

МОЛНИЯ КАК ИСТОЧНИК ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

УДК 630.432 + 551.594

А. А. Дульзон

Томский политехнический университет, 634004 Томск

Рассмотрены параметры разрядов молнии на землю, влияющие на возникновение лесных пожаров. Изложены основные результаты исследований пространственно-временных характеристик грозовой деятельности на территории Сибири и Казахстана.

ВВЕДЕНИЕ

В малонаселенных районах Сибири и Дальнего Востока молния является одной из главных причин возникновения лесных пожаров. В свою очередь, лесной пожар создает достаточно мощное облако дыма и пара, способное генерировать разряды молнии на расстоянии до нескольких десятков километров от исходного пожара и за счет этого создавать вторичные очаги пожаров. К примеру, исследовательская лаборатория лесной службы в Монтане (США) инициировала с вертолета экспериментальный лесной пожар на площади 459 га, продолжавшийся в течение трех часов [1]. При этом возникло облако дыма и пара высотой 6–7 км, обеспечившее генерацию электрических зарядов с интенсивностью $2 \text{ нКл}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$. В течение 1,5 ч было зарегистрировано 37 разрядов молнии. Среднее значение тока положительных разрядов на землю составило 36 кА. Разряды были зафиксированы на расстоянии от 10 до 30 км в направлении ветра.

Основная часть разрядов молнии на землю генерируется мощными кучево-дождевыми облаками. Необходимо подчеркнуть высокую динамичность грозовых процессов. Грозовая ячейка кучево-дождевого облака проходит три стадии своего развития. Первая — стадия интенсивного роста со скоростью 300–600 м/мин — продолжается 10–15 мин. В течение этой стадии облако достигает высоты в несколько километров, происходит интенсивный рост гидрометеоров, причем выше нулевой изотермы формируется кристаллическая фаза. Процессы роста и разрушения гидрометеоров обеспечивают образование и разделение зарядов в грозовом облаке и рост электрического поля до нескольких киловольт на сантиметр. Вторая — активная стадия облака — длится от 15 до 30 мин и сопровождается интенсивными электроразрядными процессами. Третья — стадия диссипации — продолжается ~ 30 мин. Общее время жизни одной грозовой ячейки, как правило, составляет ~ 1 ч. Пока одна из ячеек затухает, могут развиваться другие ячейки, и большие грозовые системы могут генерировать молнии в течение 10 ч и более.

Оценивая термодинамическую мощность среднего грозового облака по его водности, получим величину $\sim 6 \cdot 10^6$ кВт. В электрическую мощность трансформируется порядка $\sim 2 \cdot 10^6$ кВт, а во внешнюю цепь (в электросферу Земли) передается ~ 300000 кВт.

Ежегодно молнии инициируют десятки тысяч пожаров. Большинство ударов молнии в деревья не приводит к их возгоранию. Пожароопасность грозовой деятельности определяется параметрами разрядов молнии и их распределением в пространстве и во времени.

ПАРАМЕТРЫ МОЛНИИ

Разряды молнии на землю по направлению распространения и по знаку заряда лидера (ионизированного канала), инициирующего главный разряд, делят на четыре типа. Более 90 % общего числа разрядов на землю на земном шаре инициируется отрицательно заряженным лидером, растущим от облака к земле, и переносит на землю отрицательный заряд. Развитие этого типа разряда происходит следующим образом.

