

04;12

Изучение взаимосвязи процессов в грозовой атмосфере с высокоэнергичными космическими лучами на Тянь-Шаньском экспериментальном комплексе „Гроза“

© В.П. Антонова,¹ Л.И. Вильданова,² А.В. Гуревич,³ К.П. Зыбин,³ А.Н. Караштин,⁴ С.В. Крюков,¹ В.А. Рябов,³ М.О. Птицын,³ А.П. Чубенко,³ Ю.В. Шлюгаев,⁴ А.Л. Щепетов³

¹ ДГП „Институт ионосферы“ МОН РК, Алма-Ата, Казахстан

² Тянь-Шаньская высокогорная научная станция, Алма-Ата, Казахстан, Россия

³ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

e-mail: ryabov@x4u.lebedev.ru

⁴ Научно-исследовательский радиофизический институт, 6036000 Нижний Новгород, Россия

(Поступило в Редакцию 6 февраля 2007 г.)

На Тянь-Шаньской высокогорной научной станции космических лучей создан экспериментальный комплекс для изучения механизма возникновения молниевых разрядов в грозовых облаках и выяснения его взаимосвязи с космическими лучами. Представлены основные научные результаты, полученные на установке „Гроза“, которая включает детекторы различного назначения, работающие синхронно по запускающему сигналу-триггеру.

PACS: 52.80.Mg, 92.60.Pw

Введение

Для экспериментальных исследований рентгеновского и γ -излучений, вызванных пробоем на убегающих электронах, использовался комплекс ATHLET (Almaty Three Level Experimental Technique) на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции космических лучей (ТШВНС). Комплекс „Гроза“, входящий в состав ATHLET, специально предназначен для регистрации широких атмосферных ливней, рентгеновского и γ -излучений в атмосфере и выявления их взаимосвязи. Первые результаты, демонстрирующие существенное усиление излучения в диапазоне 100–500 keV во время грозы, получены еще в 1999 г. [1]. Комплекс ежегодно модернизируется и дополняется новыми детекторами в соответствии с расширяемым кругом научных задач.

Наиболее трудная экспериментальная проблема состоит в том, чтобы различить рентгеновское и γ -излучения, вызванные пробоем на убегающих электронах, от фонового излучения радона. Эти два вида источников можно различать, изучив временное изменение сигналов. Излучение, вызванное пробоем, представляет собой короткие импульсы, в то время как типичное время распада радона составляет примерно 30 min. Для анализа быстрых изменений рентгеновского излучения использовались сцинтилляторы NaI.

Другой особенностью пробоя на убегающих электронах являются скачки электрического поля, коррелированные во времени со вспышками рентгеновского и γ -излучений. Эти корреляции изучались на основе измерений временной эволюции электрического поля.

Проводился непрерывный мониторинг широких атмосферных ливней и изучалась их взаимосвязь со вспышками рентгеновского излучения. Цель исследований заключалась в проверке теоретических предсказаний триггерного механизма инициации молний, вызванного совместным действием пробоя на быстрых электронах и высокоэнергичных ($E_0 \geq 10^{15} - 10^{16}$ eV) частиц космических лучей [1–4]. Согласно теории, пробой на убегающих электронах сопровождается кратковременным всплеском радиоизлучения в диапазоне частот 3–10 MHz. Для регистрации всплесков такого широкополосного радиоизлучения использовались специальные магнитные антенны и комплекс скоростной регистрирующей аппаратуры [5].

Тянь-Шаньский экспериментальный комплекс

Экспериментальный комплекс „Гроза“ расположен на высоте 3340 m над уровнем моря и состоит из следующих установок: ливневой триггерной системы, системы сцинтилляционных NaI-детекторов, многорядных спектрометров поглощения, мюонного годоскопа, системы мониторинга высокоэнергичных и тепловых нейтронов, двух независимых радиосистем, работающих в диапазоне частот 0.1–30 и ~ 250 MHz, детектора скачка статического электрического поля и его высокочастотной составляющей. Весь экспериментальный комплекс работает непрерывно с момента запуска (апрель) до окончания сезона гроз (сентябрь) в автоматическом режиме.

