

УДК 550.97

ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА В ОБЛАКЕ ПО ДАННЫМ О ВАРИАЦИИ ПОТОКА ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ ПОД ОБЛАКОМ

© 2021 г. Е. К. Свечникова^{1,2,*}, Н. В. Ильин¹, член-корреспондент РАН Е. А. Мареев^{1,2}

Поступило 02.11.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принято к публикации 23.11.2020 г.

Увеличение потока энергичных частиц под грозовыми облаками обусловлено размножением и ускорением частиц вторичных космических лучей в электрическом поле облака. Изучение механизмов размножения энергичных частиц требует выяснения электрических свойств облаков. Предложен новый способ оценки электрической структуры облака, создающего поток энергичных частиц. Способ основан на использовании результатов наземных измерений напряженности электрического поля и потока энергичных частиц под облаком. С помощью разработанной методики исследования облака, создающие нисходящие потоки энергичных частиц, наблюдаемые на Исследовательской станции Арагац. Определено характерное распределение заряда: двухслойная структура с плотностью заряда $0.5\text{--}5\text{ нКл/м}^3$ в нижнем слое и $-0.2\text{...}-3\text{ нКл/м}^3$ в верхнем слое. Полные заряды электрически активных областей, формирующих поток частиц, находятся в пределах $1\text{--}20\text{ Кл}$ и $-1\text{...}-30\text{ Кл}$ соответственно.

Ключевые слова: лавина убегающих электронов, приземное увеличение потока энергичных частиц, гамма-вспышка земного происхождения, грозовое облако

DOI: 10.31857/S2686739721020195

ВВЕДЕНИЕ

Потоки энергичных частиц, формируемые в облаках земной атмосферы, регистрируются приборами как на космических аппаратах, так и на поверхности Земли. Энергичное излучение грозовых облаков, направленное вверх и регистрируемое детекторами на спутниках, было открыто в 1994 г. и названо гамма-вспышками земного происхождения (terrestrial gamma-ray flashes, TGF) [1–3]. Увеличение потока энергичных частиц (относительно фонового значения), измеряемое наземными приборами при прохождении над ними электрифицированных облаков, впервые описано в 2009 г. и носит название приземных грозовых увеличений потока энергичных частиц (thunderstorm ground enhancements, TGE) [4, 5]. В случае обоих типов явлений – TGF и TGE – регистрируемый поток частиц содержит электроны и фотоны с энергиями в диапазоне $10\text{ кэВ--}100\text{ МэВ}$, длительность составляет около 100 мкс для TGF

[1] и $1\text{--}100\text{ мс}$ для TGE [4]. TGF и TGE возникают благодаря развитию в электрифицированных облаках лавин релятивистских убегающих электронов (relativistic electron avalanche, RREA) [6]. Убеганием электронов называется их ускоренное движение под действием электрического поля в воздухе, возможное благодаря существованию диапазона энергии электрона, при котором ускоряющая сила действия электрического поля превосходит силу сопротивления воздуха [7]. Убегающий электрон при столкновении с частицами воздуха способен создавать новые свободные электроны, которые тоже могут стать убегающими. Совокупность частиц, образованных в результате взаимодействий одной исходной частицы в воздухе в электрическом поле, называется лавиной релятивистских убегающих электронов.

В [8] предложено аналитическое описание динамики численности частиц лавины, основанное на общей закономерности экспоненциального нарастания количества частиц. Формализм, подобный изложенному в [8], неоднократно использовался для анализа событий TGF. Подобие явлений TGF и TGE, а также успех аналитического рассмотрения в анализе TGF [8] привели нас к идее разработки сходного метода, позволя-

¹ Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

*E-mail: svechnikova@ipfran.ru

ющего получить данные об электрической структуре облаков, под которыми наблюдаются TGE.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ TGE

Данные наблюдений TGE получены на Исследовательской станции Арагац (Армения, 3200 м над ур. моря) и взяты из открытого архива Отдела космических лучей Ереванского физического института [9]. Измерения потока энергичных частиц произведены с помощью детектора Stand-3 на основе пластикового сцинтиллятора с эффективностью детектирования 3–4% для гамма-фотонов (с энергией более 3 МэВ) и 99% для электронов. Электрическое поле измерено с помощью Electric Field Monitor Voltek EFM-100 (погрешность измерения электростатического поля 10%).

