УДК 537.15

МИКРОФЛЮКТУАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В АТМОСФЕРЕ, ВЫЗВАННЫЕ ШИРОКИМИ АТМОСФЕРНЫМИ ЛИВНЯМИ

А. Д. Ерлыкин

Образование и движение избытка отрицательных зарядов в ШАЛ ведет к пространственному разделению отрицательных и положительных зарядов в атмосфере. Эти заряды создают электрическое дипольное поле, время жизни которого зависит от погодных условий и состояния атмосферы. Такие поля слабы, и на фоне более сильных полей, обычно присутствующих в атмосфере, они имеют характер микрофлюктуаций. Приводятся оценки высотного хода и амплитуды этих микрофлюктуаций.

Настоящая статья связана с попытками объяснить некоторые довольно редкие наблюдения. В процессе баллонных исследований атмосферного электричества [1] наблюдались случаи, когда поднимающийся шар-зонд на высоте нескольких километров над землей проходил через область с большим избытком положительных ионов. Их концентрация в максимуме достигала величин порядка 10^4 *ион*/*см*^{3}. Атмосферный воздух в целом обладает положительным объемным зарядом, экранирующим отрицательный заряд Земли [2], однако наблюдать подобную его локализацию удавалось нечасто. Объяснить наблюдаемое явление предгрозовым состоянием атмосферы нельзя, так как оно происходило в сравнительно спокойную погоду. Поскольку основная ионизация в тропосфере вызывается космическими лучами, был поставлен вопрос, не может ли наблюдавшийся избыток положительных ионов быть следствием прихода космической частицы сверхвысокой энергии и вызванного ею широкого атмосферного ливня (ШАЛ), ствол которого прошел около поднимавшегося шара-зонда.

Такая постановка вопроса имеет основания. Достаточно вспомнить, что еще в 1947 году Я. И. Френкель писал, что "электрические заряды разных знаков не могут возникать и исчезать, но могут лишь разделяться в пространстве" [2]. Механизм такого разделения существует и в ШАЛ. Частицы ШАЛ, основную массу которых составляют электроны, позитроны и гамма-кванты электромагнитного каскада (ЭМК), несут избыток отрицательного заряда. Удаление этого отрицательного заряда из какого-либо слоя атмосферы вследствие закона сохранения ведет к появлению в нем положительного заряда. Он образуется положительными ионами воздуха, электроны которых аннигилировали с позитронами ШАЛ или были выбиты в результате эффекта Комптона. При небольших энергиях, когда ЭМК развивается и полностью поглощается в атмосфере, создаваемый им полный заряд должен быть близок или даже точно равен нулю, если, например, он создается первичным гамма-квантом. Избыток отрицательного заряда, который компенсирует избыток положительных ионов, возникает в результате остановки и прилипания каскадных электронов к нейтральным атомам воздуха. В первый момент после прохождения ШАЛ области остаточных положительных и отрицательных зарядов оказываются пространственно разделенными. Позднее процессы диффузии, конвекции и воздушные течения приводят к перемешиванию этих областей и к нейтрализации избыточных зарядов.

Если ШАЛ обладает достаточно большой энергией, чтобы пересечь всю атмосферу, тогда его отрицательный избыток поглощается землей. Его нейтрализация путем перемешивания с положительными ионами воздуха затруднена. Избыток положительных ионов в атмосфере будет жить сравнительно долго и мог бы быть обнаружен достаточно чувствительными приборами. Описанный механизм движения и разделения зарядов напоминает тот, который существует во время грозы. Однако в последнем случае избыток отрицательных зарядов в атмосфере переносится водяными каплями.

