

НАУКИ ОБ АТМОСФЕРЕ И КЛИМАТЕ/ATMOSPHERIC AND CLIMATE SCIENCES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.102>

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ОСНОВНЫХ ЗАРЯДОВ ГРОЗОВОГО ОБЛАКА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАКЕТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Научная статья

Зекореев Р.Х.^{1,*}

¹ ORCID : 0009-0002-0981-3377;

¹ Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (zeri54[at]mail.ru)

Аннотация

Приводится краткое описание аппаратуры для прямого ракетного зондирования грозовых облаков на Северном Кавказе и методика восстановления электрической структуры. Расчет величин основных зарядов грозового облака и их количества, знака, радиуса сфер, высот расположения центра зарядов проводился по результатам измерения профиля вертикальной компоненты напряженности электрического поля в облаке, на основе простой модели. При этом текущие координаты траектории ракетного зондирования грозового облака измерялись и привязывались к синхронно регистрируемому радиоэху этого облака. На примере одного из экспериментов показана методика восстановления электрической структуры для реального грозового облака.

Ключевые слова: грозовое облако, электрическая структура, ракетный зонд, напряженность электрического поля.

STUDY OF THE STRUCTURE OF THE MAIN CHARGES OF A THUNDERCLOUD BASED ON ROCKET SOUNDING RESULTS

Research article

Zekoreev R.H.^{1,*}

¹ ORCID : 0009-0002-0981-3377;

¹ High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russian Federation

* Corresponding author (zeri54[at]mail.ru)

Abstract

A summary description of the equipment used for direct rocket sounding of thunderclouds in the North Caucasus and the method for reconstructing the electrical structure are provided. The calculation of the values of the main charges of the thundercloud and their number, sign, sphere radius, and height of the charge centre was carried out based on the results of measuring the vertical component of the electric field intensity in the cloud, using a simple model. At the same time, the current coordinates of the rocket sounding trajectory of the thundercloud were measured and linked to the synchronously recorded radio echo of this cloud. The method for reconstructing the electrical structure of a real thundercloud is demonstrated using one of the experiments as an example.

Keywords: thundercloud, electrical structure, rocket probe, electric field intensity.

Введение

Развитие конвективных облаков приводит к целому ряду опасных для людей и объектов явлений: ливни, грозы, град, шквалы, смерчи. В связи с этим изучение электризации конвективных облаков имеет не только фундаментальное, но и прикладное значение. Исследование конвективных облаков с учётом электрических факторов имеет важное значение для решения проблем управления и регулирования электрического состояния облаков.

Исследования электрической структуры грозовых облаков и динамики ее формирования являются необходимыми для понимания физических процессов, обуславливающих возникновение основных электрических зарядов в них, позволяют локализовать зоны, подлежащие активному воздействию для регулирования грозоопасности и градоопасности облака, а также для задач по защите летательных аппаратов и других объектов от поражения молнией в сложных метеорологических условиях.

Существующие методы непосредственных измерений объемных зарядов не позволяют проводить такие измерения в грозовых облаках, для определения его макроэлектрической структуры, из-за непреодолимых трудностей, возникающих при этом. В связи с этим предлагается метод расчета электрической структуры грозового облака, описываемая с помощью уравнения Пуассона, при этом величины основных объемных зарядов и их пространственное распределение, определяются по изменению напряженности электрического поля с высотой в грозовом облаке. Анализ существующих методов расчета электрической структуры показал, что по результатам измерений напряженности электрического поля за пределами грозовых облаков не может быть установлена действительная электрическая структура этих облаков [1], [2].

Несмотря на отсутствие регулярных натурных измерений электрических характеристик в грозовых облаках с конца 90-х годов, в настоящее время достигнуты определенные успехи в понимании процессов электризации грозового облака и численного моделирования конвективных облаков с учетом происходящих в них электрических процессов. В нашей стране и за рубежом разработаны модели различной размерности и различной степени детальности учета микрометеорологических, динамических и электрических процессов в облаках. В частности, результаты исследования электрической структуры конвективного облака, по данным численной нестационарной трехмерной

модели с параметризованным описанием микрофизических процессов и с учетом процессов электризации [3], показали, что электрическая структура облака неодинакова на разных стадиях его жизни и данная модель позволяет адекватно исследовать динамику электрической структуры конвективного облака для решения различных фундаментальных и прикладных задач.