От грозового облака к земле распространяется ступенчатый лидер, который движется ступенями длительностью ~ 1 мкс и длиной до нескольких десятков метров, с паузами между ступенями ~ 50 мкс. Ступенчатый лидер со средней скоростью $\sim 2 \cdot 10^5$ м/с перемещает по направлению к земле электрический заряд до нескольких десятков кулон. Потенциал головки лидера достигает десятков миллионов вольт. Когда лидер приближается к земле, навстречу ему развивается встречный лидер длиной до нескольких десятков метров. После этого вверх по ионизированному каналу лидера со скоростью от трети до половины скорости света распространяется главный разряд молнии с амплитудой от единиц до сотен килоампер. Канал молнии разогревается до 30000 К и генерирует ударную волну, которая вырождается в акустическую волну, воспринимаемую в виде грома. Главный разряд нейтрализует заряд, сосредоточенный в канале и коронном чехле ступенчатого лидера, а также заряд, оставшийся в ячейке грозового облака, из которой развивался лидер. При этом в окружающем пространстве происходят резкие изменения электрического поля в микро- и миллисекундном диапазонах. После окончания главного разряда молнии по каналу может протекать небольшой ток величиной до нескольких сот ампер в течение единиц — сотен миллисекунд. Если в облаке остались достаточно большие заряженные области, разряд молнии может быть многокомпонентным. Последующие компоненты начинаются после паузы в несколько десятков микросекунд с распространения от облака к земле стреловидного лидера, продвигающегося непрерывно со средней скоростью $\sim 3 \cdot 10^6$ м/с. После достижения им земли развивается следующий главный разряд. Число компонентов может достигать 20, а полное время многокомпонентного разряда — 1,5 с.

В табл. 1 представлены основные параметры молнии, полученные на основании измерений Бергера [2] и рекомендуемые для практического использования. Следует отметить, что параметры молнии по данным разных исследователей несколько различаются. Эти отличия связаны с географическим положением места измерений и с определенными методическими погрешностями. Однако в большинстве случаев средние значения параметров неплохо согласуются друг с другом. Из табл. 1 видно, что положительные разряды молнии несмотря на то, что их доля составляет всего несколько процентов общего числа разрядов молнии на землю, могут играть существенную роль в инициировании лесных пожаров в связи с большой амплитудой тока и большой длительностью.

В последние годы за счет применения современной экспериментальной техники и соответствующего программного обеспечения, позволяющего обеспечить интервал дискретизации до 0,2 мкс (т. е. до нескольких миллионов выборок на один разряд молнии), удалось получить много новых данных о тонкой структуре разряда молнии. Наиболее успешно эти работы проводятся во Флоридском университете под руководством проф. Юмана.

Вопреки общепринятому мнению о том, что первые компоненты разряда молнии, как правило, имеют наибольшую амплитуду, установлено [3], что по крайней мере треть разрядов (в исследованиях, проведенных во Флориде) содержит последующие компоненты с амплитудой большей, чем первый компонент. Кроме того, удалось установить, что до по-

Таблица 1

Параметры токов молнии

Параметры	Доля разрядов с параметрами, превышающими указанные в таблице значения		
	95 %	50 %	5 %
1. Амплитуда тока молнии, кА			
Отрицательные первые компоненты	14	30	80
Отрицательные последующие компоненты	4,6	12	30
Положительные разряды	4,6	35	250
2. Заряды, Кл			
Отрицательные первые компоненты	1,1	5,2	24
Отрицательные последующие компоненты	0,2	1,4	11
Отрицательные разряды в целом	1,3	7,5	40
Положительные разряды	20	80	350
3. ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ФРОНТА, мкс			
Отрицательные первые компоненты	1,8	5,5	18
Отрицательные последующие компоненты	0,22	0,95	4
Положительные разряды	3,5	22	200
4. МАКСИМАЛЬНАЯ КРУТИЗНА ФРОНТА, кА/мкс			
Отрицательные первые компоненты	5,5	12	32
Отрицательные последующие компоненты	12	40	120
Положительные разряды	0,2	2,4	32
5. ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ИМПУЛЬСА, мкс			
Отрицательные первые компоненты	30	75	200
Отрицательные последующие компоненты	6,5	32	140
Положительные разряды	25	230	2000
6. ИНТЕГРАЛ ($i^2 dt$), $A^2 \cdot c$			
Отрицательные первые компоненты	$6 \cdot 10^3$	$5,5 \cdot 10^4$	$5,5 \cdot 10^5$
Отрицательные последующие компоненты	$5,5 \cdot 10^2$	$6 \cdot 10^3$	$5,2 \cdot 10^4$
Положительные разряды	$2,5 \cdot 10^2$	$6,5 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^7$
7. ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ, мкс			
Между отрицательными компонентами	7	33	150
8. ПОЛНАЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ РАЗРЯДА, мкс			
Отрицательные (включая однокомпонентные)	0,15	13	1100
Отрицательные (без однокомпонентных)	31	180	900
Положительные	14	85	500