Ливневая триггерная система состоит из распределенных по территории станции нескольких десятков детекторов, созданных на основе газоразрядных счетчиков Гейгера СИ5Г. Эта система фиксирует момент прохождения широкого атмосферного ливня (ШАЛ) космических лучей, позволяет оценить его размер, а также энергию первичной частицы. Один детектор ШАЛ состоит из 20 счетчиков СИ5Г, а его чувствительная площадь составляет около 0.6 m^2 . Триггерный сигнал формируется как результат совпадений сигналов в интервале $5 \mu\text{s}$ в трех детекторах, соединенных в треугольник со сторонами $\sim 70 \text{ m}$. Система из трех детекторов регистрирует ШАЛ с энергиями 1 PeV с площади 10^4 m^2 . Чувствительная область всего массива детекторов составляет около 0.1 km^2 .

Система из 18 сцинтилляционных NaI-детекторов используется для регистрации интенсивности мягких γ -квантов и жесткого рентгеновского излучения от грозных облаков. Регистрация ведется в шести энергетических диапазонах от 20 keV до 5 MeV с временным разрешением $10 \mu\text{s} - 1 \text{ s}$. Все NaI-детекторы калибровались с помощью эталонных источников γ -излучения Am^{241} и Cs^{137} .

Сигналы от ливневой системы и NaI-детекторов передаются в центр регистрации по экранированным кабельным линиям протяженностью до 2 km . Передача сигналов осуществляется с использованием специально разработанных для данного эксперимента передающих и приемных усилителей на базе вакуумных электронных ламп. Это обеспечивает возможность функционирования установки непосредственно в условиях грозы, при сильных электромагнитных помехах от близких ударов молнии.

Сигнал о прохождении мюонной компоненты космических лучей регистрируется мюонным годоскопом, находящимся в подземном помещении на глубине 2000 g/cm^2 . Годоскоп имеет чувствительную площадь $\sim 100 \text{ m}^2$ и работает с энергетическим порогом 5 GeV .

Спектрометры поглощения состоят из слоев газоразрядных счетчиков, перемежаемых тонкими слоями свинца и железа. Многорядные спектрометры служат для регистрации ускоренных в электрическом поле грозных облаков электронов и излучаемых ими γ -квантов, а также для оценки энергии этих частиц по кривой поглощения.

Система мониторинга высокоэнергичных и тепловых нейтронов включает в себя нейтронный супермонитор НМ-64, нейтронный монитор в подземном помещении на базе счетчиков СНМ-15 и отдельные распределенные по территории станции детекторы на основе пропорциональных нейтронных счетчиков СНМ-17, СНМ-18, „Гелий-2“.

Для регистрации интенсивности радиоизлучения, генерируемого в грозных облаках при молниевых разрядах, а также для определения местоположения разряда (по относительным задержкам радиосигналов) созданы установки для измерения радиоизлучения. Две пространственно разнесенные установки „Radio-HF“ работают

в диапазоне частот $0.1 - 30 \text{ MHz}$, они предназначены для регистрации коротких ($\sim 30 \text{ ns}$) электромагнитных импульсов и определения направления на их источник. Установки „Radio-HF“ содержат по три антенных блока, каждый из которых состоит из трех антенн. Две скрещенные под углом 90° рамочные антенны предназначены для измерения горизонтальной магнитной компоненты, а штыревая — для измерения вертикальной электрической компоненты электромагнитного поля.

Установка „Radio-E“ регистрирует изменение электрического поля в грозных условиях. Постоянное („медленное“) электрическое поле измеряется электростатическим флюксометром (типа „field mill“). Вариации электрического поля („быстрое“ поле) измеряются с использованием датчика конденсаторного типа. В состав установки также входит УКВ-приемник, работающий на частоте около 250 MHz . В момент молниевых разрядов аппаратурой „Radio-E“ регистрируется скачок статического электрического поля, его высокочастотная составляющая (возвратный молниевый удар), а также вырабатывается управляющий сигнал (молниевый триггер) для запуска всего экспериментального комплекса.