Также другими авторами отмечаются, что по результатам численных экспериментов, проведенных разными авторами, основные электрические параметры облака, такие как значение напряженности электрического поля, вертикальный профиль, пространственная электрическая структура облака и ее эволюция на разных стадиях жизни, хорошо согласуются между собой и с данными натурных исследований. Также эти модели позволяют хорошо воспроизвести взаимосвязь между динамическими, микрофизическими и электрическими параметрами облака, оценить грозовую активность облака, осуществлять прогноз молниевой активности, на основе модельного расчета электрического поля облака [4], [5], [6], [7].

Вместе с тем авторами этих моделей отмечаются, что есть трудности, связанные с неполной ясностью физических основ некоторых процессов в облаках, с несовершенством выбранной параметризации микрофизики, с выбором класса носителей заряда в облаке, с проблемами в реализации модели на ЭВМ.

Вопрос о необходимости непосредственных измерений напряженности электрического поля (НЭП) внутри грозовых облаков, поставленный в работе [2], остается актуальным до настоящего времени. На наш взгляд, наряду с численным моделированием необходимо в тесной взаимосвязи развивать моделирование, на основе данных прямых измерений НЭП в грозовых облаках, которое способствовало бы решению актуальных проблем грозового электричества, проблем молниезащиты наземных, надводных объектов и летательных аппаратов в облачной среде. Для этого, на наш взгляд, требуется накопление статистически значимых, систематических натурных измерений, проведенных в различных физико-географических и погодных условиях.

Целью настоящей статьи является восстановление макроэлектрической структуры реального грозового облака по измерениям вертикальной составляющей НЭП внутри грозового облака, полученным с помощью ракетного зондирования. Для достижения этой цели предложен метод определения количества, знака, размера основных объемных зарядов, высоты расположения центра зарядов, а также метод расчета величин основных объемных зарядов грозового облака, моделируя их равномерно заряженными сферами.

Аппаратура и метод

Сведения о величине напряженности электрического поля внутри облака и ее пространственно-временном распределении, привязанные к макро- и микрофизическим характеристикам облака, позволяют восстановить электрическую структуру основных объемных зарядов облака. В связи с этим наибольший интерес представляют прямые измерения электрических характеристик внутри облаков методом их вертикального зондирования. Для этих целей использовалась разработанная в Высокогорном геофизическом институте радиотелеметрическая система (РТС), включающая в себя ракетный зонд, приемный наземный комплекс и аппаратуру наблюдения и выбора цели. При разработке и создании ракетного зонда было уделено серьезное внимание обоснованию достоверности измерений [8], [9], [10].

Ракетный зонд, входящий в состав радиотелеметрической системы (РТС), для исследования грозовых облаков, представляет собой модернизированную противоградовую ракету «Облако», в головной части которой установлена научно-исследовательская аппаратура, предназначенная для измерения, обработки и передачи по радиоканалу телеметрической информации о напряженности электрического поля внутри облака и других электрических параметров, с помощью модернизированного метеорологического радиозонда 1Б25-2 на наземную радиолокационную станцию (РЛС) «Шквал» 1Б18.

Приемный наземный комплекс, состоящий из РЛС «Шквал» 1Б18, которая обеспечивает прием телеметрической информации с ракетного зонда иавтосопровождение зонда в радиусе 150 км с одновременной регистрацией текущих координат, а также из устройства приема и преобразования информации (УППИ-9к), которое обеспечивает прием, дешифровку, регистрацию, запись и воспроизведение информации, поступающей по радиоканалу с ракетного зонда, параллельно по девяти каналам. Основные характеристики ракетной радиотелеметрической системы (РТС) приводятся в табл.1

Таблица 1 - Характеристики ракетной радиотелеметрической системы

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.102.1>

Измеряемые параметры	Диапазон измерений	Погрешность измерений, %	Высота зондирования
E_z , В/м	$10^2 - 10^6$	17	До 8 км
E_x , В/м	$10^2 - 10^4$	10,5	
Q , Кл	$10^{-7} - 10^{-5}$	17	
j_k , А/м ²	$10^{-7} - 10^{-5}$	11	
q , Кл	$10^{-13} - 10^{-9}$	10	

Примечание: E_z – вертикальная составляющая напряженности электрического поля; E_x – горизонтальная составляющая напряженности электрического поля; Q – заряд на ракетном зонде; j_k – плотность тока статической электризации; q – заряд гидрометеоров

Модернизированная метеорологическая радиолокационная станция «Гроза-26» использовалась для обнаружения облака, синхронных измерений его радиолокационных характеристик, динамики его развития и выбора зоны облака, подлежащей ракетному зондированию. Подробное описание ракетного зонда, РТС и его метрологических характеристик приведены в работах [11], [12], [13], [17].

