

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ КОСМОСА

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИЕНТНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ
ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ МГУ И НАЗЕМНЫХ СЕТЕЙ
РЕГИСТРАЦИИ МОЛНИЙ»

Выполнила студентка
214М группы
Казначеева Маргарита Артемовна

Научный руководитель:
зав. лаб. Климов Павел Александрович

Допущена к защите
Зав. кафедрой _____

МОСКВА

2017

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ	5
1.1. Молниевые разряды	5
1.2. Транзиентные атмосферные явления (ТАЯ)	8
1.2.1. Спрайты (sprites)	9
1.2.2. Голубые струи (blue jets)	10
1.2.3. Эльфы (ELVES)	12
1.2.4. Гигантские струи (gigantic jets)	13
1.3. Примеры регистрации ТАЯ вдали от гроз	14
2. АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УФ ТРАНЗИЕНТНЫХ СОБЫТИЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА «ВЕРНОВ»	17
2.1. Детектор ДУФ на борту спутника «Вернов»	17
2.2. Оценка энергии (числа фотонов) УФ вспышек в атмосфере Земли	20
2.3. Моделирование работы триггерной системы детектора ДУФ .	25
3. СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ДЕТЕКТОРА ДУФ И НАЗЕМНЫХ СЕТЕЙ РЕГИСТРАЦИИ МОЛНИЙ	30
3.1. Мировая сеть регистрации молний WWLLN	30
3.2. Постановка задачи и методика обработки данных	31
3.3. Результаты и обсуждение	34
3.4. Низковысотные УФ вспышки грозовой природы	37
4. СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ДЕТЕКТОРА ТУС И НАЗЕМНЫХ СЕТЕЙ РЕГИСТРАЦИИ МОЛНИЙ	40

4.1. Детектор ТУС на борту спутника «Ломоносов»	40
4.2. Совместный анализ данных детектора ТУС и сети WWLLN .	41
4.3. События типа эльф, зарегистрированные детектором ТУС . .	45
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	48
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	49

ВВЕДЕНИЕ

За последние два десятилетия бурно развивается физика высокоатмосферных транзитных световых явлений. Это стало возможным благодаря двум факторам: 1) появлению высокоскоростной оптической техники и 2) возможности регистрации этих событий с орбиты Земли. Первое позволило проводить исследования «тонкой временной структуры» быстропротекающих процессов с микросекундным разрешением. Второе – вести регистрацию по всему Земному шару, что обеспечивает набор большой статистики и наблюдения в разнообразных регионах и условиях. Кроме того, верхняя атмосфера является существенно более прозрачной для всех длин волн оптического излучения и не содержит облаков, что делает возможным спектральные исследования. Важность изучения этих явлений определяется их ролью в глобальной электрической цепи. Физические механизмы, приводящие к образованию разнообразных явлений в верхней атмосфере, ещё не до конца изучены. В частности не ясна роль релятивистских электронов в возникновении разряда и возможная связь оптических явлений с земными гамма-вспышками. К моменту написания данной работы функционирует ряд спутниковых экспериментов по регистрации транзитных явлений (ISUAL на спутнике FORMOSAT-2, JEM-GLIMS на МКС, ТУС на борту ИСЗ «Ломоносов», завершены наблюдения на космических аппаратах МГУ «Университетский-Татьяна», «Университетский-Татьяна-2», «Вернов», успешно ведутся наземные измерения на разных геофизических станциях.

За время изучения высокоатмосферных транзитных оптических явлений сложилась устойчивая классификация типов этих явлений: спрайты, голубые струи, эльфы, и др. Все эти явления происходят в верхних слоях атмосферы, над облачным покровом и так или иначе обязаны своим происхождением грозовой активности. Однако существует

целый ряд измерений «необычных» транзиентных атмосферных явлений (ТАЯ), произошедших вдали от грозовых областей.

