

ВОЗДЕЙСТВИЕ ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДОВ НА ОПТИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ в горной местности и вблизи высотных сооружений

С. Соколов, МТУСИ

В последние годы в изучении молнии сделан ряд важных открытий. Оказалось, что в процессе развития молниевых разрядов возникают сильные гамма- и рентгеновское излучения, которые представляют опасность для оптических кабелей. Согласно наблюдениям, особенно интенсивное гамма-излучение обнаруживается при восходящих молниях, т.е. молниевых разрядах, развитие которых начинается от земли к облаку, что характерно для высотных сооружений, молниеотводов и в горной местности. В работе рассматриваются обстоятельства развития таких разрядов, оценка их числа и возможное воздействие на оптический кабель.

В последнее десятилетие в изучении молнии сделан ряд поразительных открытий. Если в предыдущие почти 300 лет изучения молнии внимание обращалось исключительно на большую величину тока в канале молнии, достигающую сотен килоампер, то сейчас в центре внимания оказались гамма- и рентгеновское излучения молнии. Краткая история открытия такова. При изучении гамма-излучения нейтронных звезд со спутников в 1991 году было замечено яркое миллисекундное гамма-излучение со стороны Земли. Первым заметившим во время грозы излучение с большой энергией был Моор (2001 г.), но у него не было соответствующих приборов для идентификации излучений. В 2002 году NASA запустило солнечный спектральный телескоп RHESSI для исследования излучений Солнца. Он неожиданно начал фиксировать вспышки гамма-излучения со стороны Земли. В 2003 году Джозеф Двайер

и его сотрудники засекли мощный всплеск гамма-излучения из грозового облака продолжительностью 0,3 мс. С августа 2008 по декабрь 2010 года космическим телескопом "Ферми" было зафиксировано примерно 150 всплесков гамма-излучения, возникавшего где-то поблизости, причем всегда во время сильных гроз на Земле. В дальнейшем телескоп фиксировал до 500 вспышек в год. В 2011 году телескопом "Ферми" были открыты кругосветные потоки позитронов, идущих вокруг силовых линий магнитного поля Земли. В дальнейшем было установлено, что при процессах образования грозных разрядов внутри облака одновременно возникают рентгеновское, гамма-излучение и электрон-позитронные пары. Энергия излучаемых квантов может достигать величины 100 МэВ. В последующие несколько лет США, Европа и Россия планируют запуск специальных зондов для исследования этих процессов.

ОБРАЗОВАНИЕ ГРОВОГО РАЗРЯДА

Не рассматривая всего процесса появления грозовых облаков, заметим, что при образовании облака его нижняя часть обычно имеет отрицательный заряд. На поверхности Земли под облаком индуцируется положительный поверхностный заряд, и возникает напряженность электрического поля между облаком и Землей. При достижении критической напряженности поля в нижней части облака начинается ионизация, и возникают лавины зарядов, которые, объединяясь, порождают стримеры, направленные в сторону Земли. Образуется канал лидера, движущийся по направлению к Земле. Характерной особенностью лидера является его прерывистость. Продвинувшись на несколько десятков метров, лидер останавливается, и только по прошествии нескольких десятков микросекунд движение возобновляется. Развитие последующих ступеней происходит аналогично, т.е. лидер продвигается к земле ступенями, и поэтому он получил название ступенчатого лидера. В развитии лидера участвуют ударная и термоионизация молекул. Иногда от основного канала ответвляются в стороны новые ветви, которые в дальнейшем могут послужить основой для разветвленного удара молнии одновременно в несколько различных точек (обычно две-три, но бывает и больше) на поверхности Земли. В канале лидера образуется плазма, и из облака в канал начинает стекать отрицательный заряд. Вследствие ступенчатости и относительно медленного продвижения лидера к Земле (средняя скорость ступенчатого лидера примерно равна 0,15 м/мкс) величина тока в канале невелика и составляет всего несколько десятков ампер. Свечение канала в видимом диапазоне в это время очень мало. При достижении лидером Земли происходит короткое замыкание с положительным зарядом на поверхности и начинается главная стадия