При обнаружении начала развития кучево-дождевой облачности в радиусе 100 км проводились непрерывные радиолокационные наблюдения и измерения радиолокационных параметров облака с помощью модернизированной РЛС «Гроза-26». На основании анализа эволюции радиолокационных параметров облака: максимальной радиолокационной отражаемости; высоты верхней границы радиоэха; высоты зоны повышенного радиолокационного отражения, а также данных вертикальных и горизонтальных сечений радиоэха облака, выбирается объект для ракетного зондирования, с учетом его стадии развития. При подходе облака, с необходимыми параметрами, в зону досягаемости пусковых установок ракетного зонда, весь комплекс аппаратуры для ракетного зондирования приводится в полную готовность и выбирается траектория зондирования облака относительно его радиоэха и осуществляется запуск ракетного зонда. Перед запуском ракетного зонда наземный комплекс радиотелеметрической системы переводится в режим автосопровождения зонда и запускается вся регистрирующая аппаратура. В течение всего времени полета ракетного зонда осуществляется автоматическая регистрация информации, поступающей по радиоканалу с ракетного зонда. Были проведены комплексные эксперименты в грозовых облаках, в которых одновременно с ракетным зондированием вертикального профиля трех компонент напряженности электрического поля, синхронно регистрировались радиолокационные характеристики этих грозовых облаков.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ результатов 27 ракетных зондирований грозовых облаков показал, что в таких облаках обычно формируются 2–3 основных центра зарядов и большое число мезомасштабных неоднородностей. Электрическое поле основных зарядов и его изменение обычно наблюдается при наземных исследованиях или ракетных зондирований электричества грозовых облаков. Однако в грозовом облаке, особенно в стадии его развития, существуют сильные турбулентные движения, которые должны, уменьшая создающееся макроразделение зарядов поддерживать существование хаотически расположенных по облаку зарядов, способные формировать значительные электрические поля, характерные для активных зон грозовых облаков. На основании измерений изменения электрического заряда самолета определены размеры мезонеоднородностей в грозовых облаках. При этом сопоставление кривых распределения размеров зон неоднородностей в мощных кучевых и грозовых облаках показывает, что по мере развития облаков зоны неоднородностей становятся существенно больше, возрастая 50–100 м до 200–400 м в стадии зрелости [14]. Например, накапленная вероятность появления мезонеоднородности данного размера в 75%, для мощных кучевых и грозовых облаков в стадии зрелости составляют 180 и 300 м соответственно.

Взаимное расположение и количество основных зарядов зависит, по-видимому, от стадии и индивидуальных особенностей развития облака. Полученные в ходе экспериментов профили вертикальной компоненты вектора напряженности электрического поля (E_z) в грозовых облаках отличаются значительным разнообразием в зависимости от метеорологических условий района возникновения облака, взаимного расположения системы основных зарядов в облаке и траектории его зондирования [8]. Ракетные зондирования грозовых облаков позволили уточнить, ранее полученные результаты [1], [9], значения величин напряженности электрического поля, характерные для активной зоны грозовых облаков и они оказались равными (100–200) кВ/м и более. Зоны с такой величиной напряженности электрического поля могут иметь вертикальную протяженность 500 м и более.

Измеренная напряженность электрического поля в каждой точке вдоль траектории ракетного зонда рассматривалась как случайная величина, состоящая из детерминированной (создаваемой основными зарядами) и случайной (создаваемой местными флюктуациями плотности объемного заряда) составляющих, а профиль вертикальной компоненты электрического поля как реализация случайного процесса. Для выделения детерминированной составляющей профиля, по которой производился расчет структуры основных электрических зарядов, осуществлялось сглаживание измеренного профиля вертикальной компоненты поля, измеренной внутри облака с помощью ракетного зонда. Максимальный интервал сглаживания выбирался из условий необходимости сглаживания флюктуаций поля мезомасштабных зарядов и сохранения профиля поля от основных зарядов грозового облака, который может меняться в зависимости от результатов, полученных при ракетном зондировании конкретного грозового облака [12]. Интервал сглаживания колеблется от 100 до 200 м, так для профиля вертикальной компоненты напряженности электрического поля грозового облака, полученного 18.06.1987 г., составил 200 м (Рис. 1).

