

12. Кадомцев Б Б *Динамика и информация* (М.: Редакция журнала "Успехи физических наук", 2001)
13. Кадомцев Б Б *На пульсаре* (Ижевск: РХД; М.: Редакция журнала "Успехи физических наук", 2001) [Kadomtsev B B *On the Pulsar* (London: World Scientific, 2009) (in press)]

PACS numbers: 52.80. – s, 92.60.Pw, 94.20.wq  
DOI: 10.3367/UFNr.0179.200907h.0779

## Нелинейные явления в ионосферной плазме. Влияние космических лучей и пробоя на убегающих электронах на грозовые разряды

А.В. Гуревич, А.Н. Караштин, В.А. Рябов,  
А.П. Чубенко, А.Л. Щепетов

### 1. Введение

В этом сообщении описаны как некоторые продвижения в теории, так и результаты новых наблюдений влияния космических лучей и пробоя на убегающих электронах на грозовые процессы в атмосфере. Рассмотрено асимптотическое решение линейного кинетического уравнения, предложены соотношения подобия для пробоя на убегающих электронах. Описан созданный на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции космических лучей Физического института им. П.Н. Лебедева РАН экспериментальный комплекс "Гроза", на котором проводятся измерения различных видов излучения в период грозовой активности. Основное внимание уделено описанию результатов наблюдения интенсивных всплесков гамма-излучения в период активной фазы грозы. Впервые зарегистрированы специфические атмосферные разряды, вызванные совместным воздействием на грозовое облако пробоя на убегающих электронах и широкого атмосферного ливня. Обнаружение интенсивных длительных всплесков гамма-излучения и их корреляция с радиоизлучением может служить первым экспериментальным свидетельством того, что собирание и доставка заряда от облаков к лидеру молнии в активный грозовой период происходят при определяющей роли пробоя на убегающих электронах, инициированного космическими лучами.

Грозовой разряд — молния — определяется тремя основными процессами:

1. Собираение электрического заряда с большого объема облаков (по существу, инициация молнии), в которых он расположен в основном на капельках или льдинках.
2. Перенос этого заряда от облака на землю или между облаками.
3. "Сжигание" заряда в грозовом разряде (собственно, это и есть молния).

Третий процесс — возвратный удар молнии — хорошо известен и достаточно подробно изучен. Много исследований посвящено также и второму процессу — лидеру молнии, но пока всё ещё остаётся много вопросов. Что же касается первого процесса, то эта проблема практически не дискутировалась в литературе.

Дело в том, что раньше наблюдалось радиоизлучение многочисленных разрядов, происходящих в облаке. Предполагалось, что эти разряды создаются вследствие

обычного пробоя воздуха. Однако, как выяснилось в результате многочисленных измерений (в последнее время очень точных), электрическое поле в грозовых облаках никогда не достигает необходимой для обычного разряда в атмосфере величины (последние измерения показывают, что этот факт можно считать точно установленным [1, 2]). Поэтому вопрос о природе собирания заряда с большого объема облаков оставался практически полностью открытым и, по существу, не обсуждался в литературе (см., например, монографии [3, 4]).

В настоящем сообщении впервые показано, что активная фаза грозового разряда фактически сопровождается мощными потоками гамма-излучения в облаках. Одновременно наблюдается и радиоизлучение, хорошо коррелированное с гамма-излучением. Это означает, что осуществляется пробой на убегающих электронах. Величина электрического поля превосходит критическое поле пробоя на убегающих электронах. Затравкой для пробоя служат вторичные электроны космических лучей. Поэтому пробой на убегающих электронах в облаках может стать основой для объяснения процесса собирания заряда из облаков, необходимого для возникновения грозового разряда. Тем самым появляется новое направление для исследования первой и главной фазы — основополагающего процесса — грозового разряда. Вся эта проблема тесно примыкает к идеям и понятиям физики плазмы, которым были посвящены основные работы Б.Б. Кадомцева. В частности, пробой на убегающих электронах — это процесс, в котором всякое вещество ведёт себя как плазма.

Исследования атмосферных разрядов интенсивно развиваются в последние годы. Обнаружены новые виды разрядов между атмосферой и ионосферой: спрайты, эльфы, голубые джеты [5, 6]. Зарегистрированы мощные вспышки гамма-излучения (TGF — от англ. Terrestrial Gamma Flashes) [7]. Подробно изучены высотные разряды, генерирующие сверхмощные импульсы радиоизлучения (NBE — от англ. Narrow Bipolar Event) [8].

Результаты новых измерений порождают и новые вопросы. В частности, последние исследования показали, что можно считать надёжно установленным экспериментальным фактом то, что электрическое поле  $E$  в облаках значительно ниже порога электрического пробоя  $E_{th}$  [1, 2, 9]. Как же тогда инициируются молнии? Как возникают в активный период грозы многочисленные разряды, генерирующие вспышки радиоизлучения [10]? Для ответа на эти вопросы естественно привлечь новый физический процесс — *пробой на убегающих электронах* (ПУЭ) [11, 12], который имеет низкий порог возбуждения, соответствующий наблюдаемому в грозовой атмосфере электрическим полям.

Обычный пробой возникает вследствие нагрева электронов в электрическом поле. При этом быстрые электроны, принадлежащие хвосту функции распределения, становятся способными ионизовать вещество и, следовательно, генерировать новые свободные электроны, в то время как медленные электроны исчезают либо вследствие рекомбинации в объёме, либо на стенках разрядной камеры. При достижении достаточно высоких значений электрического поля генерация новых электронов за счёт ионизации превосходит их исчезновение в результате рекомбинации, и их количество начинает

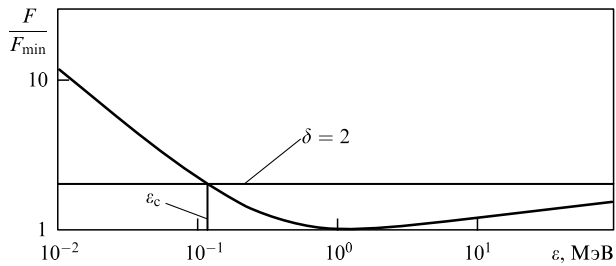


Рис. 1. Зависимость силы торможения  $F$  от энергии электрона  $\varepsilon$ . Сила  $F$  нормирована на  $F_{\min}$ , параметр  $\delta = E/E_c$ .

экспоненциально возрастает. Это явление называется электрическим пробоем вещества. Характерные энергии электронов, осуществляющих ионизацию, составляют 10–20 эВ. Рекомбинация происходит в основном при низких энергиях, поэтому средняя энергия электронов  $\bar{\varepsilon}$  обычно не превосходит нескольких электронвольт. Например, в воздухе  $\bar{\varepsilon} \sim 2$  эВ.

Пробой на убегающих электронах имеет существенно иную природу [13]. В его основе лежит взаимодействие быстрых частиц с веществом. Сила торможения энергичной частицы в веществе  $F$  определяется ионизационными потерями [14]. Из рисунка 1 видно, что сила  $F$  убывает с возрастанием энергии электрона  $\bar{\varepsilon}$ . Это вызвано тем, что быстрые электроны взаимодействуют с электронами и ядрами нейтрального вещества как свободные частицы, т.е. по закону Кулона. А сечение кулоновского рассеяния — сечение Резерфорда  $\sigma \sim 1/\varepsilon^2$ . Поэтому в нерелятивистской области сила торможения  $F \sim \varepsilon \sigma N_m \sim 1/\varepsilon$ , т.е.  $F$  пропорциональна плотности молекул  $N_m$  и обратно пропорциональна энергии электрона  $\varepsilon$ . Вследствие релятивистских эффектов уменьшение силы ионизационного торможения ослабевает. При  $\varepsilon \geq 1$  МэВ эта сила достигает минимума, а затем начинает логарифмически медленно возрастать (см. рис. 1).

С уменьшением силы трения связана возможность появления убегающих электронов в веществе, помещённом в электрическое поле. Действительно, если в среде есть постоянное поле  $E$ , такое, что  $E > E_c = F_{\min}/e$ , то электрон, имеющий достаточно большую энергию  $\varepsilon > \varepsilon_c$ , будет непрерывно ускоряться полем (см. рис. 1). Такие электроны называются убегающими [15].

Пробой на убегающих электронах связан с генерацией вторичных электронов, появляющихся вследствие ионизации нейтральных молекул быстрыми убегающими частицами. Хотя подавляющее большинство вторичных электронов имеет малые энергии, но могут родиться и электроны с достаточно большой энергией  $\varepsilon > \varepsilon_c$ . Такие электроны тоже станут убегающими, т.е. будут ускоряться полем (см. рис. 1), и они могут, в свою очередь, при ионизации генерировать частицы с  $\varepsilon > \varepsilon_c$ . В результате появляется экспоненциально нарастающая лавина убегающих электронов. Вместе с ними генерируется и огромное количество медленных электронов, что в итоге и приводит к электрическому пробоем вещества. Важно, что ПУЭ происходит в относительно слабом поле,  $E \geq 1,3E_c$ , которое на порядок меньше поля обычного электрического пробоя  $E_{th}$ . Например, в воздухе при атмосферном давлении  $E_{th} \approx 23$  кВ см<sup>-1</sup>, а  $E_c \approx 2,16$  кВ см<sup>-1</sup>.

Однако для осуществления ПУЭ выполнения только условия  $E \geq 1,3E_c$  недостаточно. Необходимо наличие

затравочных быстрых электронов с энергией, превосходящей критическую энергию убегания,  $\varepsilon > \varepsilon_c$ . Такие электроны в атмосфере всегда присутствуют — они эффективно генерируются космическими лучами (КЛ). Благодаря этому ПУЭ может реализоваться в грозовой атмосфере и оказать существенное влияние на развитие атмосферных электрических разрядов в активный грозовой период.