ловины всех разрядов молнии имеют множественные окончания на земле, причем не только за счет разветвления лидера, но и за счет того, что некоторые последующие компоненты развиваются по новому каналу. Расстояния между окончаниями каналов зарегистрированы в пределах от 0,3 до 7,3 км с геометрическим средним 1,3 км. Эти новые данные требуют радикального пересмотра методов расчета грозозащиты.

Особый интерес с точки зрения инициирования лесных пожаров представляют так называемые «длительные» (более 40 мс) непрерывные токи. На рис. 1 представлен пример изменения электрического поля четырехкомпонентного (1–4) разряда молнии с непрерывным током. Установлено [4], что если за компонентом с относительно высоким начальным пиком электрического поля возвратного удара (5 В/м или выше, амплитуда тока молнии выше 22 кА) следует относительно короткий межкомпонентный интервал (8–32 мс), то более чем в половине случаев следующий компонент, имеющий существенно меньшую амплитуду, сопровождается длительным непрерывным током (НТ). Эта закономерность позволяет оценить вероятность появления таких токов в зависимости от времени года, типа грозы, географического района и стадии развития грозы, что представляет значительный интерес для службы охраны лесов от пожаров.

В табл. 2 приведены данные по 16 разрядам, зафиксированным с самолета и наземной

Таблица 2

Общий заряд, Кл	Число компонентов	Фаза длительного непрерывного тока			Инициирование пожара
		Продолжительность, мкс	Заряд, Кл	Средний ток, А	
40	2	235	29	125	+
48	3	282	44	156	+
76	3	243	55	225	+
93	3	205	61	298	+
22	2	228	19	85	+
26	9	40	1	25	+
42	3	190	36	189	+
*	3	120	*	*	+
44	3	80	*	*	+
29	2	100	*	*	+
*	2	170	*	*	+
10	7	180	*	*	-
*	2	70	*	*	-
22	5	Нет	Нет	Нет	-
*	1	Нет	Нет	Нет	-
*	5	Нет	Нет	Нет	-

Примечание. Знаком * обозначено отсутствие данных.

аппаратурой [5], из которых 11 вызвали лесные пожары. Все 11 полностью документированных пожаров иницированы разрядами молнии с длительными непрерывными токами.

Вероятность иницирования лесного пожара и его масштаб зависят от трех групп случайных факторов, изменяющихся в широких пределах: параметров разряда молнии, метеоусловий во время разряда и предшествовавших ему (до нескольких месяцев), вида и характеристик лесной растительности. Термические, электрогидравлические и газодинамические эффекты при импульсном воздействии плохо поддаются расчетам. Многочисленные попытки создать модель иницирования лесного пожара в связи с вынужденными упрощающими предположениями давали результаты столь общие, что могли быть получены и простыми логическими рассуждениями. Экспериментальные исследования воспламенения древесины импульсными дугами в зависимости от параметров импульса, вида и влажности древесины [6], хотя и позволили уточнить вклад различных параметров в вероятность воспламенения древесины, также дают результаты, отличающиеся на несколько порядков. Для разработки модели, которая позволила бы адекватно описать процесс иницирования лесного пожара разрядом молнии, требуется проведение систематических экспериментальных и теоретических исследований

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРОЗОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В течение многих лет НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете в содружестве с кафедрой метеорологии Томского государственного университета проводят исследования пространственно-временных характеристик грозовой деятельности. Для исследования используются многолетние данные метеослужбы, полученные ~ 300 метеостанциями Западной Сибири и Казахстана, аэросиноптические материалы, фотографии облачности с метеорологических спутников, индексы солнечной активности, а также результаты экспериментальной регистрации.