По профилю детерминированной составляющей вертикальной компоненты электрического поля можно определить количество, знаки, радиусы сфер и высоты расположения в облаке основных электрических зарядов. Моделируя основные электрические заряды облака равномерно заряженными сферами, можно произвести электростатический расчет величин основных зарядов в грозовых облаках [15].

Профиль вертикальной компоненты напряженности электрического поля E_z по высоте вблизи вертикали, соединяющей эти заряды, обычно имеет вид ломаной кривой, что указывает на наличие в облаке нескольких основных зарядов различных знаков: число основных зарядов в облаке на единицу меньше числа экстремальных точек на профиле вертикального хода значений E_z ; центры зарядов расположены в горизонтальных плоскостях, равноудаленных от экстремальных точек профиля E_z ; диаметры сфер, занимаемых зарядами, равны расстоянию между горизонтальными плоскостями, проходящими через экстремумы профиля значений E_z ; знаки зарядов указываются характером изменения $E_z(z)$, если при движении вверх по оси z напряженность поля $E_z(z)$ переходит от положительных к отрицательным значениям, то пересекаемый заряд положительный, при обратном характере перехода — отрицательный [16].

Уравнение Пуассона, позволяет рассчитать величины основных объемных зарядов, если пренебречь влиянием горизонтальных компонент напряженности электрического поля:

$$\rho = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial E}{\partial z}, \quad (1)$$

где ρ — плотность объемного заряда, E — напряженность электрического поля, z — высота, ϵ_0 — электрическая постоянная. Решение уравнения Пуассона, для расчета величины напряженности электрического поля, в случае равномерно заряженной сферы радиусом R , вдоль вертикальной оси z , во внутренней области сферы будет иметь вид:

$$E_{zi} = \frac{Q_i z_i}{4\pi\epsilon_0 R_i^3}, \quad |z_i| \leq R_i \quad (2)$$

Величину напряженности электрического поля за пределами заряженной сферы можно рассматривать, как поле точечного заряда, равного по величине заряду сферы и размещенного центре сферы, тогда формула для расчета напряженности электрического поля будет иметь вид:

$$E_{zi} = \frac{Q_i}{4\pi\epsilon_0 z_i^2}, \quad |z_i| \geq R_i \quad (3)$$

где Q_i — величина i -го основного заряда;

R_i — радиус i -ой сферы;

z_i — удаленность по оси z от центра i -ой сферы;

$\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная.

Исходя из (2) и (3), для структуры стремя центрами зарядов — Q_1 , Q_2 , Q_3 составляется система из трех уравнений, относительно этих зарядов, для произвольных точек А, В, С, на траектории измерения с учетом знаков зарядов и принципа суперпозиции, производится электростатический расчет и определяются значения величин основных зарядов грозового облака [17].

В качестве примера на рис. 1, приводится реальный профиль вертикальной компоненты напряженности электрического поля E_z , на основе которого восстановлена электрическая структура и рассчитаны значения величин основных зарядов для грозового облака, находящегося в стадии зрелости, за 18 июня 1987 года, где напряженность электрического поля E_z достигала более 200 кВ/м и эта структура представляет собой грозовое облако с тремя основными объемными зарядами:

— нижний положительный заряд $Q_1 = +7$ Кл, занимает объем радиусом $R_1 = 0,5 \cdot 10^3$ м и с центром заряда на высоте $h_1 = 2,7 \cdot 10^3$ м;

— средний отрицательный заряд $Q_2 = -18$ Кл, занимает объем радиусом $R_2 = 1,5 \cdot 10^3$ м, и с центром заряда на высоте $h_2 = 4,8 \cdot 10^3$ м;

— верхний положительный заряд $Q_3 = +1$ Кл, занимает объем радиусом $R_3 = 0,3 \cdot 10^3$ м и с центром заряда на высоте $h_3 = 6,7 \cdot 10^3$ м.