На основе моделирования состояния атмосферы с помощью Weather Research and Forecasting Model (WRF) найдена структура облаков для 28 событий TGE, наблюдавшихся на станции Арагац [10]. Для большинства событий TGE структура облака хорошо описывается моделью двух слоев, расположенных один над другим: нижний слой при этом обычно состоит из частиц снежной крупы, верхний образован частицами снега и льда. Достоверность моделирования подтверждается сопоставлением с результатами измерения приземных значений температуры и давления. Дополнительная верификация моделирования выполняется сравнением с радиолокационными данными об отражаемости облачных частиц; а также сопоставлением с данными спутникового мониторинга в микроволновом диапазоне, характеризующими высоту и температуру верхней кромок облака [10].

МЕТОД ОЦЕНКИ ЗАРЯДОВОЙ СТРУКТУРЫ ОБЛАКА

Явление TGE обусловлено лавиной электронов, распространяющейся вниз, т.е. развивающейся в направленном вверх электрическом поле.

Простейшее распределение заряда в облаке, способное обеспечить развитие нисходящих электронных лавин, — дипольное распределение с нижним положительным и верхним отрицательным зарядом. Дипольная модель зарядовой структуры создающего TGE облака находится в согласии с измеренной динамикой приземной напряженности электрического поля [10]. Весь последующий анализ подразумевает двухслойную зарядовую структуру облака, как достаточную для развития явления и согласующуюся с данными наблюдений.

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРЯДА В СОЗДАЮЩЕМ TGE ОБЛАКЕ

Неоднородность распределения заряда в облаке может быть учтена при сохранении простоты двухслойной осесимметричной модели путем задания зависимости плотности заряда от координаты внутри зарядового слоя облака в виде (1):

$$\rho(r, z) = \rho_0 \exp\left(-\left(\frac{z - z_m}{\sigma}\right)^8\right) \theta(R - r), \quad (1)$$

где $\rho(r, z)$ — плотность заряда в точке с координатами (r, z) (цилиндрической системы координат с центром в центре зарядового слоя и вертикальной осью z), ρ_0 — плотность заряда в центре слоя, z_m — вертикальная координата центра слоя, σ — характеристика скорости спада плотности заряда по мере удаления от центра слоя, $\theta(x)$ — функция Хэвисайда, R — радиус зарядового слоя. Соотношение (1) описывает общепринятую модель распределения заряда [13] и используется далее для нахождения приземного значения электрического поля и описания условий ускорения электронов.

Пространственное распределение плотности заряда (1), а также профиль напряженности электрического поля в облаке, где плотность заряда в каждом из двух слоев описывается выражением (1), представлены на рис. 1. Отрицательным высотам над поверхностью земли соответствуют “заряды-отражения”, примененные для вычисления распределения напряженности электрического поля в приближении идеально проводящей земли. Для иллюстрации распределения заряда и поля в облаке выбрана структура с параметрами, соответствующими событию TGE 21.06.2017. Процесс анализа, приводящий к восстановлению структуры, показанной на рис. 1, приведен в разделе 4.

