

ГЕОГРАФИЯ

УДК 551.594.221

Т. В. Ершова, В. П. Горбатенко

ПАРАМЕТРЫ МОЛНИЕВОЙ АКТИВНОСТИ ПО ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ¹

Представлены исследования временных и пространственных характеристик молниевой активности (плотность разрядов молнии в землю, полярность и сила тока молний) в умеренных широтах Северного полушария Земли. Исследования включают более десяти миллионов разрядов молнии в землю на территории Германии за период 1995–2006 гг.

Ключевые слова: молниевые разряды, плотность разрядов молнии в землю, сила тока молний, положительные и отрицательные разряды молний.

Нормативные документы по молниезащите энергетических объектов, зданий и сооружений базируются на знании физических процессов, протекающих во время разрядов молний и закономерностей пространственного распределения грозовой активности. Параметры молний, используемые в них, получены на основе результатов прямых измерений, которые проводились на специально оборудованных исследовательских полигонах. Особенности пространственного распределения плотности разрядов молний в землю оценивались по результатам визуальных наблюдений на метеорологических станциях (по числу грозовых дней и часов). Самые первые полные исследования параметров молний (время разгрузки разряда, полярность) принадлежат К. Berger [1] в Швейцарии на горе Сан-Сальватор. Результаты этих исследований до сих пор активно цитируются в научной литературе. В России аналогичные исследования проводили Э. М. Базелян и Б. Н. Горин [2] по данным приборов, расположенных на Останкинской телебашне. В Америке параметры молний исследовались на знаменитом нью-йоркском небоскребе Empire State Building высотой около 410 м.

С установкой первых систем местоопределения молний в конце 70-х гг. прошлого столетия появилась возможность производить статистические оценки плотности разрядов молнии в землю, полярности и силы тока молний на значительных территориях с различными ландшафтами. Системы местоопределения молний получили широкое распространение для решения как различных научно-исследовательских, так и прикладных коммерческих задач. Очень важную практическую роль они играют в проблеме охраны лесов от пожаров. В настоящее время системы местоопределения

молний различных модификаций используются в более чем 40 странах мира. В России в 2008–2009 гг. на базе Высокогорного геофизического института (г. Нальчик, Кабардино-Балкария) установлено четыре грозорегистратора типа SAFIR. Период накопления статистического материала о параметрах молниевой активности составляет не менее 10 лет. Значительная стоимость данных систем и огромная протяженность нашей страны не позволяют повсеместно внедрить на практике системы местоопределения молний по территории России в ближайшее время. Поэтому необходимо проводить анализ параметров молниевой активности по данным мировых систем, которые действуют уже на протяжении 20–30 лет, и результаты исследований переносить на территорию России. Сотрудники политехнического и педагогического университетов г. Томска совместно с компанией «Сименс» проводили исследования по параметрам грозовой активности в период 1995–2006 гг. [3–5]. Средние параметры молний, полученные при помощи системы местоопределения в Германии, могут служить основой для оценки характеристик молний над всей территорией умеренных широт, включая Россию.

Целью данного исследования является статистический анализ пространственно-временных характеристик молниевой активности (плотности разрядов молнии в землю, силы тока молний и соотношения положительных и отрицательных молний) на основе данных наземной системы местоопределения молний LPATS.

Материал для исследований предоставлен отделом местоопределения молний компании «Сименс» за период 1995–2006 гг. На территории Германии действует система местоопределения мол-

¹ Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по науке и образованию (госконтракт № 02.444.11.7275; исполнитель – ГОУ ВПО ТГПУ; руководитель темы – Т. В. Ершова).

ний LPATS (Lightning Position And Tracking System). В системе 13 сенсоров удалены друг от друга на расстояние от 200 до 300 км и соединены линиями связи с центральным процессором в г. Карлсруэ. Координаты точки удара молнии в землю определяются исходя из времени прихода сигналов на разнесенные антенны. Синхронизация времени на субмикросекундном уровне происходит с помощью навигационных спутников GPS. Внутри исследуемой территории точность измерений достигает 250 м и уменьшается на ее границах до 1 000 м [6]. Эффективность определения наземных молний составляет 85–90 %. С помощью системы можно определить координаты точки удара молнии (широта и долгота), плотность разрядов молнии в землю (N , разр/км²год), полярность и силу тока молнии между облаком и землей.