Активный грозовой период включает в себя несколько стадий: предварительный пробой, формирование и движение лидеров, основной возвратный удар, повторные возвратные удары и т.д. Можно предполагать, что в активный период в облаках электрическое поле превосходит  $E_c$  в широкой зоне [1], а в локальных областях (например, в стволе лидера) достигает и более высоких значений,  $E > E_{th}$  [3]. В этих областях могут локально развиваться пробой на убегающих электронах, сопровождающиеся импульсами гамма-излучения и радиоизлучения. Доказать существование ПУЭ и выявить его роль в атмосферных разрядах можно лишь с помощью прямых наблюдений непосредственно в грозовых облаках высокоэнергичных электронов и импульсов гамма-излучения, поскольку ни те, ни другие не распространяются на большие расстояния. Отметим, что важную роль могут играть не только вторичные электроны с энергией в области  $10^4 - 10^6$  эВ, но и первичные частицы КЛ с энергией  $10^{14} - 10^{16}$  эВ, инициирующие широкие атмосферные ливни (ШАЛ). Типичная высота образования молний "облако-земля" составляет 4–6 км, что соответствует характерной высоте максимума числа частиц в ливнях, образуемых КЛ с энергией более  $10^{15}$  эВ. Поэтому создание на таких высотах установки, позволяющей проводить совместное, комплексное изучение высокоэнергичных КЛ, вспышек гамма-излучения, рентгеновского и радиоизлучений от молниевых разрядов является крайне актуальной задачей.

Тянь-Шаньская высокогорная научная станция космических лучей ФИАН (ТШВНС) представляет собой уникальное место для изучения физики грозового разряда. Созданный и в течение нескольких лет набирающий статистику комплекс "Гроза" является комплексной установкой, на которой проводятся регулярные исследования атмосферных разрядов с одновременной регистрацией излучения различных типов: электронного, гамма- и рентгеновского излучения, радиоизлучения в диапазоне 0,1–30 МГц и на частоте 250 МГц. Все детекторы комплекса "Гроза" работают непрерывно в автоматическом режиме в период сезона гроз (с мая по сентябрь). Преимуществом установки "Гроза" является также то обстоятельство, что она находится на высотах от 3340 м до 4000 м над уровнем моря, т.е. на уровне формирования грозовых облаков над горами Северного Тянь-Шаня, внутрь которых оказываются погружёнными детекторы экспериментального комплекса.

Первые результаты, показавшие существенное усиление излучения в диапазоне 100–500 кэВ во время грозы, нами были получены еще в 2002 г. [16]. Затем на установке были обнаружены корреляции коротких импульсов радиоизлучения с приходом ШАЛ [17]. Во время грозы наблюдались биполярные импульсы коротковолнового (КВ) радиоизлучения, совпадающие по времени в пределах 50 мкс с триггерными сигналами, формируемыми установкой ШАЛ. В отсутствие грозы такие импульсы никогда не наблюдались. На следующем этапе измере-

ний было установлено, что, как и в равнинных условиях [18, 19], КВ-радиоизлучение каждой молнии начинается с очень короткого биполярного импульса с длительностью нарастания порядка 100 нс [20]. Форма, ширина и амплитуда начального импульса согласовывались со значениями, предсказываемыми теорией совместного действия пробоя на убегающих электронах и ШАЛ, инициированного первичной частицей с энергией порядка  $10^{15} - 10^{16}$  эВ.

В данном сообщении представлены результаты новых наблюдений влияния космических лучей и пробоя на убегающих электронах на грозовые процессы в атмосфере. В разделе 2 кратко изложены некоторые замечания к теории пробоя на убегающих электронах. В разделе 3 описан экспериментальный комплекс "Гроза", на котором проводятся измерения различных видов излучения в период грозовой активности. Раздел 4 посвящён описанию методики отбора зарегистрированных различными детекторами комплекса "Гроза" событий, которые представляют интерес для исследования процессов в грозовой атмосфере. В разделе 5 подробно изложены основные результаты экспериментов, выполненных в течение сезона 2007 г. Среди них следует отметить наблюдение в период активной фазы грозы коротких интенсивных всплесков гамма-излучения. Впервые обнаружены специфические разряды ПУЭ-ШАЛ, вызванные совместным действием в грозовой атмосфере ПУЭ и ШАЛ. Обнаружение интенсивных длительных (10–100 мс) всплесков гамма-излучения и его корреляции с радиоизлучением может служить первым экспериментальным свидетельством того, что собирание и перенос заряда от облаков к лидеру молнии в активный грозовой период происходит при определяющей роли ПУЭ.

## 2. Замечания к теории пробоя на убегающих электронах

### 2.1. Асимптотическое решение

Задача о пробое в кинетической теории ставится следующим образом. Рассматривается кинетическое уравнение для электронов в пространстве координат  $\mathbf{r}$  и импульсов  $\mathbf{p}$ . Электрическое поле  $E$ , плотность нейтральных молекул  $N$ , их заряд  $Z$  и другие структурные параметры вещества, определяющие соударения электронов, в наиболее простой постановке предполагаются постоянными. Интеграл соударений электронов линеаризуется. Тогда однородное, не зависящее от пространственных координат, асимптотическое по времени  $t$  решение кинетического уравнения для функции распределения электронов  $f(\mathbf{p}, t)$  носит экспоненциальный характер:

$$f(\mathbf{p}, t) \rightarrow f_{01}(p) \exp(v_1 t) + f_{02}(\mathbf{p}) \exp(v_2 t).$$

Здесь  $v_i$  — собственное число линейного кинетического уравнения,  $i = 1, 2$ ,  $f_{0i}(\mathbf{p})$  представляет собой соответствующее собственное решение.

Экспоненциальное возрастание функции распределения, а следовательно, и числа электронов и означает электрический пробой вещества. Параметр  $v_i$  определяет частоту ионизации, а  $v_i^{-1} \approx \tau_i$  — характерное время пробоя. Существование двух независимых решений линейного кинетического уравнения означает наличие в любом диэлектрике двух типов пробоя — обычного ( $v_1$ ) и ПУЭ ( $v_2$ ).

### 2.2. Соотношения подобия

Пробой на убегающих электронах может происходить в любом веществе. Поскольку взаимодействие быстрых электронов — кулоновское и, следовательно, оно всегда носит одинаковый характер, то и ПУЭ для всех веществ имеет одну и ту же структуру и обладает замечательными свойствами подобия. А именно: критическое поле  $E_c$  в любом веществе пропорционально его плотности  $\rho$ . Если  $\rho$  выражено в граммах на  $1 \text{ см}^3$ , то

$$E_c = 1,8\rho [\text{МэВ см}^{-1}].$$

Соответственно критическая энергия убегания электронов  $\varepsilon$  связана с величиной электрического поля  $E$  соотношением

$$\varepsilon \cong \frac{m_e c^2}{2\delta},$$

где  $\delta = E/E_c$ .

Характерная длина пробоя  $l$  определяет масштаб возрастания экспоненты ПУЭ:

$$l = \frac{6,1}{\rho \delta^2} [\text{см}].$$

Видно, что  $l$  быстро убывает с возрастанием величины электрического поля ( $\sim \delta^{-2}$ ).

Характерное время пробоя  $\tau_2$  также убывает ( $\sim \delta^{-3/2}$ ), а частота ионизации соответственно возрастает:

$$\tau_2 \cong 10^{-10} \rho^{-1} \delta^{-3/2} [\text{с}],$$

$$v_2 \cong 10^{10} \rho \delta^{3/2} [\text{с}^{-1}].$$

В плотных веществах с  $\rho \approx 10 - 100 \text{ г см}^{-3}$  характерные времена пробоя исключительно малы. Добавим, что эти времена быстро убывают с возрастанием параметра  $\delta$ .

Отметим, что указанные соотношения подобия справедливы в ограниченной области изменения параметров  $\delta$ :

$$1,5 \leq \delta \leq 100 - 150.$$

### 2.3. Пробой на убегающих электронах в атмосфере

На рисунке 2 представлена частота ионизации ПУЭ  $v_2$  для воздуха в зависимости от величины электрического поля  $E$ . Видно, что частота ионизации ПУЭ монотонно возрастает с полем  $E$  ( $\sim E^{3/2}$ ). Частота же ионизации обычного пробоя  $v_1$  вначале очень быстро возрастает с увеличением  $E$  (примерно как  $\sim E^{5,5}$ ), а затем насыщается (см. [21–23]).

Важно, что ПУЭ является возможным уже при низких значениях электрического поля, т.е. в *слабом поле*, когда выполнено условие  $E_{\text{th}} > E > E_c$ . При этом частота ионизации весьма высока:

$$v_2 > 10^7 - 10^8 \text{ с}^{-1}.$$

Обычный пробой в слабом поле невозможен, он возникает лишь при условии  $E > E_{\text{th}}$ . И хотя частота ионизации обычного пробоя очень быстро возрастает с увеличением  $E$ , она всё же остается ниже частоты ионизации ПУЭ при увеличении поля вплоть до значения  $E \approx 2E_{\text{th}}$ . Это обстоятельство может оказаться весьма существенным и может приводить к появлению большого числа быстрых электронов в обычном разряде при  $2E_{\text{th}} \geq E \geq E_{\text{th}}$ . Можно полагать, что оно и является причиной наблюдаемых вспышек гамма-излучения как в

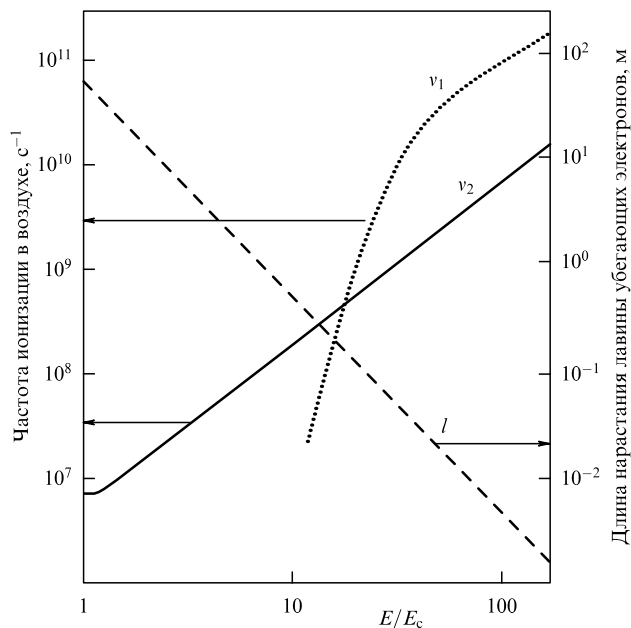


Рис. 2. Зависимости частоты ионизации при обычном пробое в воздухе  $v_1$  и в случае ПУЭ  $v_2$  (по левой шкале) от величины электрического поля. Также показана зависимость длины нарастания лавины убегающих электронов  $l$  от величины электрического поля (по правой шкале).