ДИНАМИКА ПОТОКА ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ В МОДЕЛИ ЛАВИН УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ

Развитие электронной лавины в области однородного электрического поля допускает аналитическое описание [8], основанное на экспоненциальной зависимости количества частиц в лавине от расстояния, пройденного лавиной. Приведенное в [8] выражение для объемной плотности убегающих электронов $\overline{J_{re}}$ (с энергией около 7 МэВ) в конце лавины (т.е. в конце области сильного поля) имеет следующий вид (1):

$$\overline{J_{re}} = -e * \bar{v} * \exp\left(\frac{z_0^2}{2\epsilon_{re}} \left| \frac{dE}{dz} \right| \right), \quad (2)$$

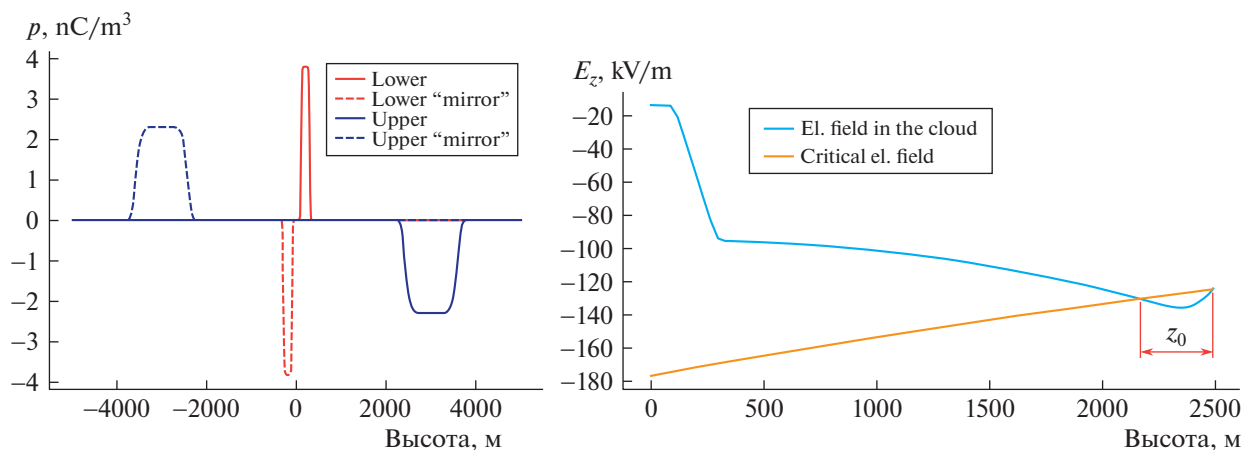


Рис. 1. Профили плотности заряда и напряженности электрического поля в облаке из двух слоев с распределением заряда (1) каждый. Параметры нижнего (l) и верхнего (u) слоев: $\rho_l = 3.7$ нКл/м³, $\sigma_l = 100$ м, $R_l = 2000$ м, $\rho_u = -2.0$ нКл/м³, $\sigma_u = 500$ м, $R_u = 3000$ м. На левом рисунке синей сплошной кривой изображено распределение заряда в верхнем отрицательном слое заряда, красной сплошной кривой – в нижнем положительном слое заряда; пунктиром обозначены плотности “зарядов-отражений”, использующихся для нахождения распределения поля в приближении идеально проводящей земли. На правом рисунке синей кривой изображен профиль поля, созданного заданным распределением заряда; оранжевой кривой обозначен профиль критического поля; красной стрелкой отмечена длина лавины z_0 .

где z_0 – длина лавины, $\epsilon_{re} = 7.3 \times 10^6$ В – характерная энергия убегающего электрона, $\left| \frac{dE}{dz} \right|$ – модуль производной вертикальной компоненты электрического поля по вертикальной координате в конце лавины.

Выражение (2) получено в предположении линейности зависимости электрического поля от вертикальной координаты вблизи конца лавины. Приближение хорошо согласуется с результатами моделирования профиля напряженности поля в облаке при достаточном произвольных параметрах распределения заряда. На рис. 1 представлена зависимость электрического поля от вертикальной координаты для облака двухслойной структуры, на примере облака, анализируемого далее. В конце лавины зависимость поля от высоты близка к линейной, что обеспечивает корректность допущения.

