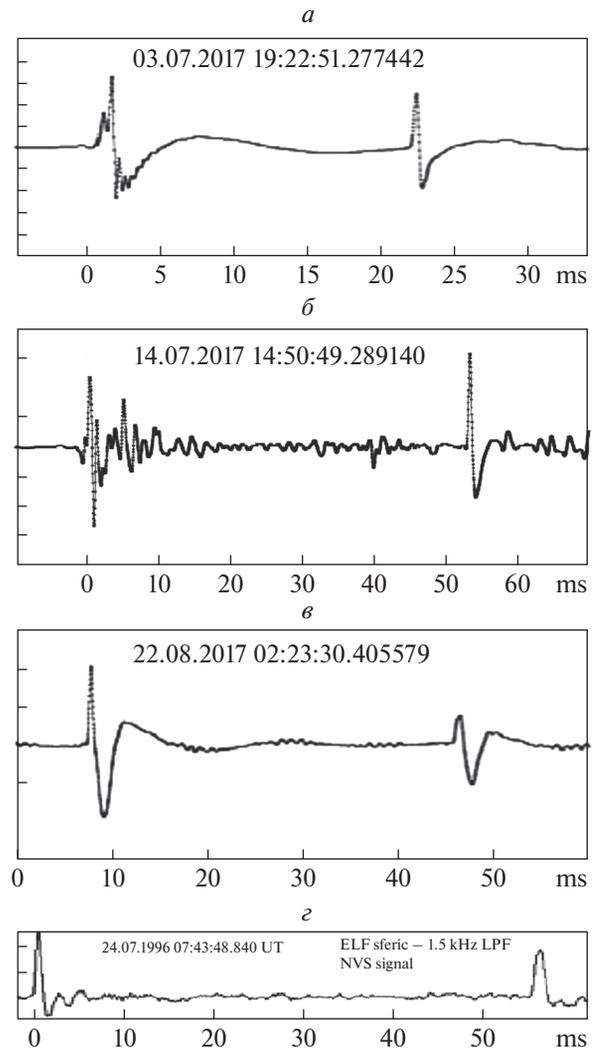
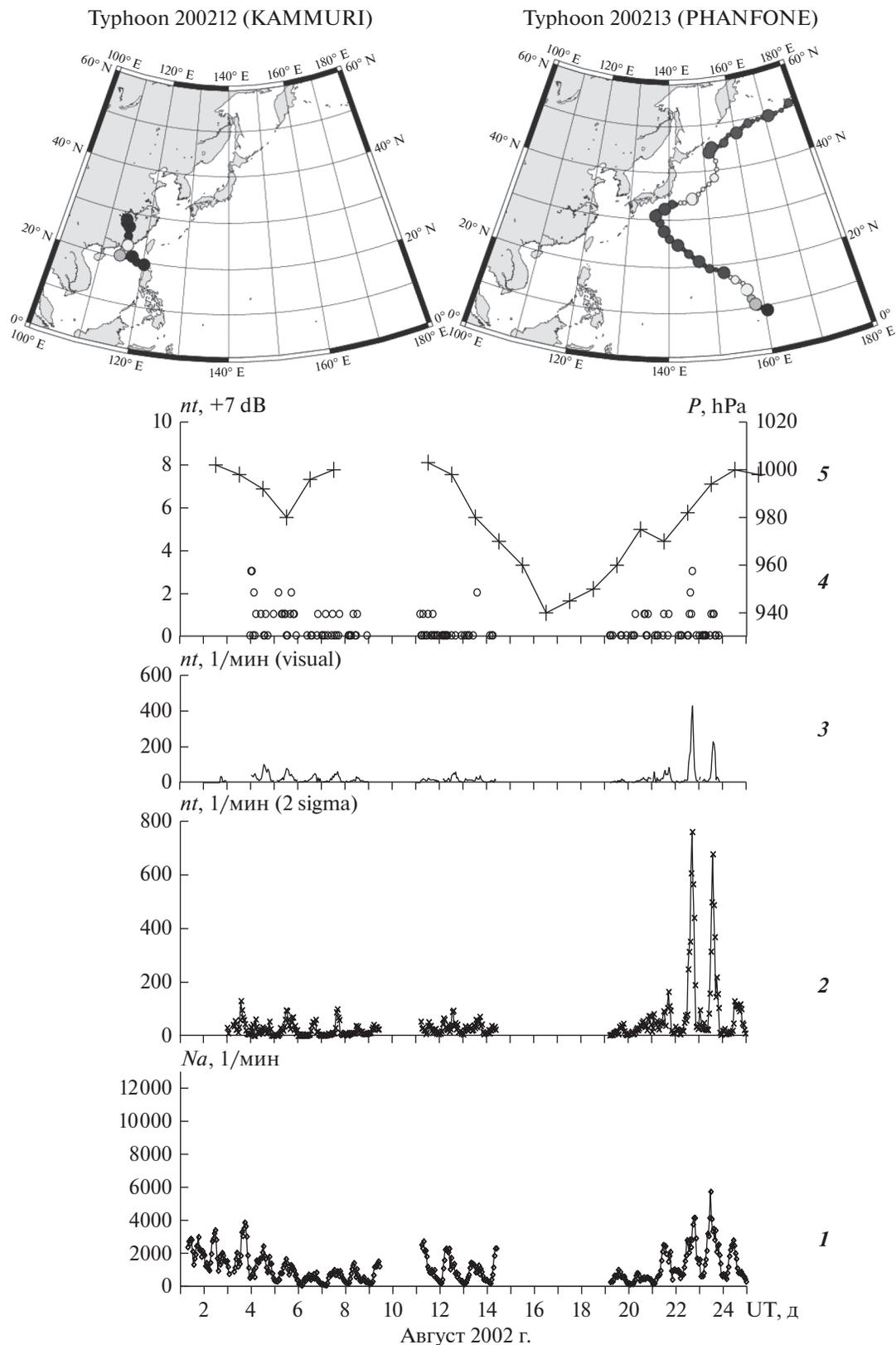