лидере молнии [24–26], так и в разрядах, изучающихся в лабораторных условиях [27–29].

Таким образом, по быстроте нарастания ионизации ПУЭ оказывается основным пробоем в воздухе не только при  $E < E_{th}$ , но и при более высоких значениях поля, вплоть до  $E = 2E_{th}$ .

Вторым важным параметром, представленным на рис. 2, является характерная длина  $l$ , которая определяет минимальный пространственный размер области пробоя. Видно, что в слабых полях,  $E \sim E_c$ , характерная длина весьма велика ( $l \approx 30–50$  м). Однако с возрастанием величины электрического поля  $l$  быстро уменьшается ( $\sim E^{-2}$ ), так что уже при  $E \approx (1–2)E_{th}$  длина  $l$  становится порядка 10–30 см. При высоких полях,  $E \gg E_{th}$ , характерная длина  $l$  становится совсем малой. Это показывает, что если при малых электрических полях исследование ПУЭ возможно только в грозовых облаках, то при более высоких значениях поля для наблюдения эффекта можно использовать и лабораторные установки.

#### 2.4. Влияние космических лучей

Как мы уже упоминали, для осуществления ПУЭ кроме выполнения условия  $E > E_c$  необходимо наличие затравочных быстрых электронов с энергией, превосходящей энергию убегания ( $\varepsilon > \varepsilon_c$ ). Эти условия могут быть реализованы в грозовых облаках. Как показывают наблюдения, максимальные электрические поля в грозовых облаках в атмосфере близки к критическому полю ПУЭ  $E_c$  [1, 2, 9]. Затравочными быстрыми частицами в грозовых облаках служат вторичные электроны КЛ, средняя плотность потока которых на высотах 4–8 км сравнительно велика:  $\Phi_e \approx 10^3 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Существенное отличие ПУЭ от обычного пробоя состоит в эффективной генерации рентгеновского и гамма-излучения. Именно наблюдение гамма-эмиссии с

энергией  $\varepsilon \sim 50–100$  кэВ служит указанием на возможное осуществление ПУЭ. Одновременно могут возбуждаться сильные электрические токи, приводящие к интенсивной генерации радиоизлучения.

Естественно, что число убегающих электронов пропорционально числу затравочных, образованных при взаимодействии первичных КЛ в атмосфере. Полное число  $N_e$  затравочных электронов в ШАЛ возрастает пропорционально энергии первичной частицы КЛ. Например, в ливне, образованном первичной частицей с энергией  $E_{CR} \approx 10^{15}$  эВ, содержится  $10^6$  затравочных электронов, а при  $E_{CR} \approx 10^{18}$  эВ —  $N_e \approx 10^{10}$ .

Когда ШАЛ проходит через грозовое облако, в котором  $E > E_c$ , возникает лавина убегающих электронов, экспоненциально увеличивающая число энергичных электронов ШАЛ. Одновременно в несколько миллионов раз возрастает и число тепловых электронов. Все вместе они и создают ПУЭ-ШАЛ-разряд [30]. Вследствие огромного числа высокоэнергичных электронов этот разряд должен, естественно, сопровождаться сильным импульсом гамма-излучения.

### 3. Экспериментальный комплекс "Гроза"

Экспериментальный комплекс "Гроза" состоит из следующих установок: системы регистрации ШАЛ, системы сцинтилляционных NaI-детекторов, двух независимых радиосистем, детектора скачка статического электрического поля и его высокочастотной составляющей (рис. 3). Максимальное разнесение детекторов комплекса в горизонтальной плоскости достигает 2–2,5 км, что позволяет изучать не только временное, но и пространственное распределения интенсивности различных видов излучения внутри облаков (и даже отслеживать перемещение источников излучения вместе с облаком). Рельеф Тянь-Шаньской станции очень удобен для исследований такого рода: благодаря двум близким склонам, окружающим горный перевал, на котором расположена станция, оказалось возможным разместить пункты регистрации излучений на различных высотах (в пределах 3,4–4 км над уровнем моря) и получить профили распределения излучений внутри облаков не только в горизонтальной, но и в вертикальной плоскости.

#### 3.1. Система регистрации широких атмосферных ливней

Система регистрации ШАЛ состоит из распределённых по территории станции нескольких десятков детекторов, созданных на основе газоразрядных счётчиков Гейгера СИ5Г. Эта ливневая система фиксирует момент прохождения ШАЛ, позволяет оценить его размер, а также энергию первичной частицы. Один детектор ШАЛ состоит из 20 счётчиков СИ5Г с запараллеленными анодами, а его чувствительная площадь составляет около  $0,6 \text{ м}^2$ . Каждый детектор ШАЛ установлен в отдельном пункте регистрации, взаимное расположение которых показано на рис. 3. Для подавления фона электронов низких энергий все детекторы ливневой системы окружены железными фильтрами толщиной 10 см. Характерный размер разнесения соседних детекторов составляет около 65 м. Чувствительная область всего массива ливневой системы равна примерно  $0,1 \text{ км}^2$ .

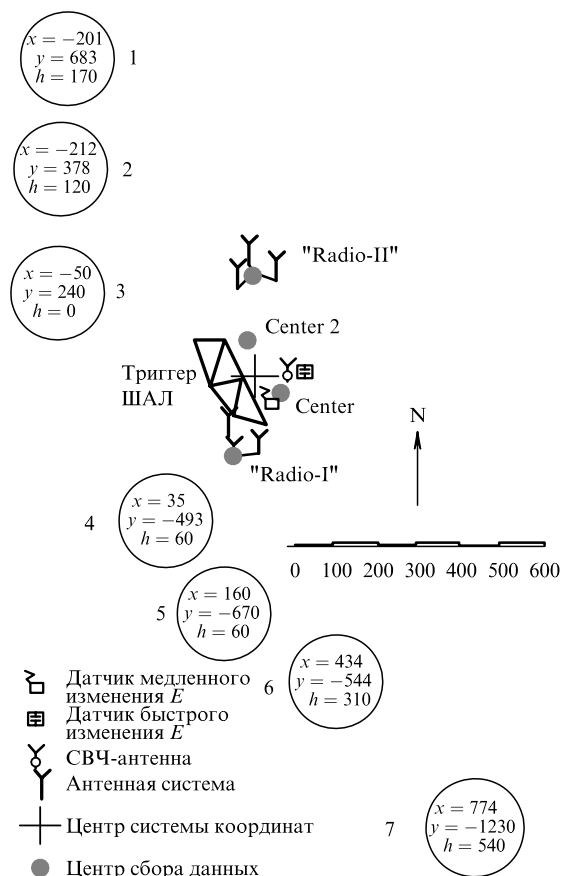


Рис. 3. Экспериментальный комплекс "Гроза": система регистрации ШАЛ (триггер ШАЛ) показана в виде многоугольника; системы сцинтилляционных NaI-детекторов показаны кружками (1–7) с указанием координат (в метрах) по высоте относительно пункта "Center", расположенного на уровне ТШВНС; две независимые радиосистемы ("Radio-I", "Radio-II"), детекторы "медленного" и "быстрого" электрического поля. На схеме соблюден масштаб расположения установок на ТШВНС.

### 3.2. Система сцинтилляционных детекторов гамма-излучения

Для регистрации мягкого гамма-излучения и жёсткого рентгеновского излучения от электронов, ускоренных в электрических полях грозового облака, используются 14 сцинтилляционных детекторов на основе кристаллов NaI. Семь пунктов регистрации расположены на склонах окружающих гор цепью, поперёк обычного направления движения грозовых облаков (см. рис. 3). Расстояние между крайними пунктами в этой цепи составляет  $\approx 2$  км, а максимальное разнесение детекторов по вертикали достигает  $\approx 600$  м. Построенная таким образом сцинтилляционная система позволяет исследовать пространственное распределение излучения внутри грозовых облаков как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях.

В каждом пункте регистрации размещаются два сцинтилляционных детектора, так что в одном из них кристалл NaI, соединённый с фотоэлектронным умножителем ФЭУ-49, находится внутри алюминиевого корпуса толщиной 1 мм (Sc-II), а в другом — внутри полиэтиленовой трубы с толщиной стенки 10 мм (Sc-I). В результате эти детекторы имеют различные пороги регистрации по отношению к гамма-излучению. Кроме того, в наиболее удалённых от центра системы пунктах (1, 2, 6 и 7

на рис. 3) дополнительно установлено по одному "пустому" детектору, содержащему ФЭУ-49 без кристалла NaI. Сигналы "пустых" детекторов, подключаемые к общей системе регистрации, служат для контроля за уровнем электромагнитных наводок на кабелях, соединяющих пункты их расположения с центром сбора данных.