Основные результаты, полученные на установке „Гроза“

На установке „Гроза“ проводились комплексные исследования электрического поля, радиоизлучения в КВ- и УКВ-диапазонах, потоков энергичных частиц и γ -излучения в грозных условиях.

Первые измерения, выполненные на спектрометрах поглощения, выявили наличие интенсивного потока γ - и жесткого рентгеновского излучений от грозных облаков. Установлено, что во время прохождения через установку электрически заряженных облаков существует два типа вариаций интенсивности: резкий всплеск радиации с характерной длительностью порядка минуты, обусловленный ускоренными электрическим полем грозного облака электронами, и долгопериодическая вариация с временным масштабом порядка нескольких часов с преобладающей долей жесткого рентгеновского излучения и мягких γ -квантов [1]. Медленное возрастание интенсивности сигналов в детекторах в период грозы обычно интерпретировалось как регистрация γ -излучения от распадов дочерних ядер радона, вымываемого дождем из почвы. Пороговая энергия γ -квантов от радиоактивных процессов лежит в области выше 600 keV , а характерное время для вымывания радона из грунта составляет часы. Однако радоновый механизм не может объяснить результаты наблюдения относительно кратковременных всплесков излучения. Более вероятно, что эти всплески связаны с механизмом „убегающих“ электронов в грозных облаках, теория которого предсказывает существование всплесков в энергетической области $30 - 100 \text{ keV}$ с интенсивностью, близкой к полученным экспериментальным оценкам [1].