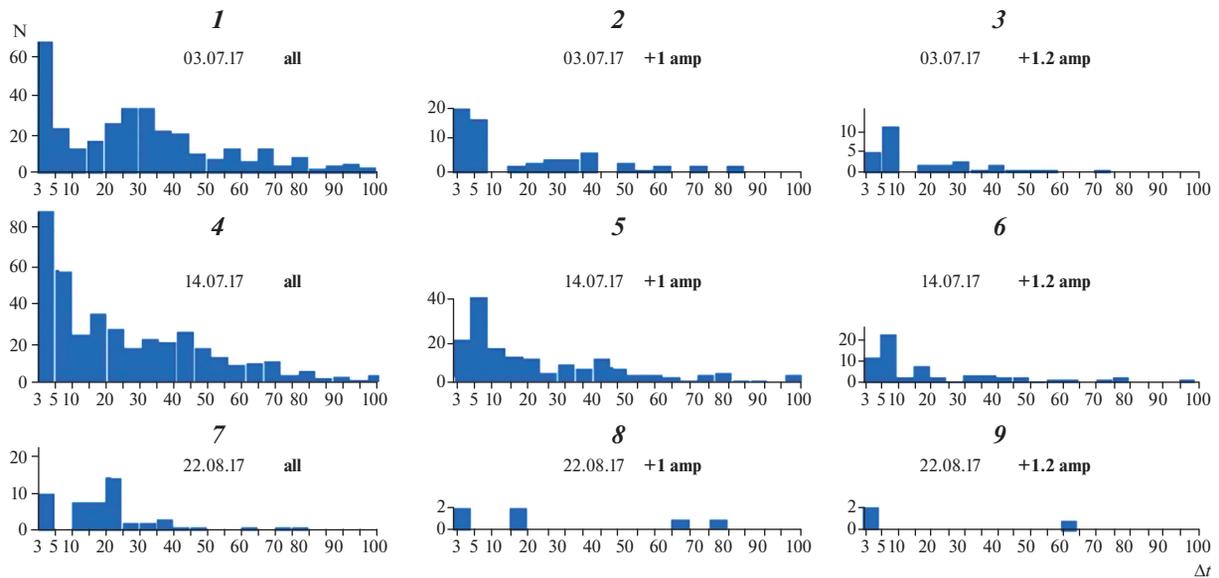