В сцинтилляционных детекторах при прохождении частицы через кристалл NaI вырабатываются электрические импульсы с переменной амплитудой, величина которой пропорциональна энергии, рассеянной заряженной частицей или гамма-квантом внутри кристалла (в случае полного поглощения в кристалле эта амплитуда пропорциональна первичной энергии частицы или кванта). Далее сигналы сцинтилляторов подаются на быстрые амплитудные анализаторы, которые представляют собой набор параллельно работающих амплитудных дискриминаторов, настроенных на шесть порогов срабатывания. Выходные сигналы дискриминаторов являются импульсами со стандартной амплитудой и длительностью, интенсивность которых измеряется с помощью пересчётных схем отдельно для каждого из шести амплитудных диапазонов. Абсолютная энергетическая калибровка детекторов производилась с помощью источников гамма-излучения  $^{241}\text{Am}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

Измерения интенсивности гамма-излучения, сопровождающего прохождения грозовых облаков, проводились в режиме высокого временного разрешения. Интенсивность сигналов от каждого сцинтиллятора измерялась на протяжении временного скана, состоящего из 4000 последовательных временных интервалов длительностью по 200 мкс, что позволяет подробно исследовать временную развёртку кратковременных вспышек излучения. Система временного сканирования работает непрерывно, сохраняя в каждый момент в своей памяти временной ход интенсивности сцинтилляционных импульсов за последние 0,8 с. Если в течение этого временного интервала поступает триггерный сигнал, то система сбора данных продолжает свою работу в течение ещё 0,4 с, после чего накопленная информация записывается на диск управляющего компьютера. Таким образом, в каждом зарегистрированном событии сохраняется временная развёртка интенсивности сигналов с разрешением 200 мкс за 0,4 с до поступления триггерного сигнала и в течение 0,4 с после него.

### 3.3. Радиосистемы

Электромагнитное излучение грозовых разрядов исследовалось с помощью двух радиостанов ("Radio-I" и "Radio-II" на рис. 3), работающих в диапазоне частот 0,1–30 МГц и позволяющих регистрировать волновую форму импульсов излучения с временным разрешением около 16 нс, а также по относительным задержкам радиосигналов определять направление на источник излучения [18, 19]. Каждая из установок содержит три антенны: две скрещенные под углом  $90^\circ$  рамочные антенны предназначены для измерения горизонтальной магнитной компоненты, а третья, штыревая, антенна используется для измерения вертикальной электрической компоненты электромагнитного поля.

Радиостановки работают в режиме внешнего триггера с полной длительностью записи 200 мс и длительностью предыстории — записи до прихода триггерного импульса — 160 мс.

Кроме того, использовалась установка "Radio-E", предназначенная для регистрации ультракоротких волн (УКВ) радиоизлучения на частоте около 250 МГц. В состав этой установки также входят детекторы, измеряющие изменение электрического поля в грозовых условиях: квазистатическое "медленное" электрическое поле измеряется электростатическим флюксометром (типа "field mill"), а вариации электрического поля в диапазоне частот 0,5–25 кГц ("быстрое" поле) измеряются с помощью датчика конденсаторного типа.

#### 4. Отбор событий для анализа

Для изучения влияния космических лучей и пробоя на убегающих электронах на развитие разрядов в грозовой атмосфере необходимо проводить непрерывный мониторинг ШАЛ, регистрировать короткие вспышки излучений в гамма-диапазоне, рентгеновском и радиодиапазонах и исследовать их временные корреляции. В теории пробоя на убегающих электронах предполагается, что короткие вспышки гамма- и рентгеновского излучения от грозовых облаков должны возникать в результате развития лавины энергичных электронов, ускоренных в электрическом поле грозового облака. Затравочными электронами, обладающими необходимой для ускорения энергией, являются вторичные электроны КЛ. В частности, в грозовых облаках могут возникать инициированные прохождением через атмосферу ШАЛ разряды, которые порождаются частицами КЛ с энергией  $E_{CR} \geq 10^{15}$  эВ. Соответственно этим физическим механизмам генерации вспышек и были выбраны условия выработки триггерного сигнала для системы регистрации.

##### 4.1. Триггер широких атмосферных ливней

Для исследования временных корреляций момента прохождения ШАЛ и гамма-излучения, рентгеновского и радиоизлучений формировался ливневой триггер. Сигнал такого триггера вырабатывался при совпадении импульсов от четырёх соседних детекторов ливневой установки в интервале 5 мкс. Конфигурация ливневой триггерной системы, представленная на рис. 3, обеспечивает эффективный отбор ШАЛ с энергией первичной частицы  $E_{CR} \geq 10^{15}$  эВ.

##### 4.2. Триггер скачка электрического поля

Для изучения изменений интенсивностей гамма-излучения, рентгеновского и радиоизлучений, связанных с образованием и развитием молний в грозовой атмосфере, использовался триггер скачка электрического поля. Поскольку разряд облако–земля сопровождается быстрым (в течение нескольких микросекунд) падением напряжённости поля, триггерный сигнал вырабатывался датчиком вариаций электрического поля в момент резкого изменения ("скачка") напряжённости поля. Был выбран высокий порог срабатывания устройства генерации триггера, который соответствовал очень близким молниевым разрядам, что обусловило малое количество триггерных сигналов данного типа.

##### 4.3. Электромагнитный триггер

Так как длина кабельных трасс, соединяющих удалённые пункты размещения детекторов с центром регистрации,

достигает примерно 2 км, то близкие к трассе атмосферные разряды наводят электромагнитный импульс на длинный кабель. Такой электромагнитный импульс, непосредственно совпадающий с разрядом внутри грозового облака, также использовался в качестве триггерного сигнала.

#### 4.4. Статистика зарегистрированных событий

Анализ данных измерений на установке "Гроза" проводился на основе сравнения двух выборок событий, одна из которых соответствовала периоду ясной, безоблачной погоды, а другая — времени, в которое через горный перевал Тянь-Шаньской станции проходили плотные электрически заряженные облака, сопровождаемые молниевыми разрядами. В последнем случае обычно самые верхние пункты регистрации излучений (6 и 7 на рис. 3) оказывались в наибольшей степени (по сравнению с нижними пунктами) погружёнными внутрь грозового облака.

Общее число событий, зарегистрированных в течение обоих периодов измерений, приведено в таблице.

**Таблица.** Статистика зарегистрированных событий в период ясной погоды и в грозовых условиях

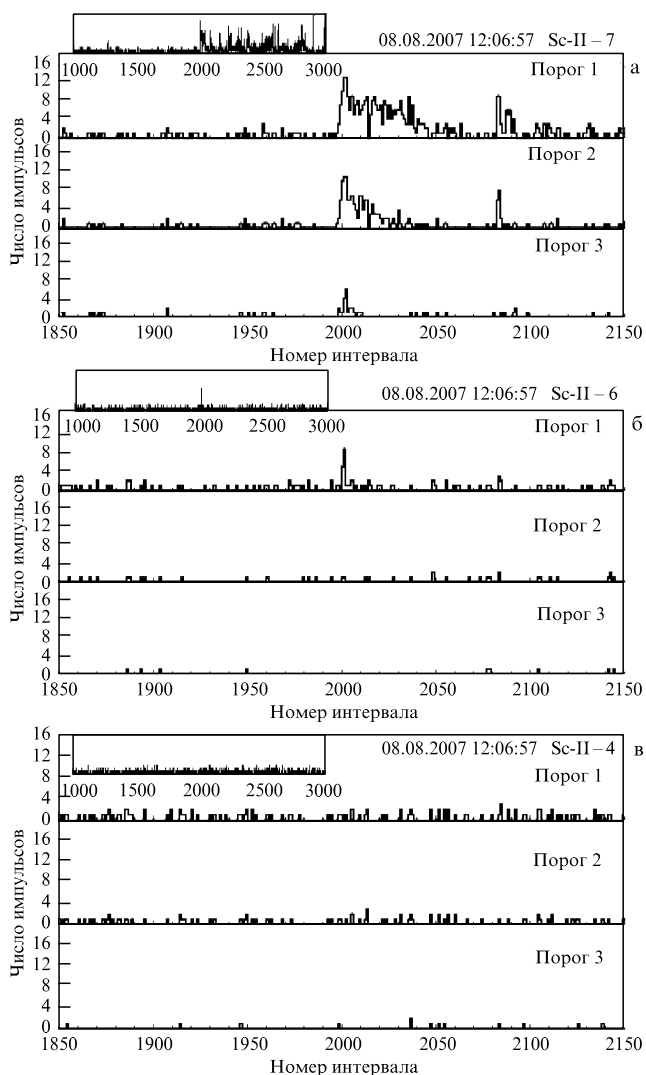
Типы событий	Число событий при ясной погоде (безоблачном небе), 11 ч. регистрации, 13 августа 2007 г.	Число событий в условиях грозы, 11 ч. регистрации, 4, 7, 8 и 15 августа 2007 г.
Триггеры ШАЛ	611	600
Число событий в час	$55 \pm 2$	$54 \pm 2$
События с триггерами ШАЛ, в которых содержатся кратковременные вспышки гамма-излучения	0	14
Триггеры скачка электрического поля	0	13
Электромагнитные триггеры	0	503

Следует отметить, что от триггера ШАЛ и триггера скачка поля срабатывали как системы сцинтилляционных детекторов, так и радиосистемы. Что касается электромагнитного триггера, который, по сути, не вырабатывался, а возникал при близком к кабельной трассе разряде, то статистика этого типа событий в полной мере отвечает только срабатываниям сцинтилляционных детекторов. Временная синхронизация записей данных со сцинтилляционных детекторов и радиосистем показывает, что при запуске этих систем по электромагнитному триггеру наблюдается однозначная корреляция.

## 5. Результаты эксперимента на установке "Гроза"

### 5.1. Длительные вспышки гамма-излучения и их корреляции с радиоизлучением

Сильные электромагнитные импульсы, приводящие к выработке электромагнитного триггера, в подавляющем большинстве приводят к сильным всплескам



**Рис. 4.** Вспышки гамма-излучения, регистрируемые при запуске сцинтилляционных детекторов электромагнитным триггером. Интенсивности показаны для трёх пунктов регистрации: (а) 7 (540 м над уровнем ТШВНС); (б) 6 (310 м); (в) 4 (на уровне ТШВНС). Для каждого пункта показаны интенсивности одного счётчика при трёх порогах регистрации, соответствующих минимальной энергии регистрируемых гамма-квантов 30, 60 и 120 кэВ.