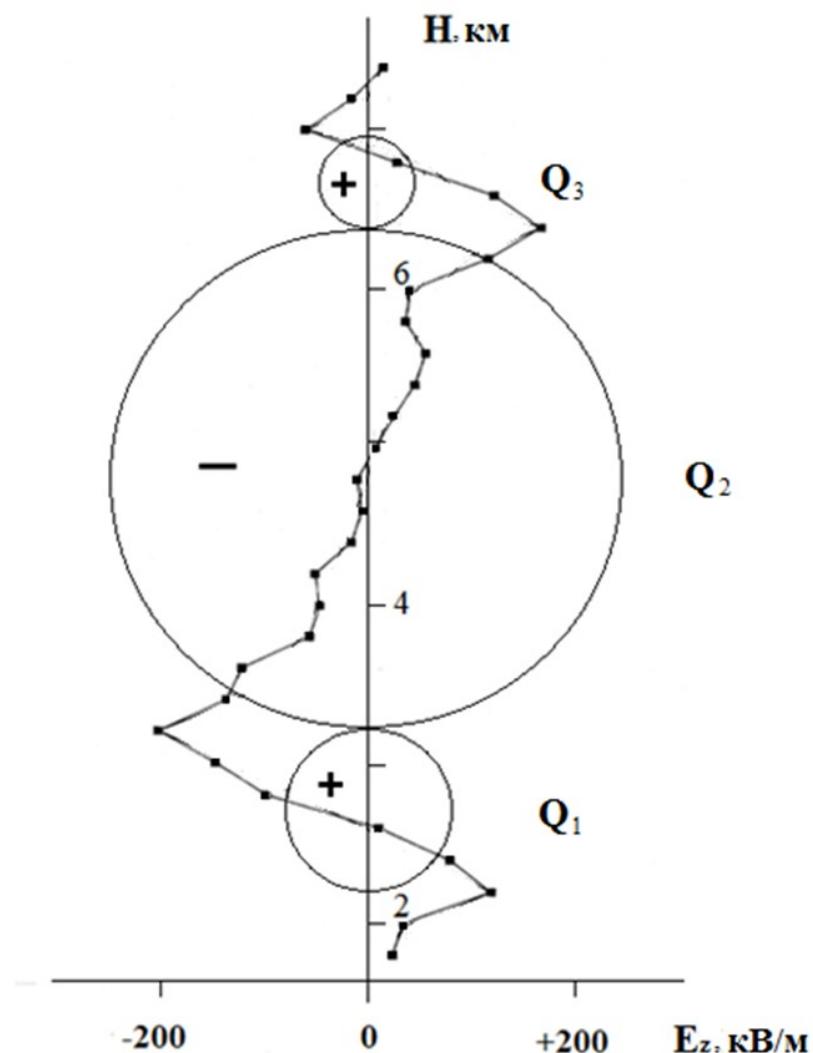


Рисунок 1 - Структура основных зарядов и профиль вертикальной компоненты напряженности электрического поля реального грозового облака
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.158.102.2>

Примечание: 18.06.1987 г

Результаты расчета и определения структуры основных электрических зарядов 27 грозовых облаков, подвергнутых ракетному зондированию показывают, что униполярные объемные заряды значительны по величине и принимают значения 1–48 Кл со средним значением — 24,5 Кл. Радиусы сфер объемных зарядов принимают значения 0,3–1,8 км со средним значением 1,05 км. Средние значения вертикальной составляющей максимальной напряженности электрического поля, находились в среднем на высотах 3,1 км и 6,7 км и составили 135 кВ/м и 220 кВ/м соответственно.

В случаях с тремя центрами зарядов: центры верхнего положительного заряда расположены на высотах 6,5–7,8 км со средним значением — 7,15 км; центры среднего отрицательного заряда расположены на высотах 3,5–5,8 км со средним значением — 4,55 км; центр нижнего положительного заряда расположен на высотах 1,2–3,2 км со средним значением — 2,2 км.

В случаях дипольной структурой зарядов наблюдается реверс знака заряда, где в 9 случаях сверхуложен отрицательный заряд, а в 5 случаях — положительный заряд; центр верхнего заряда расположен на высотах 3,8–6,8 км со средним значением — 5,2 км; центр нижнего заряда расположен на высотах 1,9–4,8 км со средним значением — 3,35 км.

В случаях с тремя центрами зарядов составляет около 48% (13 шт.) от всех облаков, подвергнутых ракетному зондированию, из них 9 облаков находились в стадии зрелости и 4 облака находились в стадии диссипации по радиолокационным характеристикам этих облаков. Соответствующие этому случаю средние значения величин зарядов составляют: верхний +20,8 Кл, средний -29,4 Кл, нижний +10,1 Кл.