Вопросы развития и переноса отрицательного избытка зарядов в ШАЛ рассматривались и ранее [3 – 5]. Однако это рассмотрение было, в основном, ориентировано на оценку интенсивности возникающего при этом радиоизлучения, с помощью которого можно было бы детектрировать ШАЛ. Теоретических оценок величины возникающих при развитии ШАЛ квазистатических зарядов автору найти не удалось, хотя попытки экспериментального обнаружения избытка ионов в воздухе, связанного с прохождением ШАЛ, предпринимались (см. [6] и ссылки в этой работе). Предварительные вычисления для чистых ЭМК были проделаны в работе [7]. В настоящей работе эти вычисления уточнены и приближены к условиям развития ШАЛ, представляющих собой

адронно-электромагнитные каскады в атмосфере. Уточнение связано с тем, что как было установлено позднее [8], продольное развитие отрицательного избытка заряда в ЭМК происходит медленнее, чем это было принято в [7]. Приближение к ШАЛ сделано путем экспоненциального распределения точек начала развития ЭМК в атмосфере с пробегом, характерным для неупругого взаимодействия протонов в воздухе.

Основное рассмотрение процессов аналогично [7]. Если на входе слоя атмосферы на глубине t мы имеем n_1^- электронов и n_1^+ позитронов, а на выходе $t + dt$ соответственно n_2^- и n_2^+, то суммарный заряд ионов dq, оставшийся в этом слое после прохождения ЭМК, равен $(n_2^- - n_2^+) - (n_1^- - n_1^+)$. Если определить отрицательный избыток заряда как $\epsilon = (n^- - n^+)/n_e$, где $n_e = n^- + n^+$ – полное число электронов и позитронов на этом уровне, то

$$dq = (\epsilon n_e)_{t+dt} - (\epsilon n_e)_t = \frac{d(\epsilon n_e)}{dt}\, dt.$$

Распределение заряда по высоте dq/dh равно $d(\epsilon n_e \rho)/dt$, где ρ – плотность воздуха. Концентрация избытка ионов на расстоянии r от оси ШАЛ равна $d(\epsilon n_e \rho f(r))/dt$, где $f(r)$ – функция пространственного распределения (ФПР) электронов и позитронов в ШАЛ.

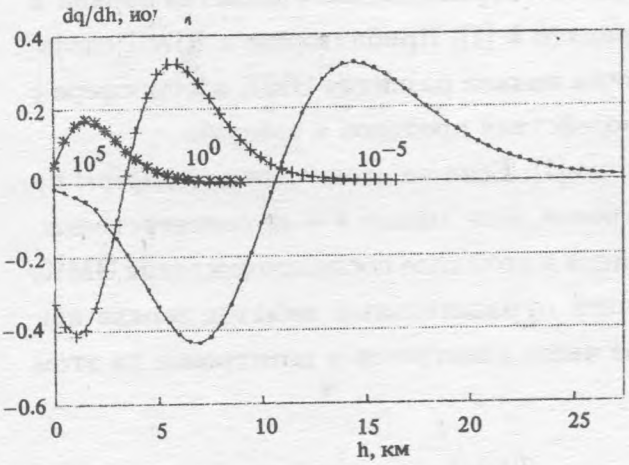
В настоящей работе, в отличие от [7], предполагалось, что продольное развитие ШАЛ может быть описано электромагнитной каскадной теорией, начиная от точки первого взаимодействия протона t_0. Распределение этих точек по глубине было взято экспоненциальным с пробегом для неупругого взаимодействия протонов в виде

$$\lambda(E) = 87,8/(1 + 0,05\ln(E/1\ ТэВ)\ г/см^2.$$

Каскадные кривые $n_e(t)$ были приняты в аппроксимации Грейзена [9], ФПР электронов и позитронов $f(r)$ – в аппроксимации Нишимуры – Каматы – Грейзена [9]. Продольное развитие избытка отрицательных зарядов в соответствии с данными [8] было более медленным, чем в [7] и описывалось формулой

$$\epsilon = 0,40\{1 - \exp[-(t/2,078 t_{max})^{0,553}]\},$$

где глубина максимума ливня $t_{max} = \ln(E/\beta)$, $\beta = 0,081\ ГэВ$ – критическая энергия электронов в воздухе. Этот профиль развития отрицательного избытка предполагался не зависящим от плотности частиц каскада и одинаковым на всех расстояниях от оси ливня. Для вычисления плотности воздуха использовалась обычная барометрическая формула.