Целью данной работы является анализ данных детекторов УФ излучения на спутниках МГУ «Вернов» и «Ломоносов» и наземных сетей регистрации молниевых разрядов WWLLN и Vaisala GLD360. Измерения спутников «Татьяна-1» и «Татьяна-2» показали, что достаточно трудно только по временному профилю УФ осциллограмм и дополнительным данным в ИК диапазоне различить молниевые разряды от высоко атмосферных, понять природу высоко широтных вспышек. Поэтому, результаты наземных измерений молний являются важным дополнением и позволяют выделить в спутниковых данных вспышки грозового происхождения и осуществить поиск «необычных» ТАЯ вне грозовых регионов. В работе получено энергетическое распределение УФ вспышек по данным спутника «Вернов», проведен отбор внегрозовых ТАЯ и получены их характерные особенности, а также сделан анализ возможностей орбитальных детекторов для изучения грозовых процессов в целом.

Работа состоит из четырех частей. В первой приведен обзор литературы в области физики атмосферного электричества, в частности рассмотрены основные характеристики молниевых разрядов, феноменология ТАЯ, примеры регистрации ТАЯ вне грозовых областей. Вторая часть посвящена анализу энергетического распределения УФ вспышек в атмосфере Земли, полученному по данным детектора ДУФ на борту спутника «Вернов», а также моделированию триггерной системы детектора с целью повышения точности оценки числа фотонов в атмосферных вспышках. Третья часть работы содержит совместный анализ данных спутника «Вернов» и наземных сетей регистрации молний с целью поиска и описания ТАЯ вдали от грозовых областей, а также событий, связанных с грозовой активностью, но не имеющих прямой связи с молниями облако-земля. А в четвертой части содержится описание данных детектора ТУС на борту спутника «Ломоносов» и их анализа с данными наземных сетей регистрации молний для двух классов событий, зарегистрированных в режимах с разным временным разрешением, а также событий типа эльф.

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Атмосфера Земли – сложная система, в которой происходит постоянное перераспределение электрических зарядов, текут электрические токи. В течение долгого времени эти процессы квазистационарны (так называемая, «хорошая погода»), но во время гроз за короткое время высвобождается большое количество запасенной электрической энергии, которая приводит к разнообразным явлениям как в атмосфере, так и за ее пределами. Разделение электрического заряда обусловлено сложными процессами, происходящими в грозовых облаках, а сопровождающие разряд процессы замыкают глобальную электрическую цепь.

Известные электрические разряды в атмосфере можно разделить на два больших класса (тесно связанных друг с другом): низко высотные (молнии между облаком и Землей, между облаками и внутриоблачные) и высоко атмосферные (так называемые транзиентные световые явления). Первые известны испокон веков и всегда привлекали внимание исследователей, вторые же были экспериментально зарегистрированы лишь в конце 1980-х годов [1], хотя ионизация и высоко атмосферные разряды в грозовых областях были предсказаны еще Вильсоном в работе 1925 года [2].

1.1. Молниевые разряды

Молниевые разряды можно разделить на два типа: межоблачные и удары в землю. Последние встречаются в 2–3 раза реже. Длина канала межоблачных разрядов достигает нескольких, а иногда – десятков километров. Длина канала у молниевых разрядов в землю примерно равна высоте грозовых облаков, т.е. близка к 3 км.

Электрическая природа молнии и ее родство с искровым разрядом были доказаны еще в работах Бенджамина Франклина в середине XVIII века. В 30-е годы XX-го века с помощью разверток во времени, полученных с помощью фотокамер [3], были выявлены две основные фазы процесса: лидерная и главная (Рис. 1.1).

