



УДК 551.510.533

Евтушенко Андрей Александрович¹, доцент, к.ф.-м.н.,e-mail: a_evtushenko@inbox.ru**Киняпина Марина Сергеевна**¹, ст. преподавательe-mail: marinakin1@yandex.ru¹Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТНЫХ РАЗРЯДОВ

Аннотация. В работе исследуется глобальное распределение высотных разрядов – «спрайтов» за 2016 год. В качестве первичных данных используется архив глобальной грозопеленгационной сети WWLLN (World Wide Lightning Location Network), из которой выбрана информация о положении, времени, мощности (пиковом токе) для всех достаточно мощных разрядов облако-Земля. Разряды разделены по полярности (положительные/отрицательные), для каждой полярности предложена параметризация вероятности инициации спрайтов. При расчетах выделены ночные события и учтена вероятностная природа инициации спрайта в зависимости от ICM (импульсный дипольный момент).

Ключевые слова: высотные разряды, спрайты, глобальное распределение, WWLLN, ICM, система грозопеленгации.

Наблюдения высотных разрядов проводятся уже более 25 лет, и на сегодня накоплен большой объем экспериментальных данных. Согласно общепринятой классификации, принято выделять джеты (в том числе гигантские джеты и голубые стартеры), спрайты, эльфы и гало[1]□. Особенно интересны для изучения спрайты - крупнейшие разряды по геометрическим характеристикам: характерный объем составляет около 10 000 куб. км. Наблюдения спрайтов являются уникальным инструментом изучения области их развития - мезопаузы и её окрестностей, малодоступных для исследования. Численные модели спрайтов [2]□ показывают, что они, по крайней мере локально, вносят значительное возмущение в химический состав мезосферы и значительно возмущают ее проводимость, что может оказать влияние на локальные параметры глобальной электрической цепи. Влияние может оказаться недооцененным ввиду возможности последовательной инициации спрайтов над особо мощными мезомасштабными системами. Свидетельства влияния отдельных спрайтов на параметры мезосферы обуславливают актуальность вопроса о роли порождаемых спрайтами глобальных возмущений мезосферы, для ответа на который необходимо развить модель глобального распределения спрайтов.

Как показано в данном исследовании, использование данных WWLLN делает возможным создать модель инициации спрайтов и изучить их глобальное распределение. Оптические наблюдения с Земли, самолетов и спутников свидетельствуют о регулярном появлении спрайтов над областями высокой молниевой активности в ночное время. Ввиду



малой светимости спрайтов в оптическом диапазоне, возможность их возникновения в дневное время сейчас подтверждается только косвенными измерениями в низкочастотном диапазоне и численным моделированием [3]. Надежной статистики и параметров глобального распределения спрайтов на основе данных наблюдения в настоящее время не существует, так как создание глобальной системы наблюдения за спрайтами потребовало бы организации постоянных наблюдений в многих точках атмосферы, что недостижимо средствами современных космических аппаратов и зондов. В настоящий момент круг источников измерений характеристик спрайтов ограничивается региональными наблюдательными кампаниями и отдельными фактами регистрации высотных разрядов, а также спутниковыми наблюдениями. Данные для оценки глобального распределения интенсивности высотных разрядов дали наблюдения, проводимые в течение нескольких лет на спутнике FORMOSAT-2. За первые 4 года наблюдений (2004-2007) в поле зрения спутника попало 633 спрайта, 5 434 эльфов, 657 гало и 13 гигантских джетов (Chen et al., 2008) □, что составляет лишь малую долю от общего количества TLEs, инициированных на Земле за период наблюдения. Сделана оценка частоты появления высотных разрядов на основе этих данных [4], согласно которым ежеминутно на земле инициируется около 1 спрайта (около 1400 событий ежедневно).

По современным представлениям, основной параметр, определяющий возможность инициации спрайтов — дипольный момент нескомпенсированного заряда (impulse charge moment, ICM). В предположении достаточно высокой проводимости земли можно представить поле нескомпенсированного заряда в облаке, возникающего при протекании тока в разряде облако — Земля, в дипольном приближении; дипольный момент при этом равен произведению заряда, перенесенного в молниевом разряде, и высоты, с которой переносится этот заряд. Электрическое поле диполя спадает по степенному закону с увеличением расстояния до него, а пробойное поле в атмосфере зависит от давления и спадает с высотой экспоненциально. На высотах около 75–80 км в ночных условиях поле нескомпенсированного заряда начинает превышать пробойное и создаются условия для инициации спрайта. Таким образом, для параметризации спрайтов необходимо из данных глобальной сети WWLLN выделить наиболее мощные события, предложить параметризацию для ICM в зависимости от пикового тока разряда и его полярности, выделить ночные условия и учесть вероятностный характер инициации спрайтов.

Для построения модели сделаны следующие шаги.