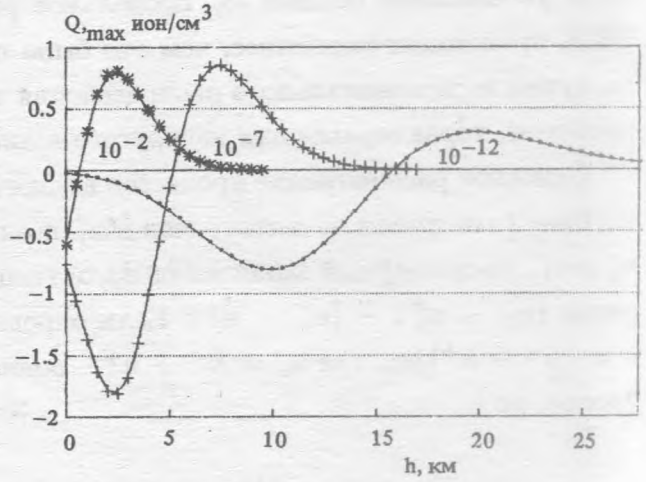


Рис. 1. *Распределение избытка ионов dq/dh по высоте h для вертикальных ШАЛ, генерируемых первичными протонами с энергией $10^1(-*-)$, $10^6(-+-)$ и $10^{11}(-\cdot-)$ ГэВ. Числа под кривыми – множители, определяющие масштаб по оси ординат.*

Рис. 2. *Зависимость максимальной концентрации избытка ионов Q_{max} от высоты h в стволах тех же ШАЛ, что и на рис. 1. Числа под кривыми – множители, определяющие масштаб по оси ординат.*

Результаты расчетов по этой модели показаны на рис. 1 и 2. Распределение избытка ионов dq/dh по высоте h и зависимость от высоты его максимальной концентрации в стволе ШАЛ, которая принята равной концентрации на расстоянии 1 *м* от его оси, рассчитаны для вертикальных ливней с энергией 10^1, 10^6 и 10^{11} *ГэВ*. Видно, что даже для предельно высоких энергий концентрация избытка положительных ионов на несколько порядков ниже наблюдавшейся в работе [1]. Однако рассчитанная концентрация ионов не является полной ионизацией, создаваемой ШАЛ, а только концентрацией избытка ионов, вызванного избытком отрицательных зарядов в ЭМК ШАЛ.

Из рисунков 1 и 2 видно, что области избытка положительных и отрицательных зарядов несимметричны. Это связано с разной плотностью воздуха на различных высотах. В более плотной атмосфере на небольших высотах избыток отрицательных ионов более компактен. Таким образом, пространственно разделенные области избыточных зарядов в атмосфере выглядят как асимметричная гантель. Эти области являются источни-

ком квазистатического электрического поля. Количественные оценки дают величины порядка 0,1 – 1 *нКл · м* для дипольного момента, 0,01 – 0,1 *мкВ* для разности потенциалов и $10^{-12} - 10^{-11}$ *В/м* для максимальной напряженности электрического поля на 1 *ПэВ* энергии ливня.

Сравнение рис. 1 и 2 с аналогичными рисунками [7] показывает, что более медленное развитие отрицательного избытка заряда и распределение точек первого взаимодействия по глубине атмосферы привело к уменьшению концентрации ионов и приближению областей с максимальной концентрацией к земле. При этом оказалось, что часть каскадов предельно высоких энергий $\sim 10^{11}$ *ГэВ* начинает развиваться столь поздно, что не успевает создать положительного избытка даже над уровнем моря. Концентрация положительных ионов в атмосфере, приходящаяся на 1 *ПэВ* энергии ливня, при этом уменьшается. Время жизни ионов зависит от погодных условий, и в спокойной атмосфере его характерная величина имеет порядок 10^2 *с*.