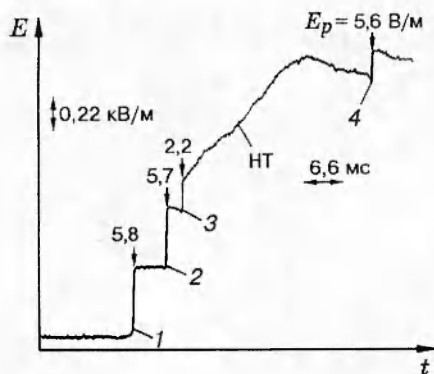


Рис. 1

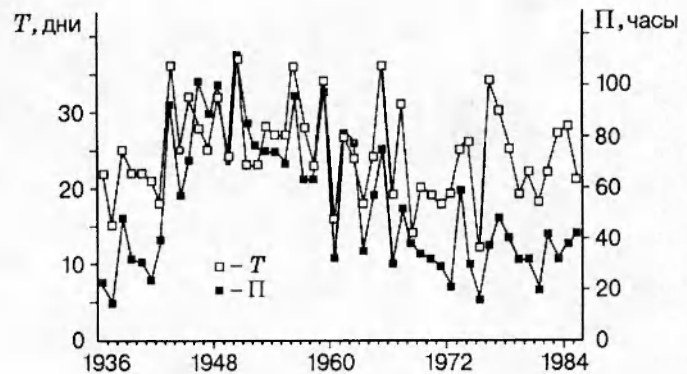


Рис. 2

Пример многолетнего хода грозовой деятельности (повторяемость грозовой деятельности T в грозовых днях и продолжительность грозовой деятельности Π в грозовых часах) приведен на рис. 2.

Спектральный анализ временного хода числа дней с грозой на метеостанциях с длинными рядами наблюдений (70 лет и более) позволил выделить гармоники, соответствующие 3, 5 и 13 годам. Наибольшую надежность (87%) имеет квазипятилетний (4–6 лет) цикл. Анализ повторяемости числа дней с грозой на метеостанциях Томска, Барнаула, Тайги с 1905 г. позволил сделать вывод о наличии цикла более высокого ранга, возможно, векового. Установлена связь циклов с солнечной активностью. Исследование квазипериодических колебаний в грозовой деятельности и их связи с особенностями атмосферной циркуляции и солнечной активностью подтвердило возможность использования 4–6-летних циклов в сверхдолгосрочном прогнозе экстремальных грозовых лет.

Годовое и суточное распределения грозовых дней и часов хорошо согласуются с данными, полученными другими исследователями для средних широт.

Карты грозовой деятельности строились по данным метеостанций, сети счетчиков молний, а также по грозовой аварийности высоковольтных линий всех классов напряжения. Даже на территориях с весьма однородным рельефом четко выявляется очаговость грозовой деятельности. Гипотеза о ее случайности (по дням, часам и разрядам на землю) неизменно отвергается для всех исследованных нами территорий. К примеру, попарное сравнение данных 406 пар метеостанций Южного Казахстана показало, что только в 23% разница между распределениями T случайна. Таким образом, как на территориях со сложным рельефом (Южный Казахстан), так и на равнинных территориях (Томская область) мезоклиматическая неоднородность T и Π реально существует. Отсюда следует, что простое интерполирование количественных характеристик грозовой активности на территории между точками наблюдения неправомерно.

Развитие мощной кучево-дождевой облачности является необходимым условием возникновения грозы, но не достаточным. Известно, что такие облака могут существовать часами, не генерируя разрядов и имея умеренные электрические поля. Для превращения их в грозовые требуется включение интенсивных процессов электризации.