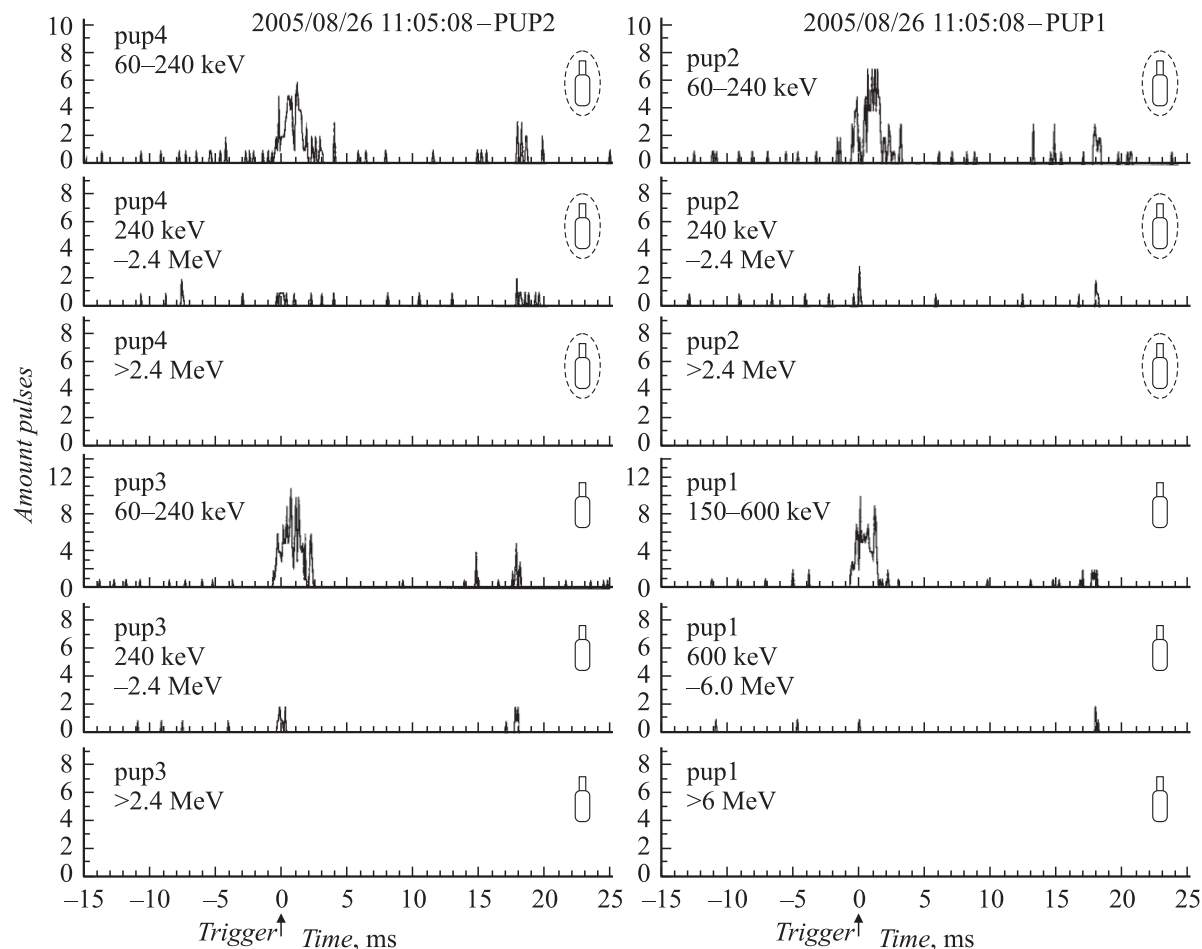


Рис. 1. Измерения системой NaI-детекторов интенсивности γ -излучения с высоким временным разрешением (за $100 \mu\text{s}$).

Вариация интенсивности, связанная с грозовым облаком, отсутствует в данных мюонного детектора, имеющего энергетический порог в 230 MeV и в сигналах нейтронного супермонитора.

Пики интенсивности излучения, которые наблюдаются NaI-детекторами, имеют тонкую временную структуру в микросекундном диапазоне (рис. 1). Это указывает на существование внутри облака сложной динамики возникновения и изменения электрического поля, которое влияет на интенсивность вторичного космического излучения.

Задачи поиска корреляции коротких импульсов радиоизлучения с приходом ШАЛ требовали внешнего запуска установок „Radio-HF“ триггерными импульсами, вырабатываемыми установкой обнаружения ШАЛ в первом случае и установкой „Radio-E“ — во втором, где те же триггерные импульсы использовались для запуска установки регистрации γ -излучения. Триггерные импульсы, вырабатываемые установкой ШАЛ, использовались для регистрации радиоизлучения на установках „Radio-HF“ в течение $100 \mu\text{s}$ с предысторией $83.2 \mu\text{s}$. Средний интервал следования триггерных импульсов составлял 2.5 s . В отсутствие грозовых условий ШАЛ не сопровождалась радиоизлучением, интенсивность ко-

торого превышала бы чувствительность используемых радиоприемных устройств. В то же время во время грозы примерно в 2% случаев регистрации ШАЛ было обнаружено сопутствующее радиоизлучение в виде коротких биполярных импульсов длительностью несколько сот наносекунд и длительностью первого пика порядка 100 ns (рис. 2). Полярность первого пика по электрическому полю может быть как положительной, так и отрицательной. Импульсы радиоизлучения наблюдались перед приходом триггерного импульса, опережая его на несколько десятков микросекунд. Детальный вид радиоимпульсов, сопровождающих ШАЛ, приведен на нижней панели рис. 2, где представлены данные, полученные во время одной из гроз, наблюдавшихся на ТШВНС. Показаны импульсы обеих полярностей по данным электрических антенн одной из установок „Radio-HF“. Второй и третий каналы (сверху вниз) дублируют запись с одного и того же антенного блока. На верхних панелях показаны полные $100 \mu\text{s}$ записи, из которых видно, что радиоимпульс наблюдается на $10\text{--}12 \mu\text{s}$ раньше триггерного импульса (помеха на $83\text{-й } \mu\text{s}$). Такое положение радиоимпульса обусловлено задержкой триггерного импульса относительно момента прихода ШАЛ, вызванной необходимостью его формиро-