Рис. 2. Примеры электромагнитных излучений от гроз, произошедших на Камчатке 3 июля (а), 14 июля (б) и 22 августа (в) 2017 г в диапазоне частот до 1 кГц. Волновая форма сигнала в диапазоне частот <1.5 кГц, полученная в США 24 июля 1996 г. (г) при проведении экспериментов по изучению спрайтов [Reising et al., 1999].

200213.html.en), действовавших в августе 2002 г. в северо-западной части Тихого океана, грозовая активность которых проявилась в этот промежуток времени в записи КНЧ/ОНЧ-излучений в пункте Левая Авача. Кривая 5 на рис. 3 показывает давление в центре тайфуна (шкала справа). Следует отметить, что в августе 2002 г. максимальные значения количества ОНЧ-атмосфериков в минуту (до 6000), а также хвостов (до 700) и положительных импульсов, показанных на рис. 3 (кривая 4) (до 4), имеют место во время прохождения тайфуна PHANFONE на стадии депрессии. Спектральный анализ выделенных КНЧ-импульсов показал, что наиболее часто максимум имеет место на частотах  $f = 120–220$  Гц, что соответству-



**Рис. 3.** Результаты регистрации атмосфериков в п. Левая Авача в августе 2002 г., а также траектории тайфунов в этот же период времени, движущихся с юга в северном направлении: **1** – число атмосфериков в минуту,  $Na$ ; **2** – число хвостов в минуту,  $nt$  (предварительная оценка), **3** – число хвостов в минуту,  $nt$  (уточняется визуально), **4** – число хвостов в минуту,  $nt$  (уровень энергии которых превышает средний за минуту на 7 дБ); **5** – давление в центре тайфуна. В начале и конце траектории черные точки соответствуют моментам прохождения тайфунов на стадии депрессии.



**Рис. 4.** Гистограммы зависимости количества КНЧ-импульсов  $N$  от времени задержки второго импульса относительно первого  $\Delta t$  (мс), построенные по результатам регистрации гроз 17 июля 2017 г. (1, 2, 3), 3 июля 2017 г. (4, 5, 6) и 22 августа 2017 г. (7, 8, 9).

1, 4, 7 – всех зарегистрированных положительных и отрицательных импульсов;  
 2, 5, 6 – первых положительных и вторых положительных и отрицательных импульсов;  
 3, 6, 9 – первых положительных и вторых положительных импульсов.

В обозначениях указано, что регистрировались амплитуды:  
**all** – всех положительных и отрицательных импульсов;  
**+1 amp** – положительных первых импульсов;  
**+1, 2 amp** – положительных первых и вторых импульсов.

ет длительности 4–8 мс двух полупериодов КНЧ-атмосферика. В работах [Михайлов и др., 2005, 2006] подробно обсуждается грозовая деятельность, связанная с тайфунами, и показано, что атмосферерики наиболее часто наблюдаются именно на стадии депрессии.

В табл. 1 представлено количество положительных и отрицательных первых полупериодов КНЧ-сфериков в минуту, наблюдаемых 2 и с 20 по 24 августа 2002 г. Следует отметить, что количество положительных первых полупериодов чаще всего в 2 раза меньше, чем отрицательных. Проанализирована задержка КНЧ-сфериков (223 случая) по отношению к ОНЧ за 20–21 августа 2002 г. Получены следующие величины: 28 (0 мс), 49 (0.5 мс), 116 (1 мс), 16 (1.5 мс), 13 (2 мс), 1 (5 мс). Наиболее вероятным оказывается значение 1 мс. В работе [Козлов и др., 2009] это значение оценено в 1–2 мс.

В результате анализа данных регистрации атмосферериков в пункте Левая Авача было получено, что число КНЧ-атмосфериков, которые возможно имеют непосредственную связь со спрайтами, примерно на 3 порядка меньше общего количества атмосферериков в минуту, т.е.  $\sim 0.1\%$ . Похожие результаты приведены в работе [São Sabbas et al., 2003], где количество спрайтов в июле 1996 г. составляло от 0.1–3% от общего количества наблюдаемых грозовых разрядов.