разряда молнии, заключающаяся в нейтрализации отрицательных зарядов лидера и примыкающих частей облака. Эта часть молнии характеризуется большим током, достигающим величины десятков и даже сотен килоампер, и сопровождается сильным магнитным полем, ярким свечением канала вследствие его нагрева и звуковыми эффектами расширяющихся нагретых газов. Скорость развития главного разряда достигает величины порядка сотни м/мкс, так что длительность главного разряда составляет всего несколько десятков микросекунд, тогда как длительность лидерной стадии может составлять тысячи микросекунд. После протекания главного разряда канал молнии остается еще некоторое время ионизированным и проводящим, и по нему могут развиваться повторные разряды с неразрядившихся частей облака. Период угасания может длиться несколько десятков миллисекунд. В это время по каналу протекают длительные остаточные токи порядка нескольких десятков ампер. Как уже говорилось, разветвленность разряда может возникать уже на лидерной стадии, но иногда к моменту повторного разряда канал в своей нижней части может развалиться, и дальнейшее развитие разряда пойдет по другому пути. Как видим, из общей длительности молнии в несколько десятков и даже сотен миллисекунд главная стадия, сопровождаемая большим током, занимает всего пару сотен микросекунд, но именно она привлекала наибольшее внимание исследователей из-за возможных серьезных последствий при протекании большого тока.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ГАММА- И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЙ

Исследованиями было обнаружено, что в процессе развития лидерной стадии возникает рентгеновское излучение в виде дискретных

интенсивных всплесков синхронно с образованием шагов лидера, однозначно демонстрируя, что источник рентгеновского излучения тесно связан со ступенчатым процессом. Работы Моора и Двайера [1, 2], проведенные в 2001-2004 годах, показали, что энергия излучения достигает в некоторых случаях сотен кэВ. Процесс эмиссии рентгеновских квантов кратковременен и всегда связан с лидерной стадией. Причины, по которой поле вырастает до весьма больших величин, и точный механизм быстрого пробоя, при котором возникает радиация с большой энергией, к сожалению, пока ясны не полностью. Рентгеновское излучение возникает примерно за 0,9...1,2 мс до главного разряда и заканчивается близко к началу возвратного удара. Это время начала последней ступени лидера. Особенно сильные излучения наблюдаются при лидерном процессе, направленном вверх.

Лидерный процесс может быть как нисходящим отрицательным, начинающимся от облака, так и восходящим положительным, начинающимся с земли. Восходящий лидер обычно возникает при уменьшенном расстоянии между облаком и землей, например, от высокой структуры (молниеотвода, небоскреба, башни) или в горах. При исследовании восходящих молний на уровне поверхности Земли были обнаружены также сильные излучения в виде гамма-квантов с энергией, превышающей 10 МэВ. Начало гамма-вспышки происходит преимущественно тогда, когда восходящий положительный стреловидный лидер достигает заряда облака в нескольких километрах над Землей. Если учесть, что гамма-излучение очень сильно ослабляется атмосферой, то можно представить, какой большой величины были гамма-кванты в момент возникновения. Вспышки излучения наблюдались и на расстоянии в несколько сот метров от него, т.е., вероятно, в соседнем облаке. Наблюдались вспышки, состоящие из нескольких сотен квантов с периодом порядка 300 мкс. Поскольку затухание гамма-излучения в атмосфере велико, а возникает оно на высоте 6-8 км, первоначальная интенсивность в источнике может быть очень велика. Вследствие ослабления в воздухе плотность потока фотонов на уровне земли невелика и составляет всего единицы фотонов (с энергией в несколько МэВ) на квадратный сантиметр. При высоких энергиях электроны

движутся по спрямленной линии в лавине, получая под действием электрического поля большую энергию, чем теряют при столкновениях. Эти убегающие электроны ускоряются почти до скорости света и пролетают несколько сот метров и даже километры до столкновения. Сталкиваясь с молекулой газа в воздухе, они выбивают другие электроны. Возникает экспоненциально возрастающая лавина электронов высокой энергии. Мощность рентгеновского и гамма-излучений сильно возрастает (до 100 МэВ). Если бы наш глаз мог видеть в этом спектре частот, то излучение молнии нам казалось бы более ярким и длительным, чем то, что мы наблюдаем. В свою очередь, гамма-кванты, взаимодействуя с ядрами атомов в воздухе, рождают электрон-позитронные пары, направляющиеся вверх, которые в дальнейшем захватываются силовыми линиями магнитного поля Земли. И действительно, с помощью приборов зафиксированы пучки позитронов на большой высоте.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ