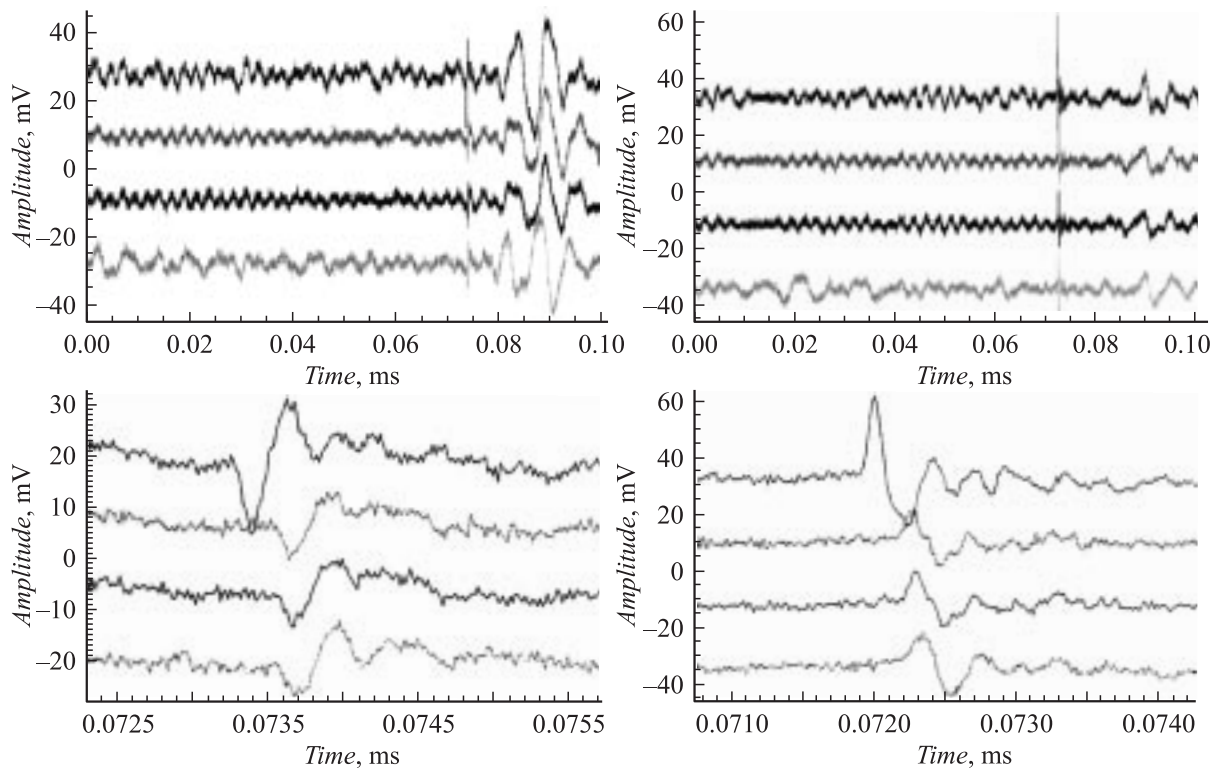


Рис. 2. Примеры регистрации коротких биполярных импульсов, соответствующих ШАЛ в грозовых условиях. Данные получены на установке „Гроза“ 25 июля 2004 г. Верхние границы соответствуют полной $100\ \mu\text{s}$ записи, нижние — развертке импульса. На верхних рисунках импульс соответствует узкому всплеску, отстающему от помехи, вызванной триггером, на $10\text{--}12\ \mu\text{s}$.

вания и передачи на установку „Radio-HF“. На нижних панелях показана развертка импульсов радиоизлучения, из которой можно определить длительность импульсов.

Характеристики обнаруженного радиоизлучения согласуются с предсказываемыми теорией совместного действия эффекта пробоя на убегающих электронах и широкого атмосферного ливня для энергии первичной частицы $2 \cdot 10^{14}\text{--}10^{15}\ \text{eV}$ [3]. Вероятность генерации радиоизлучения широким атмосферным ливнем обусловлена вероятностью достижения атмосферным электрическим полем порогового значения для развития пробоя на убегающих электронах на пути распространения ШАЛ [6].