#### 4.2. Анализ результатов измерений в пункте Карымшина

По данным измерений, полученных в пункте Карымшина, построены гистограммы зависимости количества КНЧ-импульсов  $N$  от времени задержки второго импульса  $\Delta t$  относительно первого импульса (рис. 4). Мы ограничились временным интервалом от 3 мс до 100 мс, поскольку до

**Таблица 1.** Количество положительных и отрицательных первых квазиполупериодов КНЧ-атмосфериков в минуту, наблюдаемых в августе 2002 г.

Дата (время, UT)	2 (7-9)	20 (16-23)	21 (00-19)	22 (00-23)	23 (00-23)	24 (00-21)	20–24
+	33	27	91	169	540	277	1104
–	90	37	99	500	1164	820	2625

**Таблица 2.** Количество молниевых разрядов, наблюдаемых на Камчатке в июле–августе 2017 г.

Дата	Количество всех разрядов	Количество 1-х положит. разрядов	Количество 1-х и 2-х положит. разрядов	Процент 1-х положит. разрядов к общему количеству	Процент 1-х и 2-х положит. разрядов к общему количеству	Место положение гроз
03.07.2017	338	78	30	23	9	Запад, суша, море
14.07.2017	429	173	75	40	17	Юг, суша, море
22.08.2017	49	6	3	12	6	Запад, суша

3 мс наблюдался переходный процесс первого импульса, а второй импульс очень редко появлялся после 100 мс. Выбор для анализа первого и второго КНЧ-импульсов обусловлен тем, что второй импульс может являться индикатором спрайта. Из рис. 4 (1, 4, 7) видно, что наиболее вероятное значение задержки  $\Delta t$  наблюдалось в диапазоне от 3 до 5 мс. Наблюдается также второй, меньший максимум N в диапазоне 25–35 мс (1). При первых положительных и вторых положительных и отрицательных импульсов (2, 5, 8) максимумы N несколько смещены относительно приведенных на (1, 4, 7), но характерное убывание N от  $\Delta t$  сохранилось. На панелях (3, 6) максимум наблюдался в диапазоне 5–10 мс, а на (9) – 3–5 мс, но при малом количестве импульсов.

Отметим, что задержки  $\Delta t$ , полученные в п. Карымшина, относятся к задержкам между первым и вторым КНЧ-импульсом, а в пункте Левая Авача и в работе [Козлов и др., 2009] – к задержкам между началами всплесков ОНЧ- и КНЧ-излучений, хотя во многих случаях эти задержки могут совпадать. Отметим также, что только небольшая часть временных задержек всех зарегистрированных положительных и отрицательных импульсов, представленных на рис. 4 (1, 4, 7), относится к задержкам между ударом молнии на землю и появлением спрайта, поскольку учитываются задержки всех зарегистрированных молниевых разрядов. В то же время при первых положительных и вторых положительных и отрицательных импульсах (2, 5, 8) некоторая часть регистрируемых молний связана со спрайтами. И времена задержек больше согласуются с полученными в работе [São Sabbas et al., 2003] (10–30 мс). При первых положительных и вторых положительных импульсах рис. 4 (3, 6, 9), вероятнее всего, второй импульс полностью связан с возникновением спрайта, поскольку в работе [Reising et al., 1999] утверждается, что при положительных грозовых разрядах возникновение второго КНЧ-импульса, превышающего определенный порог, обусловлено возникновением спрайта, который одновременно регистрируется в оптическом и КНЧ-диапазонах. При этом время задержки между первым

и вторым положительными импульсами достигает 50–70 мс.