гамма-излучения. Типичный пример вспышек гамма-излучения, регистрируемых при запуске сцинтилляционных детекторов электромагнитным триггером, показан на рис. 4, где для каждого из пунктов 4, 6 и 7 приводятся временные развёртки интенсивности сигналов одного из установленных на нём сцинтилляторов (того, который имеет меньший энергетический порог регистрации гамма-квантов). Для каждого из представленных детекторов временные развёртки приведены в трёх энергетических диапазонах, различающихся между собой по нижним амплитудным порогам, соответствующим минимальной энергии регистрируемых гамма-квантов в 30, 60 и 120 кэВ. Оси абсцисс на рис. 4 проградуированы последовательными номерами: 200 микросекундных интервалов временной развёртки; интервал с номером 2000 соответствует моменту поступления триггера.

Из верхнего графика рис. 4а видно, что за 200–400 мкс до электромагнитного триггера сцинтилляционный детектор, который находится в самой высокой точке 7,

начинает регистрировать возрастание интенсивности гамма-излучения. Это излучение нарастает исключительно быстро, достигает максимума в момент триггера и продолжается затем в течение 10 мс. Как видно из врезки верхнего графика, на протяжении дальнейшей временной развёртки наблюдаются многочисленные аналогичные вспышки, которые возникают вплоть до 3000-го временного интервала (200 мс после срабатывания триггера).

Фоновый уровень сигналов на протяжении первых 1600 временных интервалов рассматриваемой развёртки составляет  $0,35 \pm 0,01$  импульса на интервал. В максимуме рассматриваемой вспышки число приходящихся на один временной интервал импульсов увеличивается до 10–12, что соответствует возрастанию интенсивности гамма-излучения в 30–35 раз. Средняя интенсивность сигналов во время первой вспышки (на протяжении временных интервалов с 1998-й по 2046-й) составляет  $5,9 \pm 0,3$  импульсов на интервал, в 17 раз превышая фоновую. С увеличением энергии гамма-квантов интенсивность сигналов во время вспышки быстро уменьшается, хотя и остаётся на порядок выше фоновой. Средняя интенсивность вспышки во втором энергетическом диапазоне (с порогом 60 кэВ) составляет  $3,0 \pm 0,3$  импульсов на интервал (в 15 раз выше фоновой), а в третьем (с порогом 120 кэВ) — только  $0,6 \pm 0,1$  импульсов на интервал (в 10 раз выше фоновой). Таким образом, с точки зрения статистической обеспеченности наблюдаемый эффект не вызывает сомнений.

На рисунке 4б, показана интенсивность гамма-квантов, зарегистрированная детектором (при трёх разных энергетических порогах), находящимся на 230 м ниже. Та же самая вспышка выражена гораздо слабее, проявляя себя только в сигналах с минимальным энергетическим порогом. И наконец, в детекторе, находящемся ещё на 130 м ниже (рис. 4в), какие-либо особенности в момент разряда вообще незаметны.

Описанный характер вспышки излучения представляет собой типичное явление, видимое на большинстве временных разверток событий, которые в моменты электрических разрядов зарегистрированы сцинтилляционными детекторами, оказавшимися внутри грозовых облаков. Такими вспышками сопровождаются не менее 80 % событий, зарегистрированных во время грозы с триггером от скачка поля или электромагнитным триггером, в то же время при ясной погоде такие вспышки не наблюдаются. Последнее говорит о том, что эти вспышки обусловлены присутствием электрически заряженных облаков в области расположения детекторов. Примеры других событий с длительными вспышками гамма-излучения представлены на рис. 5. В частности, на самой верхней развертке на рис. 5 вспышка гамма-излучения резко обрывается в момент срабатывания электромагнитного триггера. Возможно, это был первый возвратный удар молнии, так как обычно после него радиоизлучение на некоторое время замирает. Здесь мы видим аналогичное временное (см. развёртку) замирание активности гамма-излучения.

Для длительных вспышек гамма-излучения характерным является распределение их излучения в вертикальной плоскости: все такие вспышки наиболее ярко проявляют себя в самом верхнем из детекторных пунктов, максимально погружённом внутрь грозового облака. При этом основная доля сигналов приходится на им-

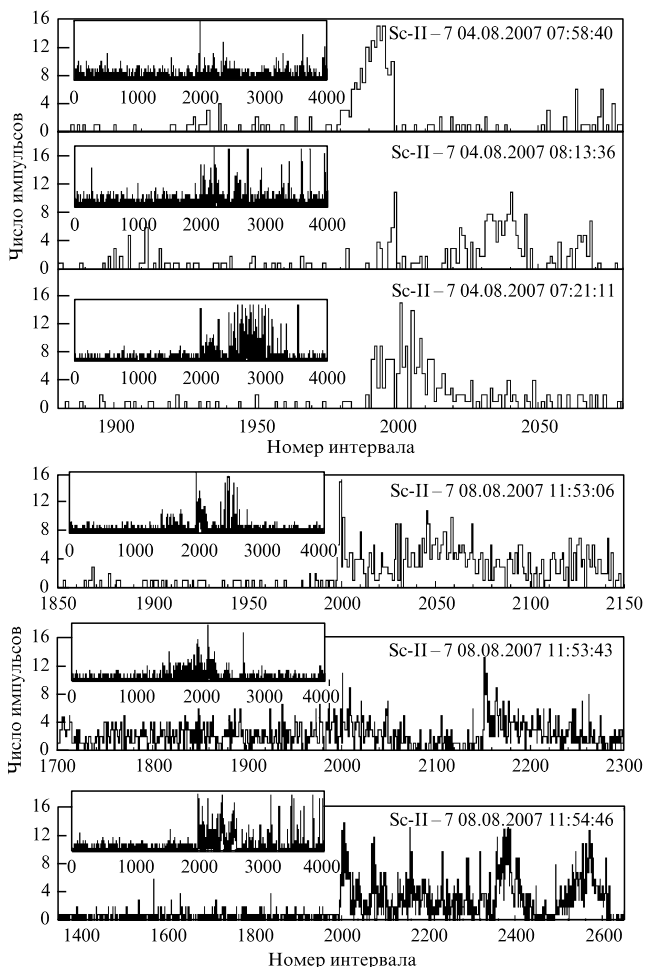


Рис. 5. Временные развёртки интенсивности гамма-излучения при триггере от электромагнитного импульса на высоте 540 м (пункт 7) над уровнем ТШВНС для детектора Sc-II с порогом 30 кэВ.

пульсы с наименьшим энергетическим порогом. Таким образом, можно сделать вывод о том, что область генерации излучения вспышек находится в глубине грозового облака, а основная доля генерируемого излучения состоит из гамма-квантов с невысокой энергией.

Триггером в рассматриваемых примерах служит импульс электромагнитного излучения, создающийся электрическим разрядом. В тот же момент на развёртках виден сильный импульс гамма-излучения. Следовательно, имеет место ярко выраженная корреляция электрического разряда в грозовой атмосфере со всплесками гамма-излучения. Это подтверждает совместное наблюдение гамма-излучения и радиоизлучения. Пример приведен на рис. 6, из которого видна хорошая временная корреляция гамма- и радиоизлучения в течение 100 мс.

### 5.2. Межоблачный разряд, вызванный широким атмосферным ливнем (ПУЭ-ШАЛ-разряд)

Анализ временных развёрток событий, представленных в таблице, позволил выделить в грозовых условиях четыре кратковременные интенсивные вспышки гамма-излучения, точно совпадающие по времени с триггером ШАЛ. Одно событие произошло 15 августа 2007 г. в начальной стадии грозы, остальные три — 8 августа 2007 г. в период

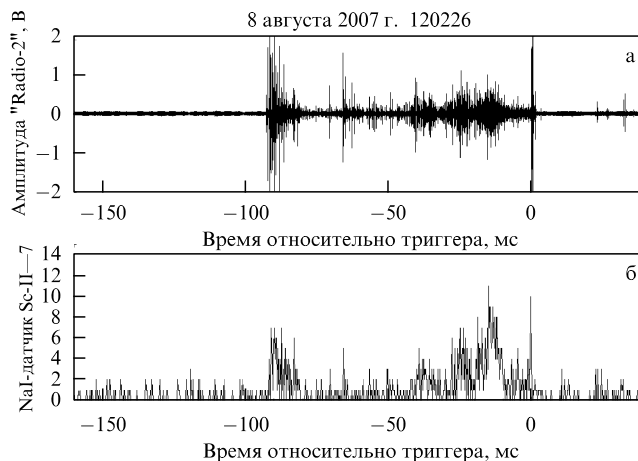


Рис. 6. Радиоизлучение (а) и вспышки гамма-излучения (б), зарегистрированные по электромагнитному триггеру.

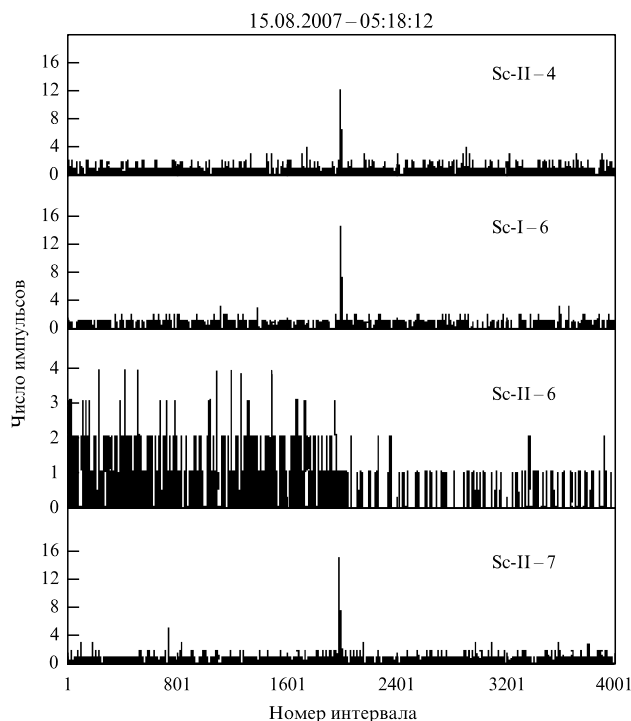


Рис. 7. Временная развёртка интенсивности гамма-излучения в событии, точно совпадающем по времени с триггером ШАЛ. Событие произошло в начальной стадии грозы.