Для выявления причин неоднородности грозовой деятельности в пространстве проведен анализ влияния на грозовую активность следующих факторов: атмосферная циркуляция над исследуемым районом, географическое положение района, орографические харак-

теристики района, термогигрометрические характеристики атмосферы, свойства подстилающей поверхности, аномалии геофизических полей, геоэлектрическая неоднородность грунта. Наличие и степень взаимосвязи между грозовой активностью и вышеуказанными факторами оценивали с помощью коэффициентов корреляции. Вид зависимости и возможность оценки значений характеристик грозовой активности по значениям факторов определяли с помощью регрессионного анализа.

Попытка использовать численные значения индексов циркуляции при моделировании грозовой деятельности положительных результатов не дала. В дальнейшем применяли лишь соотношения ведущих воздушных потоков в дни с грозой, которые над территориями Томской области и Казахстана составляют соответственно: юго-западные — 56 и 35 %, западные — 21 и 34 %, северо-западные — 23 и 30 %.

По данным 28 метеостанций Западной Сибири и Казахстана и 14 станций Вьетнама получены макромасштабные зависимости T и Π от долготы (L) и широты (Φ), записываемые в виде уравнений линейной регрессии:

$$T = 1,1(L - \Phi) - 4,6, \quad \Pi = 3,7(L - 2,7\Phi) - 98.$$

Множественные коэффициенты корреляции составляют 0,85 и 0,94. В мезомасштабе роль широты и долготы (как и ожидалось) меньше, чем в макромасштабе, хотя учет этих факторов все равно необходим.

В качестве характеристик орографии принимали высоту местности над уровнем моря (h), а также условные высоты превышений перед (h_1) и за (h_2) станцией, вычисленные с учетом доли каждого из воздушных потоков. Корреляционные зависимости проанализированы для ряда территорий, существенно отличающихся по физико-географическому расположению: Томская и Кемеровская области, Центральный и Южный Казахстан, Вьетнам. Влияние упомянутых орографических параметров на грозовую деятельность неоднозначно, хотя в большинстве случаев существенно.

При исследовании влияния температуры воздуха и упругости водяного пара на грозовую активность получено, что при доверительной вероятности 95 % коэффициенты корреляции значимы только для территории Казахстана. Территориальная неоднородность грозовой активности на отдельных территориях может объясняться (на 30 % и более) вариациями термогигрометрических характеристик.

Коэффициенты корреляции между характеристиками грозовой активности и температурой поверхности почвы, а также суммарным испарением с поверхности почвы для Центрального Казахстана намного выше, чем для Томской области. Вариации T на территории Джезказганской и Томской областей можно объяснить влиянием температуры почв (на 45 и 11 % соответственно) и испарения (на 36 и 19 %). В то же время все характеристики увлажненности почв для территории Томской области имеют значимые коэффициенты корреляции со значениями T , и территориальные изменения любой из них могут быть использованы при построении модели интенсивности грозовой деятельности [7]. В связи с тем, что в грозовой период территория Джезказганской области представляет собой щебенисто-каменистое плато с разреженным растительным покровом, а территория Томской области сплошь покрыта растительностью, оказалось целесообразным для учета влияния альбедо использовать в первом случае почвенную карту, а во втором — карту растительного покрова.

Коэффициенты корреляции характеристик грозовой активности со значениями изостатических аномалий и аномалий магнитного поля для территории Джезказганской обла-

сти высоки и значимы с доверительной вероятностью более 95 %. Для Томской области они меньше, причем с изостатическими аномалиями значимы только коэффициенты корреляции продолжительности гроз.

Содержание радона в приземном слое воздуха определялось расчетным путем. Для этого по геологическим картам определяли площади, занятые разными типами пород, и с учетом среднего содержания радиоактивных элементов в них рассчитывали количество образующегося радона. Далее, на основании коэффициентов эманирования и диффузии определяли среднее содержание радона в приземном слое воздуха. Несмотря на сглаживание разницы в активности, эманировании и диффузии, связанное с усреднением по площади, отличие в содержании радона в воздухе для различных районов получилось весьма значительным (до 30 раз). Разница концентрации радона в почвенном воздухе от 3 до 90 эман на высоте 1000 м дает активность $0,7 \cdot 10^{-16}$ – $2,2 \cdot 10^{-15}$ Ки/см³. При этом интенсивность ионизации изменяется от $\sim 1,5$ до 45 (пар ионов)/(см³ · с).