В табл. 2 приведены параметры грозовых разрядов. Видно, что процент положительных молниевых разрядов на землю (наличие первого положительного импульса) составлял от 23% до 40% от общего количества разрядов, а процент положительных разрядов, когда наблюдался сначала первый положительный импульс, затем второй положительный, составлял от 6% до 17% от общего количества разрядов. В этом случае должны наблюдаться спрайты. Более высокий процент предполагаемых спрайтов (6–17%), по сравнению с приведенными в работе [São Sabbas et al., 2003] и полученными нами в п. Левая Авача, по нашему мнению, обусловлен тем, что отбор грозовых разрядов осуществлялся сетью WWLLN, пункты которой находятся на больших расстояниях от источников гроз на Камчатке и регистрируют только самые мощные излучения [Дружин и др., 2011]. Возникновение второго положительного импульса после положительного первого связано со многими причинами, в том числе и с рельефом местности возникновения гроз. В нашем случае процент возникновения первого положительного импульса на западном побережье Камчатки (суша, море) был больше, чем над сушей (23% и 12%). И процент последовательно произошедших двух положительных импульсов относительно общего их количества на границе суша/море также был больше, чем над сушей (9% и 6%). На юге Камчатского п-ова наблюдалось большее в процентном отношении количество положительных разрядов, чем на западе.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведена цифровая запись атмосфериков, зарегистрированных с применением передвижной аппаратуры ИЗМИРАН в экспедиционном пункте Левая Авача в сентябре, октябре 2002 г. а и в августе, ноябре 2004 г. на Камчатке, в России.

2. Анализ данных показал, что полученные статистические характеристики КНЧ-атмосфериков, а именно: соотношение положительных и

отрицательных первых полупериодов, их задержка по отношению к ОНЧ, а также процентное отношение КНЧ к ОНЧ в основном согласуются с результатами цитированных публикаций.

3. Регистрация грозовых разрядов, возникших на территории, прилегающей к п-ову Камчатка, выполнена в июле и августе 2017 г. с применением аппаратуры ИКИР ДВО РАН, в стационарном п. Карымшина.

4. Приведены волновые формы электромагнитных молниевых излучений в диапазоне частот до 1 кГц. Показано, что волновые формы низкочастотных излучений КНЧ-атмосфериков, полученные в п. Карымшина, по своей форме и времени задержки второго импульса во многом совпадают с волновыми формами КНЧ-атмосфериков, зарегистрированных вблизи ст. Коллинз, штат Колорадо, США, где показано, что второй КНЧ-импульс после положительного разряда молнии возникает за счет токов спрайта.

5. Процентное количество положительных разрядов, зарегистрированных на западном побережье Камчатки, было больше вдоль побережья суша/море, чем над сушей. На южном побережье наблюдалось большее процентное количество положительных разрядов по сравнению с западным. Количество разрядов, предположительно связанных со спрайтами, составило от 6% до 17% от общего количества наблюдаемых грозовых разрядов.

6. Полученные на Камчатке результаты исследований КНЧ/ОНЧ атмосфериков, связанных со спрайтами, не противоречат результатам, полученными другими авторами при исследованиях аналогичных излучений в Западном Канзасе, США, и в Якутии.