Несложным преобразованием из (2) получено соотношение (3), характеризующее увеличение потока убегающих электронов в единицу времени относительно фонового значения I (или – пропорциональное ему увеличение потока фотонов):

$$I = \exp\left(\frac{z_0^2}{2\epsilon_{re}} \left| \frac{dE}{dz} \right| \right). \quad (3)$$

Соотношение (3) связывает увеличение приземного потока энергичных частиц (относительно фонового значения) с двумя характеристиками профиля электрического поля (длина лавины и вертикальная производная поля), которых оказывается достаточно для рассмотрения эволюции

лавины энергичных частиц в принятом предположении о распределении заряда в облаке. Используемая модель электрической структуры облака приводит к профилю электрического поля, который ближе к результатам аэростатных измерений [11, 12], чем однородное или линейное распределение, рассматриваемое в подавляющем большинстве исследований, посвященных аналитическому и численному описанию эволюции потоков энергичных частиц в грозовых облаках [8].

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ ЗАРЯДА В ОБЛАКЕ

На основе изложенных соображений оценка плотности заряда слоев исследуемого облака производится следующим образом:

Определение геометрических характеристик и взаиморасположения заряженных слоев облака (по данным измерений, например, радарным, если они доступны, или путем численного моделирования; в данном случае применена модель WRF).

Расчет профиля поля над Станцией в момент увеличения потока, для диапазона плотностей заряда обоих слоев.

Определение диапазона значений плотности заряда обоих слоев, обеспечивающего наблюдаемое значение приземного поля.

Нахождение относительного увеличения приземного потока энергичных частиц в результате развития электронных лавин в профиле поля, по формуле (3).

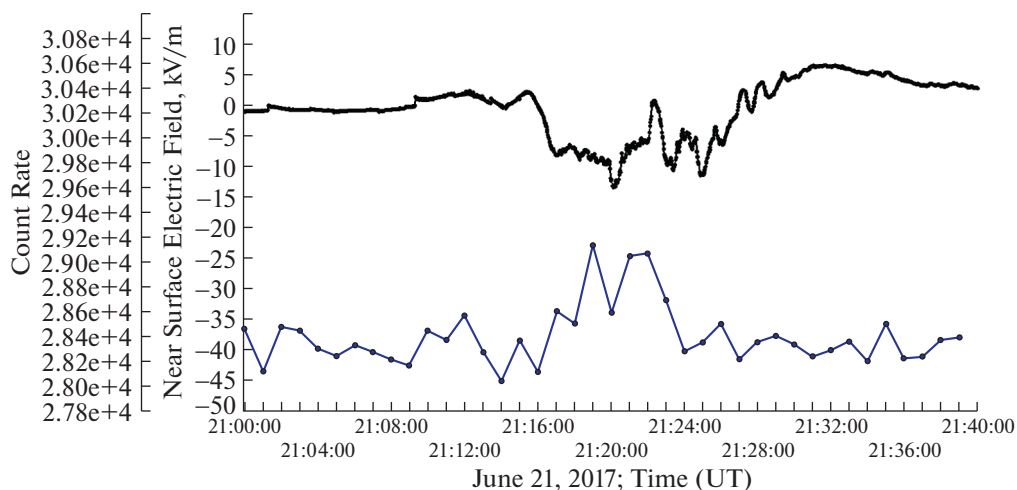


Рис. 2. Динамика приземных значений электрического поля (черная кривая, по данным МАКЕТ) и потока энергичных частиц (синяя кривая, по данным детектора Stand-3) во время TGE 21.06.2017 г. Положительной выбрана вертикальная проекция электрического поля, направленного вниз.

Нахождение диапазона значений плотности заряда обоих слоев, соответствующего найденному значению изменения потока.

Определение значений плотности заряда обоих слоев, обеспечивающих измеренные приземные значения электрического поля и потока.

Пример оценки структуры заряда в облаке по представленному алгоритму приведен в следующем разделе.

ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ ОБЛАКА, ОБУСЛОВИВШЕГО TGE 21.06.2017

На рис. 2 представлена динамика измеренных приземных значений электрического поля и потока энергичных частиц. Событие TGE произошло около 21:20 UT. Величина приземной напряженности электрического поля во время TGE: -8 кВ/м (отрицательным обозначено поле, направленное вверх), приземный поток энергичных частиц на 3% превосходит фоновое значение (что соответствует $I = 1.03$ в соотношении (3)).

Увеличение приземного потока энергичных частиц наблюдается при направленном вверх электрическом поле (соответствует отрицательному значению), что косвенно свидетельствует о близости области развития электронных лавин к поверхности земли: и около поверхности, и в области развития лавин электрическое поле направлено одинаково.

Найденное путем WRF-моделирования распределение облачных частиц во время наблюдения TGE изображено на рис. 3: облако образовано нижним слоем частиц снежной крупы и верхним слоем частиц снега. Результаты моделирования позволяют оценить геометрические параметры двух заря-

довых слоев: $\sigma_l = 100$ м, $R_l = 2000$ м, $\sigma_u = 500$ м, $R_u = 3000$ м. Единственными неизвестными величинами остаются плотности заряда каждого из двух слоев. Применение описанного в разделе “Оценка структуры облака...” алгоритма приводит к результатам, показанным на рис. 4. Плотности заряда определяются по принципу соответствия промоделированных и измеренных значений двух величин: приземной напряженности электрического поля и относительного увеличения потока энергичных частиц.

Область значений плотностей заряда, приводящих модельную структуру в соответствие результатам измерений, обозначена на рис. 4 оранжевым цветом, т.е. нижний слой имеет положительный заряд с плотностью в средней части $\rho_l = 3.7$ нКл/м³, верхний слой имеет отрицательный заряд с максимальной плотностью $\rho_u = -2.0$ нКл/м³. В каждом из слоев заряд считается распределенным по закону (1). Нижний заряд гораздо сильнее, чем верхний, влияет на электрическое поле в конце лавины, поэтому область значений зарядов, соответствующих измеренному потоку излучения, на рис. 4 имеет вид почти горизонтальной полосы. Ширина синей и зеленой областей на рис. 4 отражает погрешности определения входных параметров методики (измеренное приземное поле и увеличение потока, оцененная высота слоев заряда). Результирующая погрешность оценки плотности заряда слоев исследуемого облака составляет около $\Delta\rho = 0.1$ нКл, т.е. около 5% от характерного значения искомой величины. Полные заряды нижнего и верхнего слоев исследуемого облака – около 10 и -18 Кл соответственно. Восстановленное распределение заряда в облаке, обусловившем TGE 21.06.2017, а также

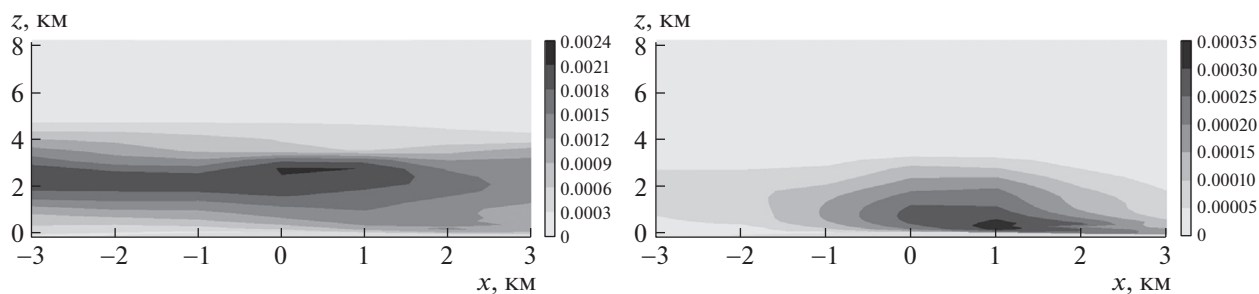


Рис. 3. Пространственное распределение частиц снежной крупы и снега над Станцией во время TGE, 21.06.2017 20:50, на основе WRF-моделирования.