Известно, что ионизирующие излучения оказывают серьезное влияние на оптические кабели, ухудшая их свойства. В настоящее время магистральная связь практически полностью осуществляется с помощью оптических кабелей. Оптические кабели активно внедряются и в сетях доступа. Проложенные в грунте или подвешенные на опорах, они при грозовых разрядах могут подвергаться воздействию не только электромагнитного поля и большого тока, но и в некоторых случаях гамма- и рентгеновского излучений, в особенности кабели, расположенные в горах или вблизи молниеотводов и высотных сооружений. В некоторых случаях вблизи заряженных облаков могут оказаться и летательные аппараты. Хотя длина оптических кабелей внутри аппарата небольшая, но амплитуда воздействия вследствие близости к источнику может быть велика. До недавнего времени о таких воздействиях ничего не было известно, но последние открытия в области исследования молнии заставляют обратить внимание на эту проблему.

Наиболее чувствительной частью оптического кабеля является оптическое волокно. Действие радиации на волокно разделяется на три основные категории:

- образование так называемых центров окраски;

Сведения об эффективной высоте некоторых структур и количестве восходящих молний					
Объект	Высота башни H_S , м	Высота горы H_M , м	Эквивалентная высота H_E , м	Процент восходящих молний	
				по формуле (1)	фактически
Башня на горе Сан-Сальваторе (Швейцария)	70	640	380	84	74
Башня на горе Orsa (Швейцария)	40	600	240	59	60
Башня CSIR (Южная Австрия)	60	80	130	27	33
Башня Gaisberg (Австрия)	100	800	630	100	99
Башня на горе Santis (Швейцария)	125	900	820	100	–

- изменение плотности волокна;
- изменение свойств полимерных материалов.

При воздействии излучения в материале волокна возникают процессы смещения и образования дефектов решетки. На этих дефектах создаются электроны проводимости и дырки, комбинации которых с вакансиями создают центры окраски. Центры окраски поглощают свет в некоторых частях спектра, что и приводит к дополнительному затуханию. В случае полимеров ионизирующее излучение существенно изменяет макроскопические свойства полимеров, нарушая связи полимерных цепочек.

Соотношение между числом нисходящих и восходящих лидеров

В горах и вблизи высотных сооружений и молниеотводов повышается вероятность образования положительного восходящего лидера молнии и возникновения гамма- и рентгеновского

излучений. Оценим число разрядов, начинающихся с земли к облаку, при которых наиболее вероятно образование рентгеновских и гамма-лучей. Процентное число таких разрядов (P_u) дается теоретической формулой Эриксона [3]:

$$P_u = 52,8 \ln H_S - 230, \quad (1)$$

где H_S – высота структуры, м.

Это значит, что по формуле (1) $P_u = 0$ при $H_S \leq 78$ м и $P_u = 100\%$ при $H_S \geq 518$ м.

Структуры высотой ниже 78 м по этой формуле поражаются только нисходящими молниями, которые, как правило, отрицательны. Формула (1) выполняется не всегда четко, и на практике приближенно считают, что $P_u = 0$ при $H_S < 100$ м и $P_u = 100\%$ при $H_S > 500$ м. Наблюдения и измерения показали, что восходящие разряды, например, с Empire States Building высотой 410 м, составляют 50%; с Останкинской телевизионной башни высотой 540 м – 27%. Если башня

или структура находятся на вершине горы, то формула (1) искажается. Вместо H_s следует использовать эффективную высоту H_E . В таблице приведены сведения об эффективной высоте некоторых структур и сравнение расчетного числа восходящих молний (с учетом эффективной высоты) с их реальным числом.