Случаи с дипольной структурой зарядов составляет около 52% (14 шт.) от всех облаков, подвергнутых ракетному зондированию, из них 9 облаков находились в стадии зрелости и 5 облаков находились в стадии диссипации, по радиолокационным характеристикам этих облаков. Для положительной дипольной структуры облаков средние значения величин зарядов составляют: +14 Кл и -30 Кл и высоты расположения центров основных зарядов составляют в среднем 6,3 км и 4,2 км, а для отрицательной дипольной структуры зарядов средние значения величин зарядов составляют: -29 Кл и +14 Кл и высоты расположения центров основных зарядов составляют в среднем 5,9 км и 3,5 км. Среднее значение величин отрицательного объемного заряда почти в 2 раза больше положительного объемного заряда в случаях как положительного, так и отрицательного диполя.

Очевидно, что объемы, занятые основными зарядами не имеют правильную геометрическую форму и объемный заряд распределен в них не строго равномерно, центры зарядов располагались не строго, по вертикали и траектория зондирования проходила, как можно ближе, через центры этих зарядов. Однако такие допущения не могут, по нашему мнению, внести существенные искажения в оценке количества, знака, размера основных объемных зарядов, высоты расположения центра зарядов и расчета величины зарядов в решении задачи по восстановлению макроэлектрической структуры реального грозового облака.

Заключение

Предложенный метод позволяет по данным вертикального профиля напряженности электрического поля в грозовых облаках, восстановить пространственную структуру основных зарядов, рассчитать на основе простой модели величины основных объемных зарядов реального грозового облака. Ракетные зондирования грозовых облаков позволили уточнить значения величин напряженности электрического поля, характерные для активной зоны грозовых облаков и составляют (100–200) кВ/м и более, а экстремальные значения могут достигать 1000 кВ/м, вертикальная протяженность таких зон составляют 500 м и более. Данные по электрической структуре и величине напряженности электрического поля на практике можно применять для решения задач по защите жизненно важных объектов инфраструктуры, летательных аппаратов от поражения молнией, путем создания безопасных коридоров для полета в сложных метеорологических условиях, а также для локализации зоны на грозоградового облака, подлежащее активным воздействиям, с целью регулирования их осадкообразующей и электрической активности.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть представлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Имянитов И.М. Электричество облаков / И.М. Имянитов, Е.В. Чубарина, Я.М. Шварц. — Ленинград: Гидрометеоиздат, 1971. — 93 с.
2. Шварц Я.М. К расчету электрических структур грозовых облаков / Я.М. Шварц // Труды ГГО. — 1972. — Вып. 277. — С. 113–120.
3. Веремей Н.Е. Исследование эволюции электрической структуры конвективного облака по данным численной нестационарной трехмерной модели / Н.Е. Веремей, Ю.А. Довгалюк, М.А. Затевахин [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. — 2013. — Т. LVI. — № 11–12. — С. 889–899.
4. Ашабоков Б.А. Некоторые результаты численного исследования формирования термодинамических, микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков / Б.А. Ашабоков, Д.Д. Кулиев, К.А. Продан [и др.] // Сб. трудов 7-ого Всеросс. Конф. По атмосферному электричеству. — Санкт-Петербург, 2012. — С. 31–32.
5. Губенко И.М. Прогноз грозовой активности с помощью модели электризации кучево-дождевых облаков / И.М. Губенко, К.Г. Рубинштейн // Метеорология и Гидрология. — 2017. — № 2. — С. 5–19.
6. Дементьева С.О. Расчет электрического поля и индекса молниевой активности в моделях прогноза погоды / С.О. Дементьева, И.В. Ильин, Е.А. Мареев // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 2015. — Т. 51. — № 2. — С. 210–217.
7. Mansell E.R. Simulated Electrification of a Small Thunderstorm with Two-Moment Bulk Microphysics / E.R. Mansell, C.L. Ziegler, E.C. Bruning // Journal of the Atmospheric Sciences. — 2010. — Vol. 67. — P. 171–194.
8. Абшаев М.Т. Устройство для зондирования электрического поля грозовых и градовых облаков / М.Т. Абшаев, И.М. Имянитов, Х.М. Машуков // Труды ВГИ. — 1976. — Вып.31. — С. 15–31.
9. Evans W.A. Differential mill for measuring electric fields and conductivities in thunderclouds / W.A. Evans, R.L. Peek // Pure Appl. Geophys. — 1970. — Vol. 80. — № 3. — P. 359–370.
10. Машуков Х.М. Радиотелеметрическая система для исследования метеорологических явлений / Х.М. Машуков, Х.Х. Машуков, П.А. Юрицын // Труды II Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. — Ленинград, 1984, — С. 133–135.
11. Машуков Х.М. К вопросу о ракетных измерениях напряженности электрического поля в грозовых и градовых облаках / Х.М. Машуков // Труды ВГИ. — 1976. — Вып. 35. — С. 38–50.