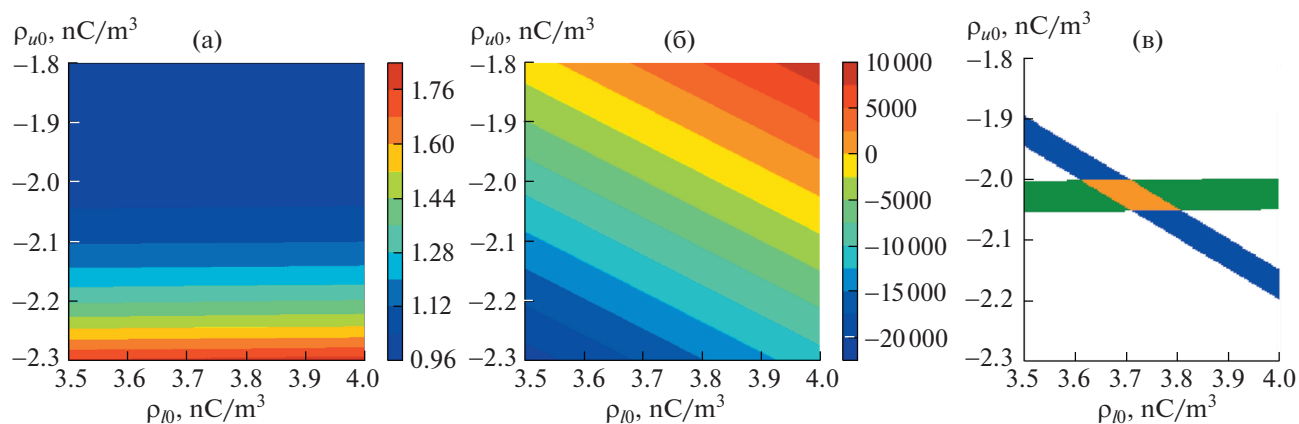


Рис. 4. а, б — Зависимость приземных значений относительного возрастания потока энергичных частиц и напряженности электрического поля от плотностей заряда (вертикальная ось соответствует плотности заряда верхнего отрицательного слоя, нижняя ось — плотности заряда нижнего положительного слоя); в — области значений плотности зарядов, обеспечивающих соответствие измеренным значениям приземной напряженности поля (синий), увеличения потока энергичных частиц (зеленый), и обеим величинам сразу (оранжевый).

структура электрического поля в облаке показаны на рис. 1. Согласно приземным измерениям электрического поля (рис. 2), вскоре после события TGE над точкой наблюдения проходил некомпенсированный положительный заряд, не оказавший прямого влияния на формирование электронной лавины; поэтому в целом облако можно считать приблизительно электронейтральным. Нисходящая лавина релятивистских убегающих электронов имела длину около $z_0 = 300$ м и обеспечила увеличение приземного значения потока энергичных электронов и фотонов, наблюдавшееся на станции Арагац 21.06.2017 в 21:20 UT.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый метод, позволяющий охарактеризовать электрическую структуру облака, увеличивающего поток гамма-излучения. Геометрические параметры облака определяются из результатов моделирования состояния атмосферы, заряды основных заряженных областей нахо-

дятся по предложенной методике. Анализ 28 событий TGE, наблюдавшихся на Исследовательской станции Арагац в 2016–2018 гг., привел к определению характерного распределения заряда в облаке, обуславливающим TGE: в дипольной структуре заряда нижний слой заряжен положительно, верхний — отрицательно, характерные плотности заряда: $\rho_l = 0.5\text{--}5$ нКл/м³ и $\rho_u = -0.2\text{--}-3$ нКл/м³ соответственно. Область надкритического электрического поля, где развивается лавина убегающих электронов, обычно расположена в центральной части облака.