Пространственное распределение плотности разрядов молний. Планирование молниезащитных мероприятий хозяйственных объектов требует знания мезомасштабно-пространственного распределения значений плотности разрядов молнии в землю (N , разр/км²год) над конкретными районами. В то же время на пространственное распределение значений N существенное влияние оказывает множество факторов. В первую очередь это синоптические условия, обуславливающие грозы, а также географическое положение, орографические и температурно-влажностные характеристики территории, свойства подстилающей поверхности. Как и над другими регионами, средние многолетние значения плотности разрядов молнии над исследуемой территорией распределены крайне неравномерно. По значениям N можно выделить более однородную северную (выше 51-й параллели) и неоднородную южную территории Германии. Северная и южная территории Германии значительно отличаются и по орографическим условиям: Северо-Германская низменность на севере и неоднородная южная часть, включающая горы, плоскогорье и речные долины.

Над северной территорией на общем фоне пространственной изменчивости значений плотности молний около 2 разр/км²год выделяются районы со значениями плотности разрядов около 3 разр/км²год, площадь таких очагов не превышает 3 000 км². Вдоль побережья Северного и Балтийского морей значения N не превышают 1.5 разр/км²год. Над поверхностью морей N снижается и составляет менее 1 разр/км²год.

Над южной частью значения N изменяются контрастнее – от 1 до 7 разр/км²год. Выделяется два основных очага с высокими значениями плотности разрядов молнии в землю (от 5 до 7 разр/км²год) – в восточной окраине над Рудными горами и на юго-западе страны восточнее гор Шварцвальд. Горы Шварцвальд создают препятствие для ведущего

юго-западного потока, активизируя тем самым грозовую деятельность в предгорных подветренных районах.

Соотношения положительных и отрицательных молний. Полярность молний принято определять по знаку заряда, переносимого по каналу молнии. Выделяют многокомпонентные отрицательные разряды молнии и однокомпонентные положительные молнии [1, 2]. Повышенный интерес в последнее время к исследованию положительных молний [7–10] обусловлен тем, что немногочисленные, по сравнению с отрицательными, положительные разряды имеют превосходящую на порядок силу тока – около 300 кА [7]. Также с положительными разрядами облако-земля исследователи [8] связывают спрайты – яркие вспышки красного цвета на высотах от 20 до 100 км, которые привлекают внимание геофизиков начиная с 90-х гг. прошлого века. Исследователи [9] отмечают большую опасность положительных грозных разрядов по сравнению с отрицательными с точки зрения воздействия на промышленные объекты и возникновения лесных пожаров.

Над территорией Германии за период с 1995 по 2006 г. удалось сформировать базу данных по характеристикам более двух миллионов молний, из них положительные разряды в среднем за год составляли 17 %, что хорошо согласуется с результатами исследования в Австрии [10]. Наибольшая доля положительных разрядов (более 21 %) регистрировалась в 2001 и 2006 гг. (рис. 1).

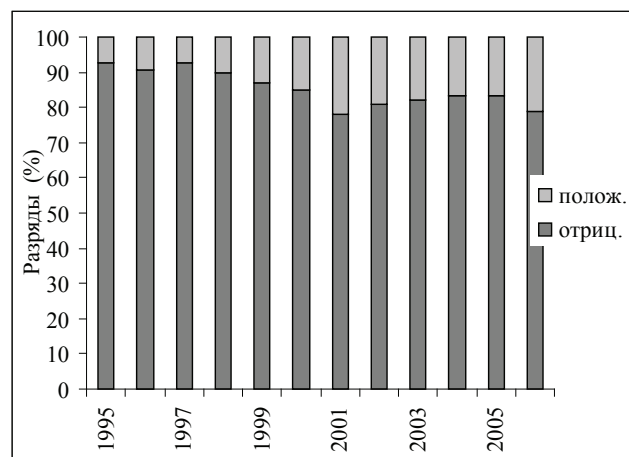


Рис. 1. Соотношение отрицательных и положительных молний по годам

Отметим, что эти годы существенно отличаются и по количеству разрядов – более чем в 1.5 раза. В 2006 г. было зарегистрировано рекордное количество молний – более 1 272 тыс., а в 2001 г. одно из наименьших значений за исследуемый период – 792 тыс. разрядов. Во внутригодовом ходе (рис. 2) с мая по сентябрь отмечается уменьшение доли положи-