активной фазы. Рассмотрим здесь два события: одно в начальной и одно в активной фазе.

Первое событие наблюдалось 15 августа 2007 г. в грозу, которая длилась в течение четырёх часов, с 05.18 до 09.40. Событие произошло в 05.18.12 в самой начальной стадии грозы. Широкий атмосферный ливень был зафиксирован всеми шестью детекторами системы триггера ШАЛ. Это означает, что ШАЛ был генерирован частицей КЛ с энергией не менее  $10^{16}$  эВ. Импульс гамма-излучения был зарегистрирован в трёх наблюдательных пунктах: 7, 6 и 4. Временная развёртка интенсивности гамма-квантов представлена на рис. 7. Как видно из рис. 7, можно выделить следующие характерные особенности данной вспышки: 1) сильный импульс гамма-излучения был зарегистрирован во всех наблюда-

тельных пунктах одновременно; 2) длительность вспышки укладывается в один временной интервал развёртки, т.е. составляет менее 200 мкс; 3) момент гамма-вспышки во всех наблюдательных пунктах точно совпадает с моментом прихода ШАЛ; 4) в тот же момент зарегистрировано резкое падение фона гамма-излучения.

Отметим, что расстояние между наблюдательными пунктами 4 и 7 составляет порядка 1100 м и эти пункты разнесены по высоте на 600 м (см. рис. 3). Следовательно, сильное гамма-излучение покрывает значительную площадь. Из рисунка 7 можно видеть также, что наблюдаемое распределение гамма-квантов по энергии имеет вид классического ПУЭ (см. раздел 5.3): небольшое различие в случаях 30 кэВ (первый порог) и 60 кэВ (второй порог) и резкое падение в случае 120 кэВ (третий порог).

Особое внимание следует обратить на резкое изменение гамма-фона в пунктах 6 и 7, которое видно на рис. 7. Среднее значение фона в пункте 6 уменьшается точно в момент триггера в три раза. В пункте 7 фон нарастает в течение 50 мс до момента триггера и тоже резко снижается (примерно в три раза) точно в момент триггера. Повышение гамма-фона, создаваемого КЛ, является следствием увеличения потока быстрых электронов в сильном грозовом поле под действием ПУЭ. Резкое падение фона означает, что резко понизилась величина электрического поля в облаке, которое пересёк ШАЛ. То есть произошёл электрический разряд облака — совместное действие ПУЭ и ШАЛ вызвало макроскопический эффект. Таким образом, мы прямо наблюдаем ПУЭ-ШАЛ-разряд (RB-EAS discharge).

Пример события, произошедшего в период активной фазы грозы, наблюдаемой 8 августа 2007 г., представлен на рис. 8. Гроза длилась 1 час: с 11.50 до 12.50. Событие произошло в 12.35 во время активной фазы грозы. ШАЛ был зафиксирован детекторами, расположенными в четырёх пунктах регистрации. Это означает, что энергия космической частицы была не менее  $10^{15}$  эВ. Сильный импульс гамма-излучения был зарегистрирован в трёх наблюдательных пунктах — 5, 6 и 7. Как видно из временных развёрток гамма-излучения, представленных на рис. 8, сильный импульс гамма-излучения наблюдается одновременно с триггером ШАЛ во всех наблюдательных пунктах. На рисунке 8г также показан измеренный радиосигнал. Виден очень сильный импульс радиоизлучения, точно совпадающий по времени с моментом триггера ШАЛ. Это означает, что прохождение ШАЛ через грозовое облако сопровождалось сильным электрическим разрядом.

Рассмотренные события свидетельствуют о прямом наблюдении ПУЭ-ШАЛ-разряда. Это явление впервые зарегистрировано в эксперименте. Вероятность наблюдения ПУЭ-ШАЛ-разряда определяется двумя основными факторами. Во-первых, траектория первичной частицы КЛ, которая вызывает ПУЭ-ШАЛ-разряд, должна пересечь грозовое облако на расстоянии не более 400–500 м от сцинтилляционных детекторов, регистрирующих гамма-излучение. В противном случае из-за поглощения в атмосфере гамма-излучение не наблюдается. С другой стороны, та же траектория должна быть зафиксирована системой наблюдения ШАЛ. Эти условия сильно ограничивают количество возможных траекторий. Во-вторых, естественно, что значение электрического поля  $E$  в облаке, пересекаемом ШАЛ, должно быть выше критического поля ПУЭ:  $E > E_c$ . Последнее условие

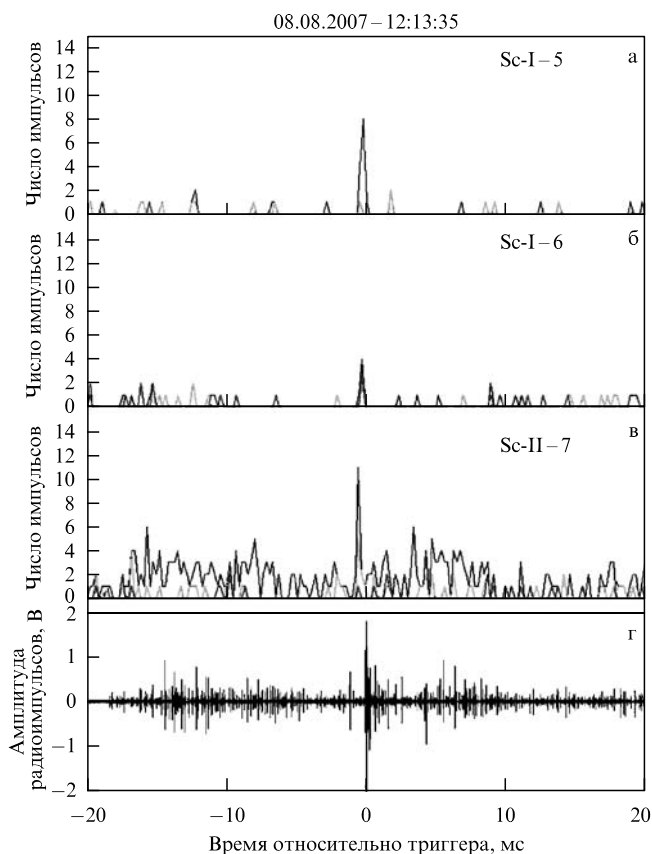


Рис. 8. Пример события, произошедшего в период активной фазы грозы, в котором наблюдается точное совпадение по времени вспышки гамма-излучения с моментом выработки триггера ШАЛ и радиоизлучения: на временных развёртках (а–в) показано время вспышки, зарегистрированной сцинтилляционными детекторами в пунктах 4, 6 и 7, относительно триггерного импульса; на развёртке (г) показано совпадение импульса радиоизлучения с триггерным импульсом.

более часто выполняется в период активной фазы грозы. Вследствие необходимости выполнения этих двух условий прямое наблюдение ПУЭ-ШАЛ-разряда — очень редкое событие, порядка 1 событие на 100 наблюдаемых в грозу "простых" ШАЛ. Эта оценка согласуется с результатами наших наблюдений. Мы наблюдали всего 4 ПУЭ-ШАЛ-разряда из 600 событий, зарегистрированных по триггеру ШАЛ.

Как уже указывалось выше, теория предсказывала возможность ПУЭ-ШАЛ-разряда. Этот разряд рассматривался в теории как один из важных процессов в грозовой атмосфере. В частности, предполагалось, что ПУЭ-ШАЛ-разряд лежит в основе высотного межоблачного NBE-разряда [8]. Специфические черты NBE (Narrow Bipolar Event) — гигантская мощность радиоимпульса, слабое оптическое излучение, отсутствие ступенчатого лидера, полное развитие за время в несколько микросекунд — находятся в согласии с предсказаниями, основанными на теории ПУЭ-ШАЛ-разряда [31]. Однако сам ПУЭ-ШАЛ-разряд до сих пор никогда не наблюдался.

### 5.3. Спектр гамма-излучения ступенчатого лидера молнии

Анализ всех зарегистрированных событий с триггером ШАЛ, показал что в 14 событиях из 600 наблюдались

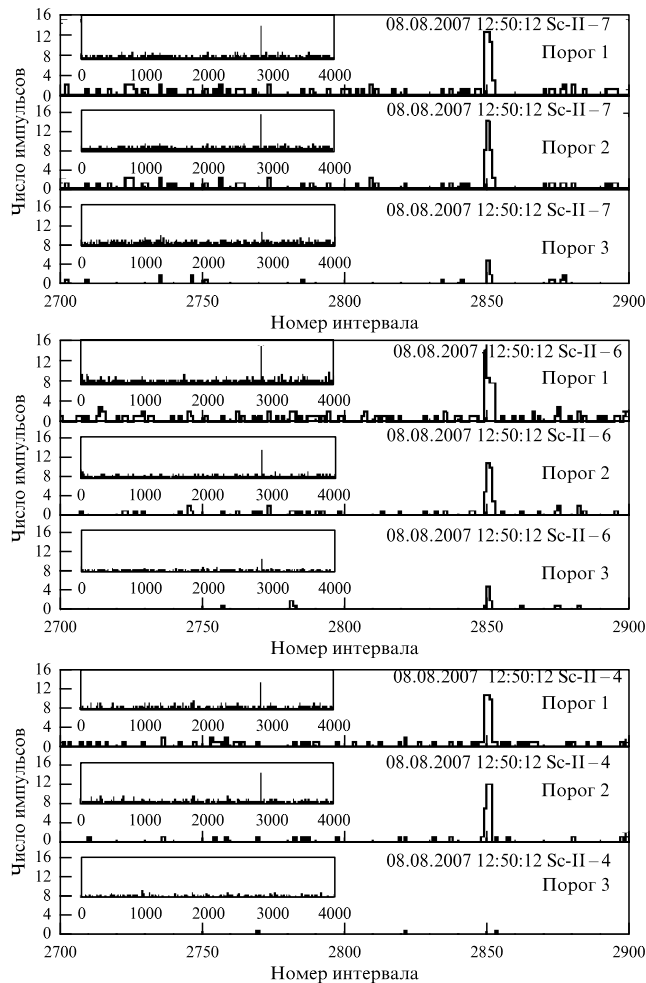


Рис. 9. Временные развёртки интенсивности гамма-излучения, зарегистрированного сцинтилляционными детекторами по триггеру ШАЛ. Последовательность развёрток аналогична таковой на рис. 4.