Таким образом, совокупный анализ приземной динамики потока энергичных частиц и напряженности электрического поля под облаком обеспечивает неизвестные ранее сведения об условиях развития электронных лавин.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-17-00218.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fishman G.J., et al.* Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin // *Science*. 1994. V. 264 (5163). P. 1313–1316.
2. *Dwyer J., Smith D., Cummer S.* High-Energy Atmospheric Physics: Terrestrial Gamma-Ray Flashes and Related Phenomena // *Space Science Reviews*. 2012. 173.
3. *Dwyer J., Liu N., Grove J., Rassoul H., Smith D.* Characterizing the Source Properties of Terrestrial Gamma-ray Flashes // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2017. 122.
4. *Chilingarian A.* Thunderstorm Ground Enhancements – model and relation to lightning flashes // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2014. V. 107. P. 68–76.
5. *Chilingarian A., et al.* Origin of Enhanced Gamma Radiation in Thunderclouds // *Phys. Rev. Res.* 2019. 033167.
6. *Gurevich A.V., Milikh G.M., Roussel-Dupr'e R.A.* Runaway Electron Mechanism of Air Breakdown and Pre-conditioning during a Thunderstorm // *Phys. Lett. A*. 1992. V. 165. P. 463–468.
7. *Wilson C.T.R.* The Acceleration of Beta-particles in Strong Electric Fields such as those of Thunder-clouds // *Proc. Cambridge Philos. Soc.* 1925. V. 22. P. 534–538.
8. *Dwyer J.R., Cummer S.A.* Radio Emissions from Terrestrial Gamma-ray Flashes // *JGR: Space Physics*. 2013. V. 118. P. 3769–3790.
9. <http://crd.yerphi.am/adei>
10. *Свечникова Е.К., Ильин Н.В., Мареев Е.А.* Метеохарактеристика энергичных атмосферных явлений // Письма в журнал “Физика элементарных частиц и атомного ядра”. 2020. Т. 17. № 6. P. 791–802.
11. *Marshall T., Rison W., Rust W., Stolzenburg M., Willett J., Winn W.* Rocket and Balloon Observations of Electric Field in Two Thunderstorms // *Journal of Geophysical Research*. 1995. 100. P. 20815–20828.
12. *Stolzenburg M., Rust W., Marshall T.* Electrical Structure in Thunderstorm Convective Regions 2. Isolated storms // *Journal of Geophysical Research*. 1998. V. 1031. P. 14079–14096.
13. *Rakov V.A., Uman M.A.* Lightning: Physics and Effects. 2004. Chapter 3.

ESTIMATION OF CHARGE DISTRIBUTION IN A CLOUD BASED ON MEASUREMENTS OF ENERGETIC PARTICLE FLUX UNDER THE CLOUD

E. K. Svechnikova^{a,b,#}, N. V. Ilin^a, and Correspondent Member of the RAS E. A. Mareev^{a,b}

^a *Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

^b *Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

[#] *E-mail: svechnikova@ipfran.ru*

The increase in the flux of energetic particles under thunderstorm clouds is due to the multiplication and acceleration of particles of secondary cosmic rays in the electric field of the cloud. The study of the mechanisms of multiplication of energetic particles requires an estimation of the electrical properties of clouds. In this paper, we propose a method for evaluating the electrical structure of a cloud that creates a flux of energetic particles. The developed technique for estimating the distribution of charge in the cloud involves the use of the results of ground-based measurements of the electric field strength and flux of energetic particles. The technique was used to study the clouds that create the descending fluxes of energetic particles observed at the Aragats Research Station. The characteristic charge distribution is determined: a two-layer structure with a charge density of 0.5–5 nC/m³ in the lower layer and –0.2...–3 nC/m³ in the upper layer. The total charges of the two charged regions are in the range of 1–20 and –1...–30 C, respectively.

Keywords: avalanche of runaway electrons, thunderstorms ground enhancement, terrestrial gamma-ray flash