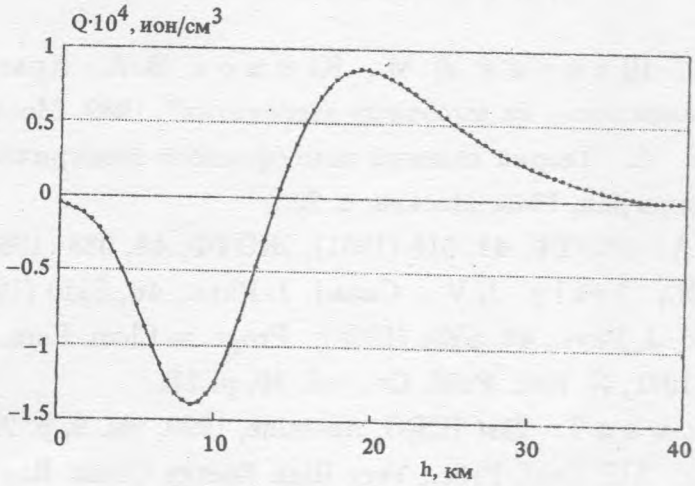


Рис. 3. *Зависимость от высоты h равновесной концентрации избытка ионов Q, создаваемого в атмосфере всем спектром первичных космических лучей. Время жизни ионов* 10^2 *с.*

В связи с проведенным рассмотрением можно задаться вопросом, какую равновесную концентрацию избыточных ионов можно ожидать, если принять во внимание весь спектр космических лучей. Результат интегрирования $d(\epsilon n_e \rho)/dt$ по энергетическому спектру первичных космических лучей при изотропном угловом распределении на границе атмосферы показан на рис. 3. Равновесное время жизни ионов было принято равным 10^2 *с*. Видно, что полученное распределение близко к тому, которое образуется ливнями с энергией порядка 10 *ГэВ*. Это можно объяснить тем, что область энергий

вблизи 10 $ГэВ$ дает максимальный вклад в полную энергию космических лучей. Максимальная концентрация избытка положительных ионов находится на высоте $\sim 18-19$ $км$, т.е. там же, где расположен максимум ионизации от космических лучей.

Таким образом, пространственное разделение положительных и отрицательных ионов, вызванное прохождением ШАЛ через атмосферу, формирует электрические поля, которые сохраняются в течение времени порядка минут. Эти поля очень слабы. На фоне гораздо более сильных полей, существующих в атмосфере, которые имеют величину $\sim 10^2$ $В/м$ в спокойную погоду и $\sim 10^4$ $В/м$ во время грозы, поля, создаваемые ШАЛ, носят лишь характер микрофлюктуаций.

Автор искренне благодарен Л. Г. Деденко за советы и предоставленные неопубликованные результаты, а также С. П. Перову за инициирование этой работы и многочисленные полезные дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ермаков В. И., Шифрин Д. М., Юшков В. А. Краткие сообщения по физике, Сб. "Исследования на высотных аэростатах", 1989, Москва, с. 57.

[2] Френкель Я. И. Теория явлений атмосферного электричества, Госиздат техн.-теор.лит., Ленинград, 1949, Москва, с. 23.

[3] Аскарьян Г. А. ЖЭТФ, **41**, 616 (1961); ЖЭТФ, **48**, 988 (1965).

[4] Charman W. N., Jelly J. V., Canad. J. Phys., **46**, S216 (1968).

[5] Allan H., Canad. J. Phys., **46**, S234 (1968); Progr. in Elem. Part. and Cosm. Ray Phys., Amsterdam, 1971, N. Holl. Publ. Co., vol. 10, p. 171.

[6] Chen C. X., Bowen T. 21st ICRC, Adelaide, 1990, vol. 9, p. 222.

[7] Erlykin A. D., AIP Conf. Proc., Very High Energy Cosm. Ray Interact. 7 Int. Symp., Ann-Arbor, 1992, vol. 276, p. 496.

[8] Деденко Л. Г. Частное сообщение.

[9] Greisen K., Progress in Cosmic Ray Physics, ed. J. G. Wilson, Amsterdam, 1956, vol. 3, p. 7.

Поступила в редакцию 28 декабря 1993 г.