Наряду с одиночными импульсами, сопровождающими ШАЛ, наблюдались также серии импульсов, как правило, существенно большей амплитуды, предположительно связанные с молниевыми разрядами. Установлено, что пространственное положение (направление на источник излучения) таких серий импульсов не совпадает с положением импульсов, соответствующих ШАЛ. Предположительно наблюдаемые серии радиоимпульсов связаны с развитием ступенчатого лидера и возвратного удара молнии.

При исследовании γ -излучения молниевых разрядов в качестве запускающего импульса использовался триггерный импульс, вырабатываемый установкой „Radio-E“, который интерпретировался как прохождение возвратного удара близкой молнии. Этот импульс подавал-

ся как на обе установки „Radio-HF“, так и на установку регистрации γ -излучения на базе системы NaI-детекторов. Установки „Radio-HF“ работали в режиме

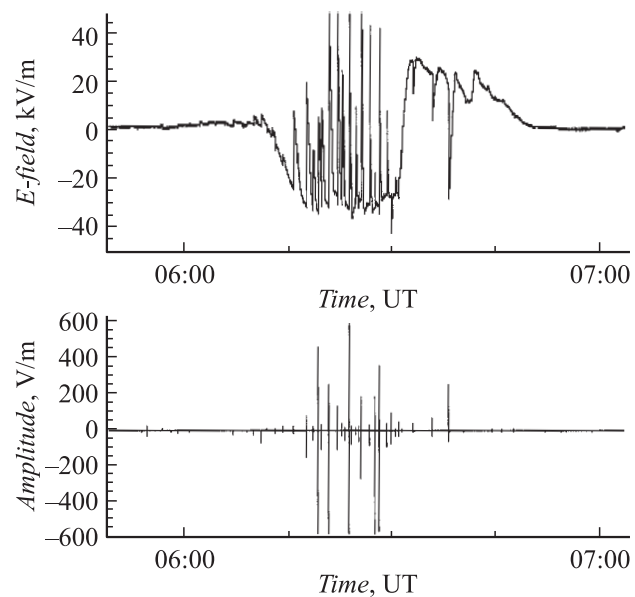


Рис. 3. Пример записи электрического поля на установке „Гроза“ для грозы 26 мая 2005 г. Верхняя панель — „медленное“ поле (флюксометр), нижняя панель — „быстрое“ поле (датчик вариаций).