12. Зекореев Р.Х. Ракетный радиотелеметрический комплекс для исследований контроля эффективности активных воздействий на электрическое состояние грозоградовых облаков / Р.Х. Зекореев, Х.Х. Машуков // Известия вузов. Сев.-Кавк. Регион. Естественные науки. Физика атмосферы. Спецвыпуск. — 2010. — С. 43–46.
13. Машуков Х.М. К вопросу о диагнозе грозопасности облаков / Х.М. Машуков // Труды 3-й Всесоюзной конференции по проблемам грозозащиты (4-ая секция научного совета АН СССР). — Баку: ЭЛМ, 1984. — С. 95–98.
14. Имянитов И.М. О зонах неоднородностей в грозовых облаках / И.М. Имянитов, Т.В. Лободин // Труды ГГО. — 1964. — Вып. 157. — С. 3–8.
15. Simpson G.C. The distribution of electricity in thunderclouds / G.C. Simpson, G.D. Robinson // II- Pro. Roy. Soc. — 1941. — Vol. 970. — P. 281–329.
16. Машуков Х.М. Некоторые результаты исследования структуры электрических зарядов в грозовых облаках / Х.М. Машуков, Л.Ж. Шугунов, Т.З. Защакуев [и др.] // Труды ВГИ. — 1985. — Вып. 61. — С. 13–16.
17. Mashukov Kh.Kh. Rocket Investigation of Electrical Characteristics of the Thunderstorm Clouds / Kh.Kh. Mashukov, R.Kh. Zekoreev, M.M. Kambiev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — № 698. — Article 0404041.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Imjanitov I.M. Jelektrichestvo oblakov [Cloud electricity] / I.M. Imjanitov, E.V. Chubarina, Ja.M. Shvarc. — Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971. — 93 p. [in Russian]
2. Shvarc Ja.M. K raschetu jelektricheskikh struktur grozovyh oblakov [Calculation of electrical structures of thunderclouds] / Ja.M. Shvarc // Trudy GGO [Proceedings of the GTO]. — 1972. — Iss. 277. — P. 113–120. [in Russian]
3. Veremej N.E. Issledovanie jevoljucii jelektricheskoy struktury konvektivnogo oblaka po dannym chislennoj nestacionarnoj trehmernoj modeli [Study of the evolution of the electrical structure of a convective cloud based on data from a numerical non-stationary three-dimensional model] / N.E. Veremej, Ju.A. Dovgaljuk, M.A. Zatevahin [et al.] // Izvestija vuzov. Radiofizika [Proceedings of Universities. Radiophysics]. — 2013. — Vol. LVI. — № 11–12. — P. 889–899. [in Russian]
4. Ashabokov B.A. Nekotorye rezul'taty chislenного issledovanija formirovaniya termodinamicheskikh, mikrostrukturnyh i jelektricheskikh harakteristik konvektivnyh oblakov [Some results of a numerical study of the formation of thermodynamic, microstructural, and electrical characteristics of convective clouds] / B.A. Ashabokov, D.D. Kuliev, K.A. Prodan [et al.] // Sb. trudov 7-ogo Vseross. Konf. Po atmosfernemu jelektrichestvu [Proceedings of the 7th All-Russian Conference on Atmospheric Electricity]. — St.Petersburg, 2012. — P. 31–32. [in Russian]
5. Gubenko I.M. Prognoz grozovoj aktivnosti s pomoshh'ju modeli jelektrizacii kuchovo-dozhdevykh oblakov [Forecasting thunderstorm activity using a model of electrification of cumulonimbus clouds] / I.M. Gubenko, K.G. Rubinshtejn // Meteorologija i Gidrologija [Meteorology and Hydrology]. — 2017. — № 2. — P. 5–19. [in Russian]
6. Dement'eva S.O. Raschet jelektricheskogo polja i indeksa molnievoj aktivnosti v modeljah prognoza pogody [Calculation of the electric field and lightning activity index in weather forecast models] / S.O. Dement'eva, I.V. Il'in, E.A. Mareev // Izvestija RAN. Fizika atmosfery i okeana [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Physics of the Atmosphere and Ocean]. — 2015. — Vol. 51. — № 2. — P. 210–217. [in Russian]