короткие интенсивные всплески гамма-излучения длительностью 400–800 мкс. Типичные примеры регистрации сцинтилляционными счётчиками короткой всплески гамма-излучения показаны на рис. 9 и 10, где для каждого из пунктов 4, 6 и 7 приводятся временные развёртки интенсивности сигналов одного из установленных в нём сцинтилляторов (Sc-II, того, который имеет меньший энергетический порог регистрации гамма-квантов). На рисунке 9 показано событие, в котором интенсивный гамма-всплеск наблюдался спустя 170 мс после срабатывания триггера. Длительность всплеска составляет 400–600 мкс. Пространственное распределение всплеска составляет более 1 км, так как он виден одновременно на четырёх наблюдательных пунктах (7, 6, 4 и 3) при всех энергетических порогах. Временная развёртка другого события показана на рис. 10.

Для восстановления энергетического спектра гамма-квантов было проанализировано 14 событий. В этих событиях для каждого сцинтилляционного детектора подсчитывалось число гамма-квантов с энергиями выше 30, 40, 60, 70, 120 и 320 кэВ. При этом использовались результаты калибровки детекторов. Сопоставляя результаты наблюдений на различных энергетических порогах и во всех наблюдательных пунктах, можно увидеть, что их интегральные спектры подобны друг

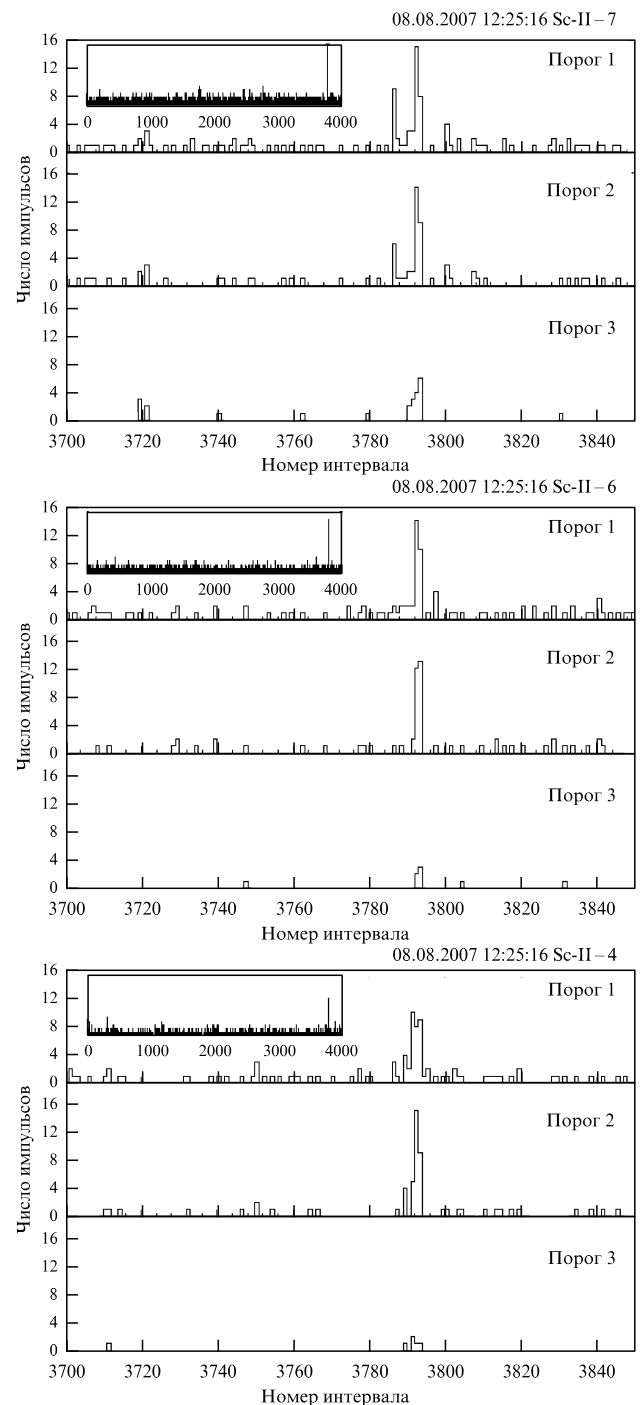
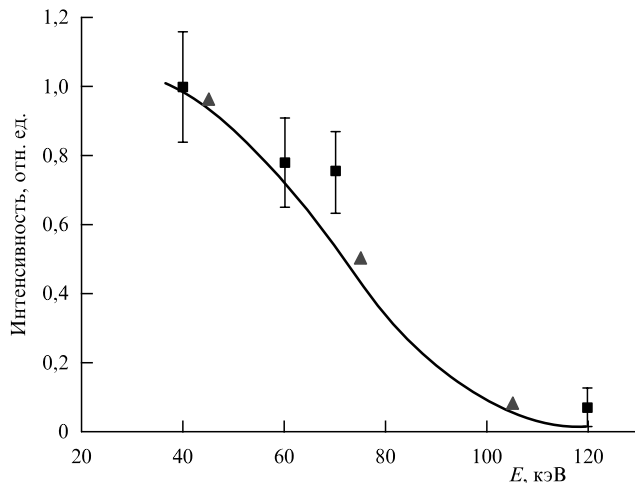


Рис. 10. Пример события с кратковременной всплеской гамма-излучения, аналогичного приведённому на рис. 9.

другу. Построенный таким образом характерный спектр представлен на рис. 11. Средняя энергия гамма-кванта в кратковременной всплеске составляет 80 кэВ.

Отметим, что короткие всплески гамма-излучения, связанные со ступенчатым лидером молнии, были обнаружены в работе [24]. В [25] было показано, что они хорошо коррелируют со скачками ступенчатого лидера. Последние наблюдения, в которых изучалось это явление, установили, что гамма-излучение генерируется в ступенчатом лидере перед возвратным ударом и длится 200–400 мкс [26]. Лидер проходит за это время расстояние 200–400 м. Это расстояние является характеристи-



**Рис. 11.** Интегральный спектр кратковременных вспышек гамма-излучения, зарегистрированных в событиях в грозовой атмосфере: данные, полученные на установке "Гроза", показаны квадратами с ошибками измерений, данные баллонного эксперимента — треугольниками. Приведена также теоретическая кривая.

кой поглощения гамма-квантов в атмосфере на уровне моря. На высотах ТШВНС поглощение в 1,5 раза меньше, так как оно пропорционально плотности воздуха. Поэтому естественно предположить, что наблюдаемые в нашем эксперименте короткие (400–800 мкс) интенсивные всплески гамма-излучения являются излучением ступенчатого лидера перед возвратным ударом молнии. Согласно предположениям теории гамма-излучение может генерироваться при ПУЭ в характерном для ступенчатого лидера электрическом поле  $E \simeq 2E_{th}$  (см. раздел 2.3). При этом частота ионизации ПУЭ сильно зависит от макроскопических параметров среды: величины электрического поля  $E$ , молекулярной плотности  $N_m$ . В то же время энергетический спектр, как убегающих электронов, так и гамма-излучения, генерируемого ими, имеет одну и ту же характерную форму.

На рисунке 11 нормализованный интегральный спектр, предсказываемый теорией, сопоставлен с результатами нашего эксперимента. Мы видим, что теория и эксперимент хорошо согласуются. На рисунке также представлены экспериментальные результаты, полученные во время грозы на высоте 4 км с помощью шаразонда [32]. Электрическое поле в атмосфере, определённое в многочисленных экспериментах на шарах-зондах, принимает только малые значения — максимальное наблюдаемое значение поля  $3-9 \text{ кВ см}^{-1}$  [6, 7]. В этом случае ПУЭ инициируется вторичными электронами ШАЛ, проходящих через облако. Как видно из рис. 11, спектр гамма-излучения, полученный в эксперименте на шаре-зонде, хорошо согласуется с результатами как нашего эксперимента, так и теории. При интерпретации нашего эксперимента мы предполагаем, что ПУЭ инициируется быстрыми электронами, образующимися при пробое воздуха в сильном ( $50-60 \text{ кВ см}^{-1}$ ) электрическом поле головки ступенчатого лидера. Таким образом, несмотря на значительное различие величины электрического поля в облаке ( $3-9 \text{ кВ см}^{-1}$ ) и в ступенчатом лидере ( $50-60 \text{ кВ см}^{-1}$ ) интегральный спектр ПУЭ оказывается в обоих экспериментах достаточно близким и согласуется с теорией (см. раздел 2.3).

## 6. Заключение

В настоящем сообщении излагаются некоторые результаты теории ПУЭ и результаты экспериментальных исследований грозового разряда в атмосфере. Обсуждается связь этих проблем в контексте активной роли ПУЭ при развитии грозового разряда.

Пробой на убегающих электронах — новое и чрезвычайно общее явление, определяемое кулоновским взаимодействием быстрых электронов с веществом. В теории ПУЭ нами рассмотрены два основных новых момента. Первый связан с предложенным соотношением подобия, из которого следует, что ПУЭ для всех веществ имеет одну и ту же структуру. Вторым результатом является выделение неисследованной ранее области сильных значений поля в ПУЭ:  $2E_{th} \geq E \geq E_{th}$ . При этих значениях поля возможен как обычный пробой, так и ПУЭ. Важно, что частота ионизации для ПУЭ, т.е. быстрота его роста оказывается выше, чем при обычном пробое. Это означает, что ПУЭ в этой области может играть существенную роль. Как раз такие параметры характерны для лидера в искровом разряде, а возможно, и лидера в молнии.