тельных молний до 15 %. В период с сентября по апрель доля положительных разрядов увеличивалась до 19 %. Приведенные данные по положительным молниям в целом согласуются с исследованиями Э. М. Базеляна [11], который отмечает, что положительные молнии составляют в среднем около 10 %, а в тропических и субтропических районах, особенно зимой, могут достигать и 50 %.

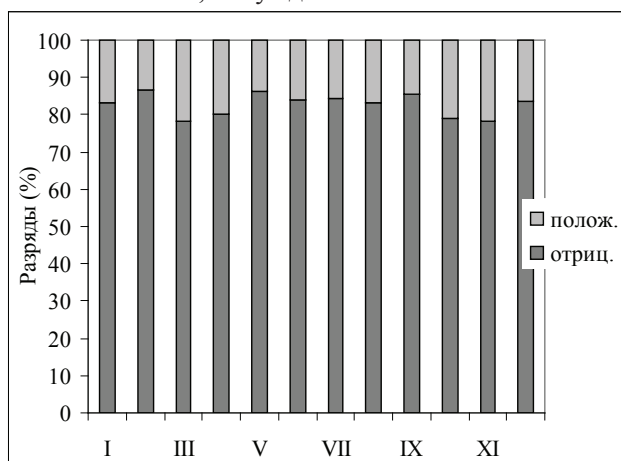


Рис. 2. Соотношение положительных и отрицательных молний по месяцам года

Следовательно, при всем разнообразии физико-географических условий территории России количество столь опасных положительных молний наверняка не выйдет за пределы 15–20 % общего количества молний. Возможно, их распределение по территории будет неравномерно, и гораздо чаще такие молнии будут встречаться в горных районах.

Сила тока молний. В реальных условиях невозможно измерить силу тока молний. Поэтому для определения этой величины проводят эксперименты с триггерной молнией, т. е. молнией, искусственно вызванной с помощью небольшой ракеты с прикрепленной тонкой заземленной проволокой. В системе LPATS сила тока молнии оценивается расчетным методом по приходящему сигналу [6]. Нормализованный сигнал ($RNSS$ – the range normalized signal strength) определяется по формуле

$$RNSS = I_{meas} \left(\frac{l}{100} \right)^{1.13}, \quad (1)$$

где I_{meas} – измеренный сигнал; l – расстояние от сенсора до точки удара молнии в землю.

Величина $RNSS$ переводится в килоамперы по формуле

$$I_{peak} = 0.185 RNSS. \quad (2)$$

Анализируя историю получения данной зависимости, можно отметить, что сила тока молнии оце-

нивается по величине сигнала магнитного поля от индивидуальных сенсоров системы местоопределения молнии. Экспоненту в формуле (1), равную 1.13, получили R. E. Orville [12] и V. H. Idone [13]. Эмпирическая линейная зависимость (2) с использованием данных триггерной молнии, которая регистрировалась всеми сенсорами внутри круга с диаметром 625 км, получена в [13]. Проводя эксперименты с триггерной молнией за период с 2001 по 2003 г. в США, J. Jerauld и V. Rakov [14] установили, что данные по силе тока молний, рассчитываемые в системе NLDN (Национальная система местоопределения молнии), занижены примерно на 18 %. Отметим, что LPATS – аналог системы NLDN, поэтому можно предположить, что оцениваемые в рамках системы LPATS значения силы тока также являются несколько заниженными.