7. Mansell E.R. Simulated Electrification of a Small Thunderstorm with Two-Moment Bulk Microphysics / E.R. Mansell, C.L. Ziegler, E.C. Bruning // Journal of the Atmospheric Sciences. — 2010. — Vol. 67. — P. 171–194.
8. Abshaev M.T. Ustrojstvo dlja zondirovaniya jelektricheskogo polja grozovyh i gradovyh oblakov [Device for probing the electric field of thunderstorm and hail clouds] / M.T. Abshaev, I.M. Imjanitov, H.M. Mashukov // Trudy VGI [Proceedings of VSI]. — 1976. — Iss.31. — P. 15–31. [in Russian]
9. Evans W.A. Differential mill for measuring electric fields and conductivities in thunderclouds / W.A. Evans, R.L. Peek // Pure Appl. Geophys. — 1970. — Vol. 80. — № 3. — P. 359–370.
10. Mashukov H.M. Radiotelemetricheskaja sistema dlja issledovanija meteorologicheskikh javlenij [Radio telemetry system for studying meteorological phenomena] / H.M. Mashukov, H.H. Mashukov, P.A. Juricyn // Trudy II Vsesojuznogo simpoziuma po atmosfernemu jelektrichestvu [Proceedings of the II All-Union Symposium on Atmospheric Electricity]. — Leningrad, 1984. — P. 133–135. [in Russian]
11. Mashukov H.M. K voprosu o raketyh izmerenijah naprjazhennosti jelektricheskogo polja v grozovyh i gradovyh oblakah [On the issue of rocket measurements of electric field intensity in thunderstorm and hail clouds] / H.M. Mashukov // Trudy VGI [Proceedings of the VSI]. — 1976. — Iss. 35. — P. 38–50. [in Russian]
12. Zekoreev R.H. Raketyj radiotelemetricheskij kompleks dlja issledovanij kontrolja effektivnosti aktivnyh vozdejstvij na jelektricheskoe sostojanie grozogradovyh oblakov [Rocket radio telemetry complex for researching the effectiveness of active influences on the electrical state of thunderstorm clouds] / R.H. Zekoreev, H.H. Mashukov // Izvestija vuzov. Sev.-Kavk. Region. Estestvennye nauki. Fizika atmosfery. Specvypusk [University News. North Caucasus Region. Natural Sciences. Atmospheric Physics. Special Issue]. — 2010. — P. 43–46. [in Russian]
13. Mashukov H.M. K voprosu o diagnoze grozoopasnosti oblakov [On the issue of diagnosing the thunderstorm hazard of clouds] / H.M. Mashukov // Trudy 3-j Vsesojuznoj konferencii po problemam grozozashchity (4-aja sekciya nauchnogo soveta AN SSSR) [Proceedings of the 3rd All-Union Conference on Thunderstorm Protection Issues (4th section of the Scientific Council of the USSR Academy of Sciences)]. — Baku: ELM, 1984. — P. 95–98. [in Russian]
14. Imjanitov I.M. O zonah neodnorodnostej v grozovyh oblakah [On zones of heterogeneity in thunderclouds] / I.M. Imjanitov, T.V. Lobodin // Trudy GGO [Works of GTO]. — 1964. — Iss. 157. — P. 3–8. [in Russian]
15. Simpson G.C. The distribution of electricity in thunderclouds / G.C. Simpson, G.D. Robinson // II- Pro. Roy. Soc. — 1941. — Vol. 970. — P. 281–329.

16. Mashukov H.M. Nekotorye rezul'taty issledovanija struktury jelektricheskikh zarjadov v grozovyh oblakah [Some results of research into the structure of electrical charges in thunderclouds] / H.M. Mashukov, L.Zh. Shugunov, T.Z. Zashakuev [et al.] // Trudy VGI [Proceedings of the GSI]. — 1985. — Iss. 61. — P. 13–16. [in Russian]
17. Mashukov Kh.Kh. Rocket Investigation of Electrical Characteristics of the Thunderstorm Clouds / Kh.Kh. Mashukov, R.Kh. Zekoreev, M.M. Kambiev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — № 698. — Article 0404041.