1. Выбраны первичные данные по распределению молний из системы WWLLN. В выборку попали только достаточно мощные разряды с пиковым током более 15 кА.

2. Наложение маски ночных событий по локальному заходу солнца на высоте 70 км.

3. Распределение разрядов по полярности: принимаем количество положительных разрядов $R=10\%$ в соответствии с данными NLDN и EUCLID.

4. Параметризация величины ICM от значения пикового тока для положительных и отрицательных разрядов облако-земля. В работе [5] приведена статистика для 2126 отрицательных разрядов с силой тока более 80 кА произошедших на площади 100x100 км по данным системы NLDN. Для пикового тока 100 кА наблюдается разброс ICM от 40 до 400 Кл*км, со средним значением около 50 Кл*км. Принимая во внимание эти данные, мы предлагаем аппроксимировать зависимость среднего ICM от пикового тока по формуле $\langle ICM \rangle = 7\sqrt{I}$ для отрицательных разрядов и $\langle ICM \rangle = 20\sqrt{I}$ для положительных, а отклонение величины ICM при конкретном значении тока будем учитывать с помощью формулы Релея.



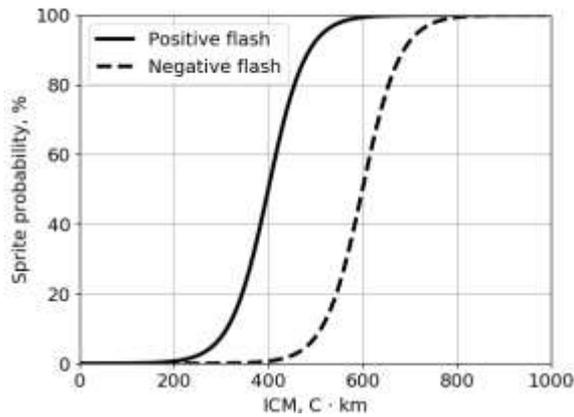


Рис. 1 Параметризация вероятности инициации спрайта для положительного и отрицательного молниевых разряда в зависимости от ICM.

5. Определение вероятности инициации спрайта в зависимости от ICM для положительных и отрицательных разрядов. Наличие мощной вспышки облако-земля, переносящей значительный заряд и создающей большой импульсный дипольный момент нескомпенсированного заряда, является необходимым, но вовсе не достаточным условием инициации спрайта. Еще больше различий вносит полярность молниевых разрядов в тропосфере: для положительных молниевых разрядов порог значительно меньше, чем для отрицательных. Этим объясняется редкость спрайтов от отрицательных разрядов [6].

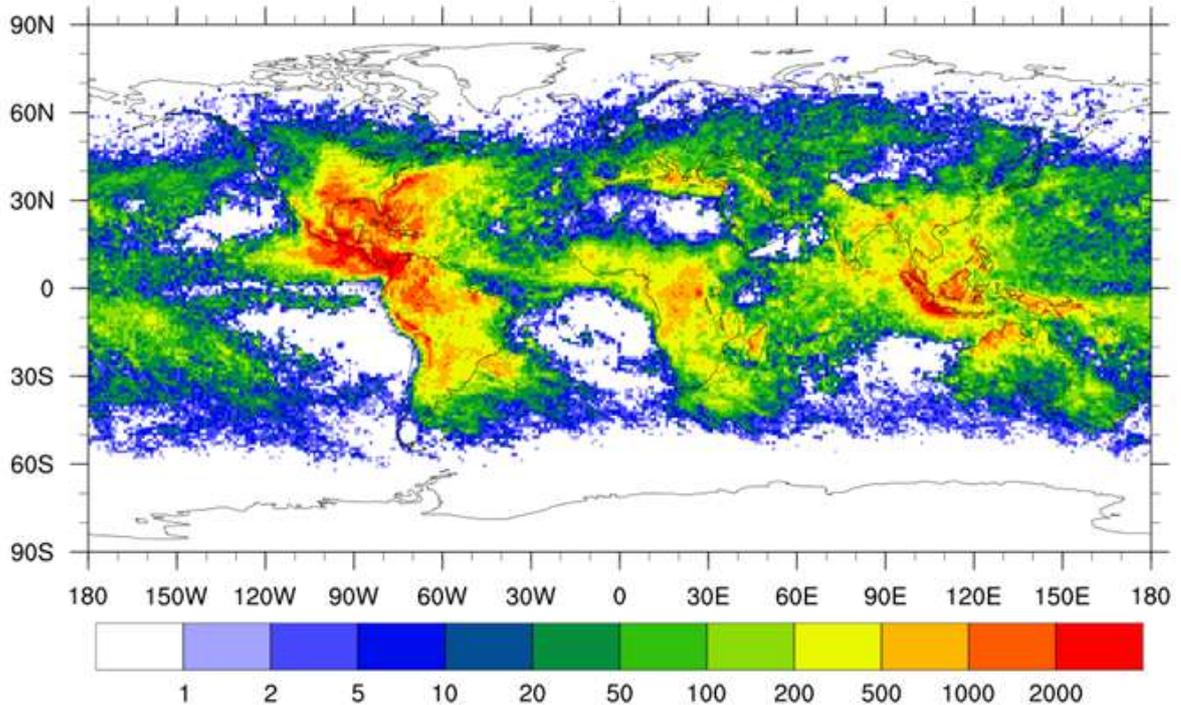


Рис. 2. Глобальное распределение спрайтов.