Районам с повышенной радиоактивностью в основном соответствуют повышенные значения T и Π , а также повышенная грозовая аварийность распределительных сетей, хотя уверенные цифровые оценки получить не удалось в связи с малым объемом выборок. В качестве подтверждения нашей гипотезы о влиянии радиоактивности на пространственное распределение грозовой деятельности можно рассматривать результаты исследований, проведенных в Швеции [8] вдоль радиоактивного следа Чернобыльской аварии, где обнаружена и статистически надежно подтверждена увеличенная плотность разрядов молний.

Наряду с зонами повышенной радиоактивности аналогичную роль «системы возбуждения» грозового генератора могут играть геоэлектрические неоднородности. Сделана попытка аналитически исследовать взаимосвязь неоднородности грунта с усилением поля вблизи облака для слоистого и секториального распределений неоднородных областей грунта [9]. Результаты расчетов указывают на принципиальную возможность заметного усиления напряженности поля на границе облака: до 1,3 раза при слоистой неоднородности грунта и более чем на порядок — при секториальной. Увеличение напряженности поля в кучевом облаке от 10^3 В/м (что еще не обеспечивает достаточно быстрого коагуляционного роста гидрометеоров и эффективного функционирования производительных механизмов электризации) до 10^4 В/м может привести к существенному ускорению «созревания» грозового облака и включению автоколебательного процесса заряда — разряда грозовой ячейки. Сопоставление геологических карт с данными о грозовой активности показало, что чем сложнее геологическое строение, тем больше дней с грозой.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРОЗОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Рассмотрение влияния перечисленных выше факторов позволяет утверждать, что практически все рассмотренные характеристики системы атмосфера — литосфера оказывают влияние на пространственное распределение интенсивности грозовой деятельности, хотя степени влияния отдельных факторов для различных территорий не одинаковы. Совокупное воздействие на грозовую активность всех доступных для рассмотрения факторов и степень влияния каждого из них можно оценить, построив уравнения множественной регрессии. Полученные модели объясняют 80–90 % общего разброса значений Π и T и удовлетворяют всем критериям оценки моделей. Пригодность этих моделей для расчетов

значений Π и T в точках, промежуточных между метеостанциями, подтверждена с помощью контрольной выборки. Сравнение расчетных и фактических значений подтвердило пригодность моделей для расчета значений T и Π на «неосвещенных» наблюдателями территориях. Результаты исследований неоднородности грозовой активности использованы нами при создании карт грозовой деятельности.

Методика построения карт плотности разрядов молнии на землю, которая позволяет обеспечить учет мезомасштабных особенностей их распределения и не требует больших затрат, заключается в следующем [10]. Представим число разрядов молнии в землю за год (на 1 км^2) в виде произведения двух независимых случайных величин — числа грозовых дней в году (T) и числа грозовых разрядов в землю (на 1 км^2) за один грозовой день (n), статистическая независимость которых подтверждается 13-летними наблюдениями в ЮАР. Распределение n должно быть получено экспериментально с помощью счетчиков разрядов молнии на некотором числе базовых метеостанций. Имея распределения T и n , аналитически или методом Монте-Карло нетрудно получить распределение числа разрядов молнии в землю за год (N_3). Указанный подход дает ряд существенных преимуществ. Прежде всего, за один год вместо одного значения случайной величины N_3 получаем выборку (размером T) случайных величин n . Кроме того, если по каким-либо причинам (например, отказ счетчика) имеются пропуски в регистрации, то при регистрации N_3 будет брак, а в данном случае просто уменьшается объем выборки. Достоинством является также возможность увязать богатейший многолетний материал метеорологических наблюдений за грозами с результатами инструментальной регистрации. Этот подход реализован для Томской области, где создана и в течение 8 лет поддерживалась сеть счетчиков разрядов молнии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая, что в получении оперативной информации о грозовой деятельности заинтересованы также энергетические системы и управления связи, можно быть уверенным, что создание общероссийской сети пеленгации, несмотря на высокую стоимость аппаратуры и программного обеспечения, а также значительные затраты на эксплуатацию, является лишь вопросом времени. Прогнозируемое глобальное потепление климата по расчетам [11] при удвоении содержания углекислого газа в атмосфере может привести к увеличению числа лесных пожаров, инициированных молниями, в 1,5 раза, а выгорающей площади — на $\sim 80\%$. В этой связи представляется актуальным создание в будущем сети пеленгации молний.