По оценке Базеляна [4], в реальных условиях восходящие молнии возникают от объектов высотой 150–200 м. При высоте около 100 м восходящие молнии составляют около 10%, а для объектов выше 300 м доля восходящих молний составляет 80%. Восходящие молнии стартуют только от вершины башни. Случайные удары в боковые поверхности характерны только для нисходящих молний. Общее число ударов определяется зоной с радиусом $R \approx 3H$. Восходящий разряд состоит из положительного лидера, следующего за ним длительного положительного тока малой величины, на который могут быть наложены всплески тока до нескольких сотен ампер, и уже потом следует ток главного разряда большой амплитуды.

Удельное количество ударов p вблизи вершины и в долине существенно отличаются друг от друга: по данным [5], в Киргизии на хребте $p = 1$ уд/(км²·год), в долине $p = 0,18$ уд/(км²·год). Экранирующее действие склонов гор на уменьшение числа ударов можно оценить, согласно [5], по формуле:

$$k_e = B/(B+4h \sin \alpha), \quad (2)$$

где B – ширина дна ущелья; h – разница высот гребня и дна; α – крутизна склона.

По оценке [6] и [7], коэффициент экранирования в горных условиях заключен примерно в пределах от 2/3 (вблизи склона) до 1/3 (в узком ущелье).

УЧЕТ ЭКРАНИРУЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ СООРУЖЕНИЙ В ГОРОДСКИХ И ПРИГОРОДНЫХ УСЛОВИЯХ

Если оконечная станция расположена в пригородном районе, который в свою очередь представляет горную местность, то расчет вероятности повреждения кабелей токами молнии подводных кабелей может проводиться по упрощенной методике МСЭ [8]. Эта методика предполагает использование ряда коэффициентов: коэффициента воздействия, коэффициента среды, коэффициента прокладки и известных ранее коэффициентов экранирования кабеля с заземленной и незаземленной обложками. Учитывая вышесказанное, необходимо также обратить внимание на возможную подверженность оптических кабелей гамма- и рентгеновскому излучениям молнии, в особенности кабелей, идущих к вершине горы или сооружения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение вероятности повреждения оптических кабелей ударами молнии должно не только включать в себя расчет опасности от больших токов молнии, но также принимать во внимание и возможность повреждения кабелей ионизирующими излучениями. Большие токи воздействуют не только на кабели с металлическими элементами в конструкции, но также и на чисто диэлектрические кабели, в которых под действием сильного внешнего поля может происходить поворот плоскости поляризации распространяющегося света, что особенно опасно для аппаратуры, чувствительной к поляризации, например, для систем, использующих ортогональное мультиплексирование. Кабели в горных районах и вблизи высотных сооружений могут подвергаться дополнительному воздействию гамма-излучения, ухудшающего свойства кабеля. Например, волокна без водяного пика более чувствительны к ионизирующим облучениям по сравнению с традиционными оптическими волокнами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dwyer J.R. et al. X-ray bursts associated with leader steps in cloud-to-ground lightning. – Geophysical Research Letters, 2005, v.32, L01803.
2. Dwyer J.R. et al. A ground level gamma-ray burst observed with rocket-triggered lightning. – Geophysical Research Letters, 2004, vol. 31, L05119.
3. Rakov V.A. Upward Lightning Discharges: an Update. The 7th Asia-Pacific Intern. Conf. on Lightning. 2011, November 1-4, Chengdu, China, p.304–307.
4. Базелян Э.М. Особенности молниезащиты высотных сооружений. Вторая российская конф. по молниезащите. – М.: 2010.
5. Мезгин В.А. Закономерности распределения характеристик молнии на территории горного района. Вторая российская конф. по молниезащите. – М.: 2010.
6. Шостаков И.В. Исследование и разработка метода расчета и средств защиты кабелей связи при гальваническом влиянии высоковольтных линий в горных условиях. Дис. на соиск. учен. степени канд. тех. наук. – Московский институт связи, 1989.
7. Соколов С.А. Электромагнитные воздействия на современную инфраструктуру связи. – М.: Медиа паблишер, 2009.
8. МСЭ-Т. Рекомендация К-46.
9. Соколов С.А. Рентгеновское и гамма-излучение молнии и его воздействие на оптические волокна. – Фотон-экспресс, октябрь 2012, с.28–30.