Основное достижение проведённых исследований состоит в обнаружении в грозовом облаке интенсивных всплесков гамма-излучения в период активной фазы разряда. Трудность исследования грозового разряда заключается в том, что он представляет собой случайное, быстро развивающееся, масштабное явление. Поэтому важную роль играет аналогия с длинными искровыми разрядами, исследуемыми в лабораторных условиях. Одним из элементов искрового разряда является лидер, переносящий электрический заряд. Аналогичный лидер имеется и в грозовом разряде. Подробно исследован быстрый и очень мощный возвратный удар молнии. Однако принципиальное отличие искрового разряда состоит в том, что в нём имеется электрод, сбрасывающий накопленный в конденсаторе электрический заряд, тогда как в грозовом облаке электрический заряд распределён на каплях или на льдинках в километровых масштабах. Как снять этот заряд и доставить его к лидеру за несколько миллисекунд? Эта проблема ранее не обсуждалась сколько-нибудь подробно. Проводимость воздуха для переноса такого заряда недостаточно велика, её нужно повысить, по крайней мере, на 5–6 порядков. Проводимость в облаках ещё ниже, чем в воздухе. Электрическое поле в облаках, неоднократно измеренное в эксперименте, недостаточно велико для прямого пробоя воздуха. Поэтому проблема собирания и доставки заряда от облаков к лидеру молнии оставалась загадкой (см. [3, 4]). Обнаружение интенсивного гамма-излучения и его корреляции с радиоизлучением указывает на то, что ПУЭ, возможно, играет основную роль в этом процессе.

Электрические поля, превышающие критическое поле ПУЭ, наблюдаются в грозовых облаках. Число вторичных электронов в ШАЛ, попадающих на площадь порядка  $1 \text{ км}^2$  за  $1 \text{ мс}$ , составляет  $\sim 10^6$ . Эти электроны могут служить затравкой для ПУЭ. Для того чтобы установить, достаточно ли этого для выполнения необходимых условий переноса заряда облака к лидеру, требуются дальнейшие исследования.

Результаты эксперимента, который проводится на ТШВНС ФИАН на установке "Гроза", позволили впер-

вые получить представление о возможном механизме собирания электрического заряда из облаков для генерации молнии. Также впервые в этом эксперименте обнаружен разряд, вызываемый пробоем на убегающих электронах и широким атмосферным ливнем (ПУЭ-ШАЛ). Согласно предсказаниям теории именно разряд ПУЭ-ШАЛ может служить источником наблюдаемых мощных межоблачных радиоразрядов (NBE).

Подведём итог. Развитие активной фазы грозового разряда — предварительный пробой, инициация лидера, движение лидера вплоть до момента возвратного удара — полностью диктуется процессом собирания электрического заряда с облаков. Наше исследование обнаружило, что этот процесс сопровождается мощными коррелированными потоками гамма- и радиоизлучения, создаваемых пробоем на убегающих электронах.

*Это позволяет утверждать, что именно пробой на убегающих электронах, инициируемый космическими лучами, является основным движущим механизмом грозового разряда.*

Авторы благодарны В.П. Антоновой, Л.И. Вильдановой, К.П. Зыбину, Г.Г. Митько, А.С. Наумову, М.О. Птицыну, Ю.В. Шлюгаеву за полезные обсуждения затронутых в работе вопросов.

Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ 09-02-00462-а и грантом EOARD 067004 (ISTC 3641р).

## Список литературы

1. Marshall T C et al. *Geophys. Res. Lett.* **32** L03813 (2005)
2. Stolzenburg M et al. *Geophys. Res. Lett.* **34** L04804 (2007)
3. Базелян Э М, Райзер Ю П *Физика молнии и молниезащиты* (М.: Физматлит, 2001)
4. MacGorman D R, Rust W D *The Electrical Nature of Storms* (New York: Oxford Univ. Press, 1998)
5. Sentman D D et al. *Geophys. Res. Lett.* **22** 1205 (1995)
6. Pasko V P et al. *Nature* **416** 152 (2002)
7. Smith D M et al. *Science* **307** 1085 (2005)
8. Jacobson A R *J. Geophys. Res.* **108** (D24) 4778 (2003)
9. Marshall T C, McCarthy M, Rust W J. *Geophys. Res.* **100** (D4) 7097 (1995)
10. Rhodes C et al. *J. Geophys. Res.* **99** (D6) 13059 (1994)
11. Гуревич А В, Зыбин К П *УФН* **171** 1177 (2001) [Gurevich A V, Zybin K P *Phys. Usp.* **44** 1119 (2001)]
12. Gurevich A V, Zybin K P *Phys. Today* **58** (5) 37 (2005)
13. Gurevich A V, Milikh G M, Roussel-Dupre R *Phys. Lett. A* **165** 463 (1992)
14. Bethe H *Ann. Phys.* **5** 325 (1930)
15. Wilson C T R *Proc. Camb. Philos. Soc.* **22** 34 (1924)
16. Chubenko A P et al. *Phys. Lett. A* **309** 90 (2003)
17. Gurevich A V et al. *Phys. Lett. A* **325** 389 (2004)
18. Gurevich A V, Duncan L M, Karashtin A N, Zybin K P *Phys. Lett. A* **312** 228 (2003)
19. Караштин А Н, Шлюгаев Ю В, Гуревич А В *Изв. вузов. Сер. Радиофиз.* **48** 800 (2005) [Karashtin A N, Shlyugaev Yu V, Gurevich A V *Radiophys. Quantum Electron.* **48** 711 (2005)]
20. Антонова В П и др. *ЖТФ* **77** (11) 109 (2007) [Antonova V P et al. *Tech. Phys.* **52** 1496 (2007)]
21. Борисов Н Д, Гуревич А В, Милих Г М *Искусственная ионизированная область в атмосфере* (М.: ИЗМИРАН, 1986)
22. Papadopoulos K et al. *J. Geophys. Res.* **98** (A10) 17593 (1993)
23. Gurevich A V, Borisov N D, Milikh G M *Physics of Microwave Discharges* (Amsterdam: Gordon and Breach, 1997)
24. Moore C et al. *Geophys. Res. Lett.* **28** 2141 (2001)
25. Dwyer J R et al. *Geophys. Res. Lett.* **32** L01803 (2005)
26. Howard J et al. *Geophys. Res. Lett.* **35** L13817 (2008)
27. Dwyer J R et al. *Geophys. Res. Lett.* **32** L20809 (2005)
28. Rahman M et al. *Geophys. Res. Lett.* **35** L06805 (2008)
29. Nguyen C V, van Deursen A P J, Ebert U J. *Phys. D* **41** 234012 (2008)
30. Gurevich A V, Zybin K P, Roussel-Dupre R A *Phys. Lett. A* **254** 79 (1999)
31. Gurevich A V, Zybin K P, Medvedev Yu V *Phys. Lett. A* **349** 331 (2006)
32. Eack K et al. *J. Geophys. Res.* **101** 29637 (1996)

PACS numbers: **01.65.+g, 52.35.-g, 52.55.-s**  
DOI: 10.3367/UFN.0179.200907i.0790

## Классические результаты Б.Б. Кадомцева и вращение плазмы в современных токамаках

В.И. Ильгисонис

**1. Введение. Этапы работы в Курчатовском институте**  
В докладе рассказывается о трёх теоретических работах Б.Б. Кадомцева в области управляемого термоядерного синтеза, которые, по мнению автора, дают представление об определённых периодах научной деятельности Бориса Борисовича в Курчатовском институте. Кадомцев как теоретик работал весьма продуктивно, круг его интересов, как известно, был весьма широк, поэтому выбор таких работ не может не быть субъективным. Среди работ первого периода выделяется цикл, относящийся к так называемому энергетическому принципу устойчивости [1]. Другие две его работы, представленные в настоящем докладе, — это работы по неустойчивости на запертых частицах [2] и редуцированным уравнениям для описания динамики плазмы [3]. Каждая из этих работ стала в определённом смысле этапной, открыв целое направление для дальнейших исследований. Существенно, что все они служат яркими примерами продуктивности теории, которая впоследствии блестяще подтверждалась экспериментами. В докладе отмечается, какое значение имеют эти работы сейчас, как их результаты преломляются с учётом нового явления, которое не обсуждалось в те годы, — явления вращения плазмы. В современных токамаках плазма может вращаться с высокой скоростью, и это вращение в настоящее время рассматривается как весьма существенный фактор улучшения удержания плазмы. Вращение требует модификации большинства результатов, полученных для неподвижной равновесной плазмы.

К первому этапу работы Б.Б. Кадомцева в Курчатовском институте можно условно отнести годы с 1956-го по 1962-й. В 1956 г. Борис Борисович приходит в Курчатовский институт в теоретический сектор Михаила Александровича Леонтовича, который оценил способного молодого человека и взял его на работу. Большая заслуга Леонтовича состоит в том, что ему всего за несколько лет удалось собрать небольшой, но весьма успешный коллектив ярких теоретиков с большими потенциальными возможностями. В случае с Кадомцевым весьма велика и заслуга Виталия Дмитриевича Шафранова, который привёл своего однокашника Бориса Кадомцева в теоретический сектор к Михаилу Александровичу.

Первые работы Бориса Борисовича были посвящены кинетике; они отчасти продолжали его предыдущую деятельность в Обнинске, но очень скоро он, благодаря своей способности выделять главное, переключается на задачи макроскопического удержания плазмы. Вообще, это умение Кадомцева быстро выделять главное в любой проблеме и сосредоточиваться на её ключевых аспектах весьма характерно для всей его последующей деятельности. В значительной степени именно это умение быстро выдвинуло его в ряд ведущих фигур в новой науке — теории высокотемпературной плазмы. Он начинает работать над теорией устойчивости, и эта тематика так