Возникает ряд новых исследовательских задач.

1. Необходимо увязать получаемую информацию с многолетними рядами грозовой деятельности, составленными на основании многолетних наблюдений метеостанций. Установление таких связей позволит существенно уточнить имеющиеся карты интенсивности грозовой деятельности и получить приближенные карты плотности разрядов молнии на землю задолго до полного охвата территории России системами пеленгации и накопления соответствующей статистики.

2. Должны быть уточнены модели грозовой деятельности, описывающие связь интенсивности грозовой деятельности с физико-географическими параметрами местности. Это не только позволит создать более достоверные карты грозовой деятельности, но и даст

возможность уточнить вклад ряда физико-географических факторов в развитие грозовых облаков и их электризацию.

3. Учитывая большую роль продолжительных токов в инициировании лесных пожаров, целесообразно сделать попытку выяснить условия, способствующие увеличению доли таких разрядов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Latham D.** Lightning flashes from a prescribed fire-induced cloud // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 95. P. 17152–17157.
2. **Berger K., Anderson R. B., Kroninger H.** Parameters of lightning flashes // *Electra.* 1975. V. 80. P. 23–37.
3. **Thottappillil R., Rakov V. A., Uman M. A., et al.** Lightning subsequent-stroke electric field peak greater than the first stroke peak and multiple ground terminations // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 7503–7509.
4. **Раков В. А., Юман М. А.** Непрерывные токи в отрицательных разрядах молнии на землю. Вероятность появления и возможный механизм // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1991. Т. 27, № 4. С. 376–390.
5. **Fuquay D. M., Taylor A. R., Howe R. G., Schmid C. W.** Lightning discharges that caused forest fires // *J. Geophys. Res.* 1972. V. 77, N 12. P. 2156–2158.
6. **Darveniza M., Zhou Y.** Lightning-initiated fires: Energy absorbed by fibrous materials from impulse current arcs // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99, N D5. P. 10663–10670.
7. **Gorbatenko V. P., Dulzon A. A.** Influence of underlying surface conditions on thunderstorm activity // *Int. Aerospace and Ground Conf. on Lightning and Static Electricity, Williamsburg, Virginia, Sept. 26–28, 1995. Williamsburg, 1995.*
8. **Israelsson S., Schutte Th., Pislér E., Lundquist S.** Effects of radioactive fallout on lightning frequency // *Proc. Int. Conf. Atmos. Electricity. Uppsala, 1988.* P. 416–419.
9. **Домашенко В. Г., Дульзон А. А., Купцов А. М.** К анализу влияния неоднородности грунта на поле грозового облака // *Техника высоких напряжений и электрическая прочность изоляции.* Томск: Изд-во ТГУ, 1977. С. 68–72.
10. **Дульзон А. А., Раков В. А., Шелухин Д. В., Шойванов Ю. Р.** Методические вопросы построения региональных карт плотности разрядов в землю // *Электрические станции.* 1990. № 3. С. 63–66.
11. **Price C., Rind D.** The impact of a $2 \times \text{CO}_2$ climate on lightning-caused fires // *J. Climate.* 1994. V. 7. P. 1484–1494.

Поступила в редакцию 25/III 1996 г.