В дальнейшем предполагается проанализировать и сопоставить характеристики наземных КНЧ/ОНЧ-данных, связанных со спрайтами, с данными, зарегистрированными на спутнике.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Т.А. Вострикову и В.К. Михайлову за первичную обработку данных регистрации. Огромная благодарность Г.А. Михайловой за постановку задачи об индикаторах спрайтов.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственных заданий “Физические процессы в системе ближнего космоса и геосфер при солнечных и литосферных воздействиях”, регистрационный номер: АААА-А21-121011290003-0, а также “Исследование структуры и динамики ионосферы и условий распространения радиоволн”, ГР № 01201356396.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Белянский Г.В., Михайлова Г.А.* Об исследованиях свойств атмосфериков на сверхнизких частотах (ниже 1 кГц) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 1. № 3. С. 379–386. 1961.
- *Гуревич А.В., Зыбин К.П.* Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы // УФН. Т. 171. № 11. С. 1177–1199. 2001.
- *Дружин Г.И., Пухов В.М., Санников Д.В., Малкин Е.И., Стасий И.Е.* ОНЧ-Регистратор для исследования естественных радиоизлучений // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки Т. 27(2). С. 105–116. 2019.
- *Дружин Г.И., Чернева Н.В., Мельников А.Н.* Гроза в районе полуострова Камчатка по данным наблюдений за ОНЧ-излучением // Метеорология и гидрология. № 7. С. 32–39. 2011.
- *Козлов В.И., Муллаяров В.А., Тарабукина Л.Д., Торпов А.А.* Временной интервал между ОНЧ- и КНЧ-радиоимпульсами разрядовой молнии // Вестник ЯГУ. Т. 6. № 3. 2009.
- *Михайлов Ю.М., Дружин Г.И., Михайлова Г.А., Капустина О.В.* Динамика грозовой активности во время тропических циклонов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 46. № 6. С. 825–839. 2006.
- *Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Дружин Г.И., Чернева Н.В.* Возможные атмосферные эффекты в нижней ионосфере по наблюдениям атмосферных радишумов на Камчатке во время тропических циклонов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 6. С. 824–839. 2005.
- *Михайлов Ю.М., Рожков В.Б., Капустина О.В.* Полевой автономный ОНЧ-приемник / V-я Международная конференция ИКИР ДВО РАН. С. Паратунка, Камчатской край, 2–7 августа. Сбор. труд. С. 150–151. 2010.
- *Михайлова Г.А.* О спектрах атмосфериков и фазовой скорости электромагнитных волн на сверхнизких частотах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 2. № 2. С. 257–266. 1962.
- *Михайлова Г.А.* Функция распространения и средняя фазовая скорость электромагнитных волн на сверхнизких частотах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 5. № 1. С. 183–185. 1965.
- *Михайлова Г.А.* Спектры атмосфериков на сверхнизких частотах в ночное время // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 7. № 2. С. 357–359. 1967.
- *Михайлова Г.А.* Энергетические спектры молниевых разрядов на сверхнизких частотах по данным гармонического анализа атмосфериков // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 9. № 2. С. 357. 1969.
- *Cummer S.A., Inan U.S., Bell T.F., Barrington-Leigh C.P.* ELF radiation produced by electrical currents in sprites. C, I, B, B // Geophys. Res. Lett. V. 25. № 8. P. 1281–1284. 1998.
- *Franz-R.C., Nemzek R.J., Winckler J.R.* Television Image of a Large Upward Electrical Discharge above a Thunderstorm System // Science. 249. (4964): 48–51. Bibcode: 1990 Sci. 249...48F. PMID 17787625. S2CID 9343018. 1990.  
<https://doi.org/10.1126/science.249.4964.48>

- *Hepburn F.* Atmospheric waveforms with very low-frequency components below 1 kc/s known as slow tails // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 10. № 5. P. 266–287. 1957.
- *Lyons W.A.* Sprite observations above the U.S. High Plains in relation to their parent thunderstorm systems // *J. Geophys. Res.* 101. 29,641. 1996.
- *Pasko V.P., Inan U.S., Bell T.F., Reising S.C.* Mechanism of ELF radiation from sprites // *Geophys. Res. Lett.* V. 25. № 18. P. 3483–3496. 1998a.
- *Pasko V.P., Inan U.S., Reising S.C.* Mechanism of ELF radiation from sprites / *Geology* / Corpus ID: 10907173. 1998b. <https://doi.org/10.1029/98GL02631>
- *Pasko V.P., Inan U.S., Bell T.F., Taranenko Y.N.* Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere // *J. Geophys. Res.*, 102, 4529. 1997.
- *Reising S.C., Inan U.S., Bell T.F.* ELF sferic energy as a proxy indicator for sprite occurrence // *Geophys. Res. Lett.* V. 26. № 7. P. 987–990. 1999.
- *Reising S.C., Inan U.S., Bell T.F., Lyons W.A.* Evidence for continuing current in sprite-producing cloud-to-ground lightning // *Geophys. Res. Lett.* V. 23. № 24. P. 3639–3642. 1996.
- *São Sabbas F.T., Sentman D.D., Wescott E.M., Osmar Pinto Jr., Odim Mendes Jr., Taylor M.J.* Statistical analysis of space–time relationships between sprites and lightning // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 65. P. 525–535. 2003.
- *Sentman D.D., Wæcott E.M., Osborne D.L., Hampton D.L., Heavner M.J.* Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 1. Red Sprites // *Geophys. Res. Lett.* V. 22. 1205, 1995.
- *Tepley L.R.* A comparison of sferics as observed in the VLF and ELF bands // *J. Geophys. Res.* V. 64. № 12. P. 2315–2329. 1959.
- *Winckler J.R., Lyons W.A., Nelson T.E., Nemzek R.J.* New high-resolution ground-based studies of sprites // *J. Geophys. Res.* 101, 6997, 1996.