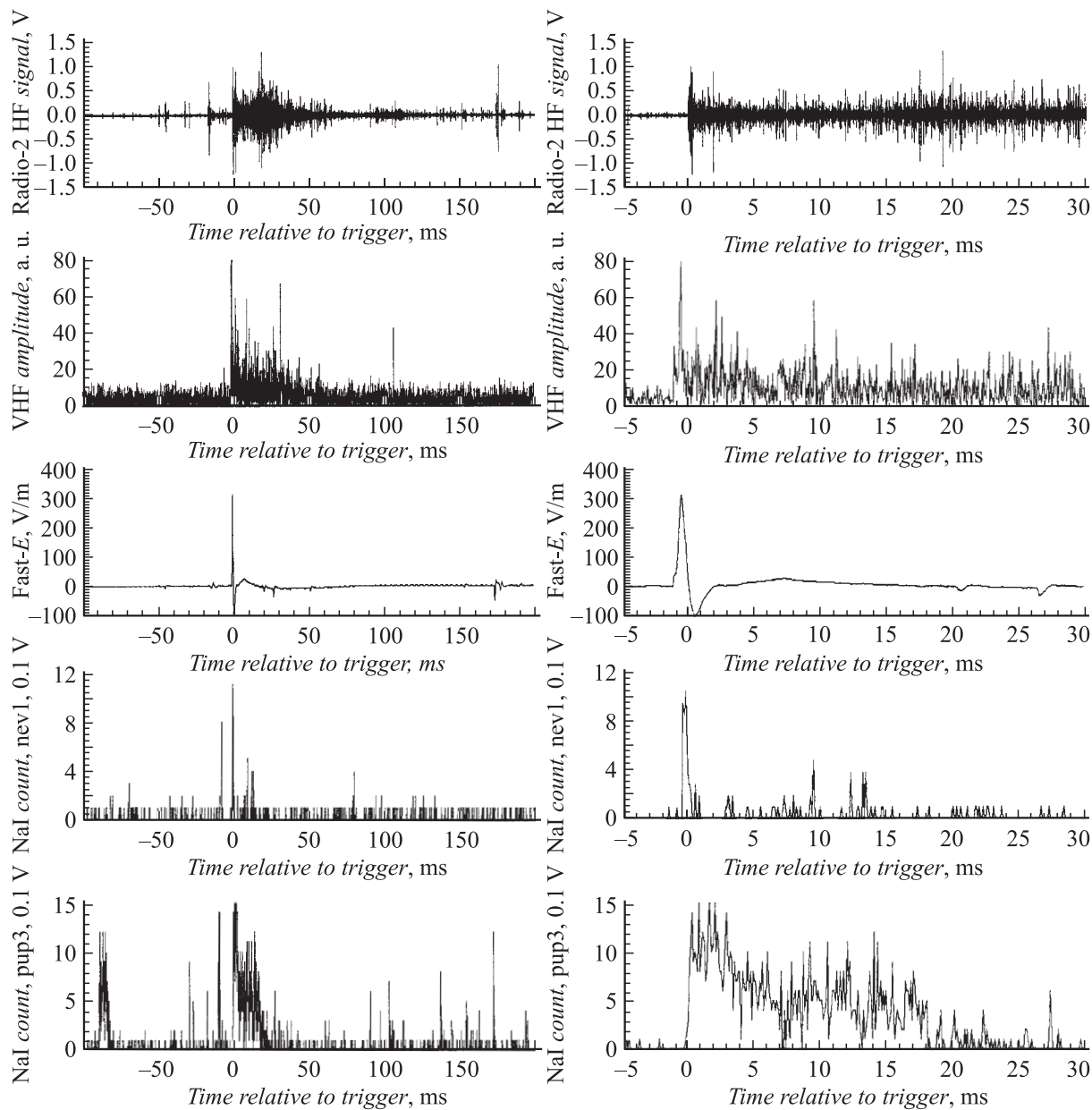


Рис. 4. Пример одновременной регистрации в грозовых условиях КВ и УКВ-радиоизлучения (сверху вниз), вариаций электрического поля и γ -излучения от двух NaI-датчиков.

внешнего запуска с длительностью записи 0.5 s при длительности предыстории 0.1 s, а установка регистрации γ -излучения — с длительностью записи 0.4 s при длительности предыстории 0.2 s.

В 2005 г. было зарегистрировано более 3000 событий (хотя бы одной из установок). Большинство из них было связано с грозовой активностью. Система NaI-детекторов зафиксировала более 1000 событий, для большинства из которых были также получены данные по вариациям электрического поля и УКВ-излучению. На установках „Radio-HF“ зарегистрировано 388 из этих событий, из них 194 — на обеих.

Пример записи электрического поля, зарегистрированного флюксометром и датчиком вариаций электри-

ческого поля показан на рис. 3. Запись в „быстрой“ моде началась в 05:49 UT с малых вариаций электрического поля, вызванных удаленными разрядами, возможно, междуоблачными. Примерно в 6 h 10 min гроза начала накрывать станцию, и статическое электрическое поле (верхняя панель) в течение 5 min выросло примерно до -40 kV/m. После этого в течение примерно 15 min произошла серия отрицательных молниевых разрядов. Около 06 h 30 min полярность электрического поля быстро поменялась и поле быстро достигло значения $+30$ kV/m, после чего произошло несколько положительных разрядов. Оставшаяся часть записи соответствует движению (бывшего) грозового облака от станции. Для всех молниевых разрядов датчик вариаций

электрического поля зафиксировал серии импульсов (нижняя панель).