В работе [7] проведены численные расчеты, показывающие, что минимальное значение для инициации спрайта для положительного разряда составляет 200 Кл*км, для отрицательного спрайта 320 Кл·км. В то же время отмечается, что наличие неоднородностей в мезосфере может привести к инициации спрайтов при меньших значениях ICM. Величина ICM в 500 Кл·км и выше практически гарантированно приводит к развитию ночного спрайта для положительного разряда. Опираясь на эти данные, для моделирования мы взяли зависимости, показанные на Рис. 2. Кривая для отрицательных спрайтов является сдвинутой относительно кривой для положительных спрайтов на 200

Кл·км. Таким образом, мы оставляем возможность инициации спрайтов положительных спрайтов вплоть до 100 Кл·км, а отрицательных до 300 Кл·км, но вероятность этих событий очень мала.

6. Результаты моделирования представлены на Рис.2. По нашим расчетам в году количество спрайтов составляет $1,36 \cdot 10^6$, что в среднем эквивалентно 3700 спрайтов каждый день, что несколько превышает общепринятые значения и их следует воспринимать как верхнюю границу возможного ежедневного количества спрайтов в глобальном масштабе.

В работе предложена параметризация для построения глобального распределения спрайтов по данным системы WWLLN. Учтен вероятностный характер инициации спрайта в зависимости от рассчитанного дипольного момента. Проанализировано глобальное распределение спрайтов по месяцам и в целом за год, с территориальным разделением суша/океан. Показано, что полученные в рамках предложенных параметризаций области с высокой спрайтовой активностью совпадают с таковыми по результатам наблюдательных компаний в конкретные сезоны (например, наблюдения в осенне-зимний период над акваторией Средиземного моря, зимние грозы в Японии и т.д.). В то же время количество спрайтов, полученное в расчетах больше общепринятых значений, основанных, в частности, на данных спутниковых наблюдений ISUAL, в то время как при анализе спутниковых данных указывается, что множество TLE не регистрируются из-за несовершенства аппаратуры [1]. Полученные результаты по глобальному распределению спрайтов следует интерпретировать как верхнюю границу их возможного количества.

Список литературы:

1. Pasko V.P. Recent advances in theory of transient luminous events // J. Geophys. Res. Sp. Phys. 2010. Vol. 115, № 6.
2. Евтушенко А.А., Кутерин Ф.А. Самосогласованная модель ночного спрайта // Изв. ВУЗов – Радиофизика. 2015.
3. Winkler H., Notholt J. The chemistry of daytime sprite streamers – a model study // Atmos. Chem. Phys. 2014. Vol. 14, № 7. P. 3545–3556.
4. Chen A.B. et al. Global distributions and occurrence rates of transient luminous events // J. Geophys. Res. Sp. Phys. 2008. Vol. 113, № 8.
5. Li J. et al. Charge moment change and lightning-driven electric fields associated with negative sprites and halos // J. Geophys. Res. Sp. Phys. 2012. Vol. 117, № 9. P. 1–9.
6. Boggs L.D. et al. An analysis of five negative sprite-parent discharges and their associated thunderstorm charge structures // J. Geophys. Res. Atmos. 2016. Vol. 121, № 2. P. 759–784.
7. Qin J., Celestin S., Pasko V.P. Dependence of positive and negative sprite morphology on lightning characteristics and upper atmospheric ambient conditions // J. Geophys. Res. Sp. Phys. 2013. Vol. 118, № 5. P. 2623–2638.

MODELING THE GLOBAL DISTRIBUTION OF HIGH-ALTITUDE DISCHARGES

Andrey A. Evtushenko, Marina S. Kinyapina

Abstract. The work examines the global distribution of high-altitude discharges - "sprites" for 2016. The archive of the global lightning location network WWLLN (World Wide Lightning Location Network) is used as the primary data, from which information on position, time, power (peak current) is selected for all sufficiently powerful cloud-to-Earth discharges. Lightning discharges are separated by polarity (positive / negative), for each polarity a parameterization of the probability of sprite initiation is proposed.



In the calculations, night events were highlighted and the probabilistic nature of sprite initiation was taken into account, depending on the ICM.

Keywords: high-altitude discharges, sprites, global distribution, WWLLN, ICM, lightning detection system.