Для четырех пунктов (районы городов Кляйн Фельдберг, Мюнхен, Франкфурт-на-Майне и Штутгарт) были проанализированы статистические характеристики силы тока за 6-летний период. Радиус обзора в каждом случае составлял 10 км (площадь 314 км²). Количество анализируемых для разных пунктов разрядов молний в землю составляло от 2250 до 3170. Средние значения силы тока молний варьируют от 19 до 23 кА. Величина доверительного интервала с 95 % уровнем надежности приведена в табл. 1.

Таблица 1
Статистические характеристики силы тока молний (кА)

Характеристики	Города			
	Кл. Фельдберг	Франкфурт-на-Майне	Мюнхен	Штутгарт
Объем выборки	2250	2984	3704	3170
Среднее значение	20.3	21.1	19.0	23.1
Среднеквадратическое отклонение	15.8	16.7	16.3	15.0
Доверительный интервал	20.3±0.6	21.1±0.6	19.0±0.5	23.1±0.5
Максимальное значение	159	144	225	186

Максимальные значения силы тока не превышали 225 кА. В 80 % случаев величина силы тока не превосходит 30 кА и в 95 % не превосходит 50 кА (табл. 2).

Анализируя пространственное распределение молний с различной силой тока, можно отметить, что на 25 % территории средние значения силы тока молний обеих полярностей составляют 10–20 кА. В интервале значений 20–30 кА отрицательные и положительные молнии наблюдаются соответственно на 70 и 52 % территории, а выше 40 кА на 0.2 и 2.5 %. Анализ статистических характеристик силы тока молний показал, что после расширения

Таблица 2
Вероятность попадания значений
силы тока в заданный интервал (%)

Пункт	Интервалы, кА					
	<10	<20	<30	<40	<50	<100
Кл. Фельдберг	19	56	80	90	95	99.8
Франкфурт-на-Майне	22	54	76	88	94	99.8
Мюнхен	29	61	81	90	95	99.7
Штутгарт	30	60	80	90	95	99.8

сети сенсоров в 1998 г. значительно уменьшились регистрируемые средние значения силы тока молний обеих полярностей. Сила тока положительных молний уменьшилась с 51 до 21 кА, отрицательных молний – с 29 до 13 кА, что, скорее всего, является следствием увеличения эффективности регистрации разрядов с малыми токами, а также повышения точности измерения характеристик проходящего сигнала. Средние значения силы тока положительных молний выше, чем отрицательных, что также подтверждает результаты других исследователей [7, 10]. В годовом ходе средняя сила тока положительных молний составляла около 21 кА (среднеквадратическое отклонение – 8 кА). Сила тока отрицательных молний изменялась незначительно: при средних значениях 17 кА среднеквадратическое отклонение составляло 2 кА. Средняя из ежегодно получаемых максимальных значений сила тока положительных и отрицательных молний при значительной межгодовой изменчивости

составляла 340 и 290 кА соответственно (среднеквадратическое отклонение равно 67 и 81 кА).

В результате проведенного исследования для территории Германии можно сформулировать следующие выводы:

1. Средняя многолетняя плотность разрядов молнии в землю варьируется по территории от 1 до 7 разр/км²год. Размеры очагов максимальных значений плотности разрядов молнии в землю (6–7 разр/км²год) составляют около 700 км².

2. В теплый период года доля положительных молний составляет 15 % общего количества молний. В холодный период доля положительных молний достигает 19 %.

3. Средняя сила тока положительных молний в 1.3 раза превосходит силу тока отрицательных молний (21 кА и 17 кА соответственно, среднеквадратическое отклонение составляет 8 и 2 кА).

4. В 80 % случаев от всех молний (без разделения на полярности) сила тока не превосходит 30 кА и в 95 % случаев – 50 кА.

Полученные результаты отражают параметры молний, характерные для умеренных широт Северного полушария Земли. Оснащение грозопеленгационными системами всей территории России по-прежнему актуально, но вряд ли возможно по экономическим причинам. Приведенные в данной работе результаты позволят подойти к выбору мест расположения систем грозопеленгации более обоснованно.