Анализ характера грозовой активности в мае–июне 2006 г. экспериментально подтверждает заключения авторов [7], что положительные разряды облако–земля (рис. 3) представляют наибольшую опасность для коммуникационных систем. За период менее месяца на ТШВНС дважды были серьезные повреждения линий электропередач, систем составной связи и линий Интернет. При анализе электрических полей выяснилось, что эти грозы сопровождались положительными молниевыми разрядами. Помимо того что положительные молнии переносят больший заряд, чем отрицательные, они имеют также большую длительность фронта нарастания тока $> 200 \mu\text{s}$. Это гораздо опаснее „обычного“ грозового импульса с длительностью фронта в несколько микросекунд.

Положительные разряды составляют в среднем 10% от общего числа, но именно с ними связывают высотные разряды, направленные в ионосферу. В квазистационарном состоянии на больших высотах (30–50 km) электрическое поле практически отсутствует. После сильного положительного электрического разряда на Землю нарушается баланс. Положительные молнии переносят заряд, в среднем значительно больший, чем отрицательные, до 100 C и более. Электрическое поле при этом направлено к Земле, т.е. оно ускоряет электроны в сторону ионосферы. В результате в большой области высот над грозовыми образованиями, вплоть до нижней ионосферы, возникает электрическое поле, по величине превосходящее минимальное поле пробоя на убегающих электронах. Для возникновения поляризационного поля, компенсирующего его, необходимо время порядка нескольких секунд. В этот период и появляется возможность для возникновения гигантского высотного разряда [8].

Пример одновременной регистрации данных разными установками приведен на рис. 4. Слева приведены данные на временном интервале, начинающемся за 100 ms до прихода триггерного импульса и продолжающемся 200 ms после его прихода. Справа — более детальный вид сигналов в окрестности триггерного импульса (от -5 до $+30$ ms относительно него). Хорошо видна временная корреляция сигналов, зарегистрированных различными установками.

Заключение

Начиная с 1999 г. на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции космических лучей последовательно создавалась экспериментальная установка „Гроза“ для исследования импульсного радиоизлучения гроз и изучения взаимосвязи молниевых явлений с широкими атмосферными ливнями.

Обнаружены корреляции коротких импульсов радиоизлучения с приходом ШАЛ. Во время грозы наблюдались биполярные импульсы КВ-радиоизлучения, коррелированные в пределах $50 \mu\text{s}$ с триггерными сигналами,

формируемыми установкой ШАЛ. В отсутствие грозы такие импульсы никогда не наблюдались.

В результате многочисленных (более 10^3) измерений установлено, что радиоизлучение каждой молнии начинается с очень короткого биполярного импульса с длительностью первого пика порядка 100 ns. Перед ним в течение, по крайней мере, 500 ms не регистрируется радиоизлучения, отличного от фонового. Форма, ширина и амплитуда начального импульса согласуются со значениями, предсказываемыми теорией совместного действия пробоя на убегающих электронах и широкого атмосферного ливня, инициированного первичной частицей с энергией порядка 10^{16} eV.

Обнаружен мощный поток γ -излучения в период $\approx 100 \mu\text{s}$ перед возвратными ударами молний. Наблюдаемое излучение занимает обширную пространственную область.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 06-05-65024 и грантов МНТЦ № 2236 и 3641.

Список литературы

- [1] Chubenko A.P. et al. // Pphys. Lett. A. 2003. Vol. 309. P. 90–102.
- [2] Gurevich A.V., Milikh G.M., Roussel-Dupre R. // Phys. Lett. A. 1992. Vol. 12. P. 393.
- [3] Gurevich A.V., Zybin K.P. // Phys. Lett. A. 2004. Vol. 329. P. 341.
- [4] Gurevich A.V., Zybin K.P. // Physics Today. 2005. P. 37.
- [5] Gurevich A.V., Karashtin A.N., Chubenko A.P. et al. // Phys. Lett. A. 2004. Vol. 325. P. 389–402.
- [6] Gurevich A.V., Duncan L.M., Medvedev Yu.V. and Zybin K.P. // Phys. Lett. A. 2002. Vol. 301. P. 307–314.
- [7] Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащита. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
- [8] Uman M.A., Rakov V.A. Lightning: Physics and Effects. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 850 p.