Список литературы

- Berger K. et al. Parameters of lightning flashes // *Electra*. 1975. V. 41. P. 23–37.
- Базелян Э. М. и др. Физические и инженерные основы молниезащиты. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 223 с.
- Gorbatenko V., Ershova T., Ribina N., Thern S. Statistical characteristics of the lightning in Germany // *Proceedings of the 29th International Conference on Lightning Protection, ICLP-2008, Uppsala, Sweden. 23th–26th of June 2008*. P. 291–297.
- Горбатенко В. П. О пространственном распределении числа дней с грозой и плотности разрядов молнии в землю // *Вестн. Томского гос. пед. ун-та*. 2000. Вып. 2. С. 39–42.
- Ершова Т. В., Горбатенко В. П. Исследования атмосферного электричества в Томске // *Там же*. 2010. Вып. 9 (99). С. 178–182.
- Thern S. Blitzortung – Ein neuer Service in Deutschland // *EMV Journal*. 1993. V. 4. № 3. S. 206–208.
- Rakov V. A. Positive Blitzentladungen // *Energietechnik*. 2001. № 5. S. 2–5.
- Мареев Е. А. Разряды в средней атмосфере / VI Рос. конф. по атмосфер. электричеству. Нижний Новгород, 1–7 октября 2007. Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2007. С. 22–25.
- Мулляров В. А., Торопов А. А., Козлов В. И., Каримов Р. Р. Особенности пространственного распределения положительных грозовых разрядов на востоке Сибири // *Метеорология и гидрология*. 2009. № 6. С. 47–55.
- Schulz W., Cummins K., Diendorfer G., Dorninger M.. Cloud-to-ground lightning in Austria: a 10-year study using data from a lightning location system // *J. of Geoph. Res.* 2005. V. 110. D09101. P. 1–20.
- Базелян Э. М., Райзер Ю. П. Физика молнии и молниезащиты. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 320 с.
- Orville R. E. Calibration of magnetic direction finding network using measured triggered lightning return stroke peak current // *J. of Geoph. Res.* 1991. 96 (D9). P. 17,135 – 17,142.
- Idone V. H., Saljoughy A. B., Henderson R. W. et al. A reexamination of the peak current calibration of the National Lightning Detection Network // *J. of Geoph. Res.* 1993. 98 (D10). P. 18,323–18,332.
- Jerauld J., Rakov V. A., Uman M. A. et al. An evaluation of the performance characteristics of the U.S. National Lightning Detection Network in Florida using rocket-triggered lightning // *J. of Geoph. Res.* 2005. V. 110. D19106. P. 1–16.

Ершова Т. В., кандидат физико-математических наук, доцент.
Томский государственный педагогический университет.
Ул. Киевская, 60, г. Томск, Томская область, Россия, 634061.
E-mail: goblin@mail.tomsknet.ru

Горбатенко В. П., доктор географических наук, старший научный сотрудник.
Томский политехнический университет.
Пр. Ленина, 30, г. Томск, Томская область, Россия, 634050.
E-mail: gorbatenko@hvd.tpu.ru

Материал поступил в редакцию 03.08.2010.

T. V. Ershova, V. P. Gorbatenko

PARAMETERS OF LIGHTNING ACTIVITY FROM INSTRUMENTAL MEASUREMENTS

Statistical analyses of the temporal and spatial variations of cloud-to-ground lightning (lightning discharges density, polarity of lightning strokes, peak current lightning flashes) in moderate latitudes of Northern hemisphere are introduced. The database of the investigation of more 10 million of lightning strokes in Germany covers the period 1995–2006 years.

Key words: *lightning flashes, lightning discharges density, peak current lightning flashes, positive and negative lightning strokes.*

Ershova T. V.
Tomsk State Pedagogical University.
Ul. Kiyevskaya, 60, Tomsk, Tomsk region, Russia, 634061.
E-mail: goblin@mail.tomsknet.ru

Gorbatenko V. P.
Tomsk Polytechnic University.
Pr. Lenina, 30, Tomsk, Tomsk region, Russia, 634050.
E-mail: gorbatenko@hvd.tpu.ru