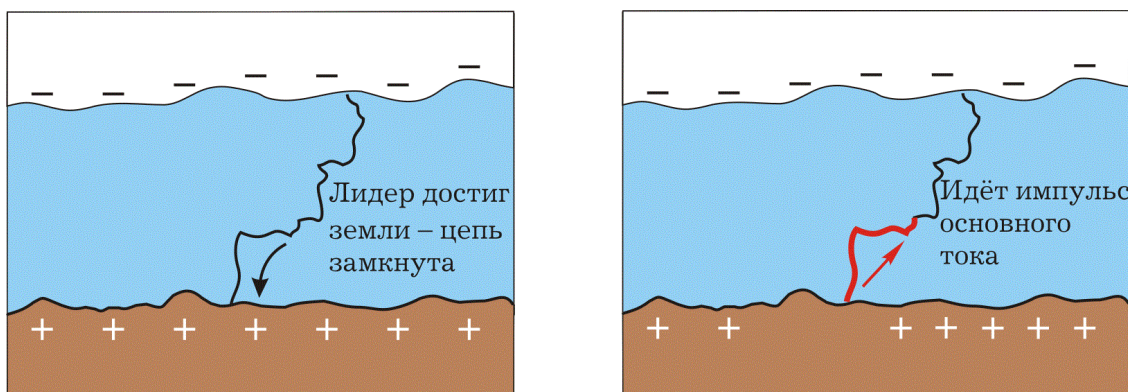


Рис. 1.1: Две фазы образования молнии: лидерная (слева) и главная (справа) [4].

Лидерная стадия характеризуется появлением в промежутке облако-земля или между облаками высокопроводящего плазменного стримерного канала – лидера. Он рождается в области сильного электрического поля (порядка 1 МВ/м) и далее движется, ионизируя нейтральные молекулы воздуха за счет объемного заряда, сконцентрированного в области головки канала. Время роста лидера достигает 0.01 с — долгое время в масштабе явлений импульсного электричества. Высокая проводимость плазмы в канале сохраняется благодаря нагреванию газа до температуры 5000–6000 К (температура электрической дуги).

От поверхности земли по направлению к лидеру возникает собственный канал — встречный стример. С их встречи начинается главная стадия молнии – обратный удар. Постепенно со всех участков канала, обладающих высоким потенциалом, заряд стекает на землю. От земли к облаку распространяется волна нейтрализации заряда лидера, скорость которой достигает 10^8 м/с. Средняя амплитуда возникающего тока равна 30 кА, но для наиболее мощных молний может достигать 300–400 кА. Этот процесс сопровождается интенсивным выделением энергии. Благодаря

этому, газ в канале сильно нагревается и расширяется. Возникает ударная волна. Раскат грома – одно из ее проявлений.

Яркость главной стадии заметно превышает яркость лидерной. Пример фотографии обеих стадий молниевое разряда приведен на Рис. 1.2. Температура канала главной стадии молнии может достигать 20000–30000 К [5].



Рис. 1.2: Фотографии лидерной и главной стадий образования молнии [6].

Интересно, что одна молния может состоять из нескольких обратных ударов. Так происходит, если в ходе главной стадии первого обратного удара облако разрядилось не полностью. Тогда вслед за ним могут пойти еще несколько. Их количество может доходить до нескольких десятков [7]. По оценкам авторов работы [8], полученных с использованием данных наземных сетей регистрации молний, 42% молний содержат в себе больше одного обратного удара.

Важный эксперимент по измерению спектральных характеристик молниевых разрядов был проведен в 1981 году [9]. С помощью двух спектрометров (один работал в видимом, другой – в ИК диапазоне) были получены спектры молний в диапазоне длин волн от 375 до 880 нм.

Данные, полученные для видимого света, представлены на Рис. 1.3а. Наиболее интенсивные линии являются линиями однократно ионизированного атомарного азота NII (например, самый высокий пик – 500.1 нм). Также один из самых значительных пиков в спектре, приходящийся на 653.3 нм, – линия $H\alpha$.

Спектр молнии в ИК диапазоне показан на Рис. 1.3б. Для него характерны резкие высокие пики – линии излучения кислорода (777.4 нм) и азота (746.8 нм, 868.3 нм).

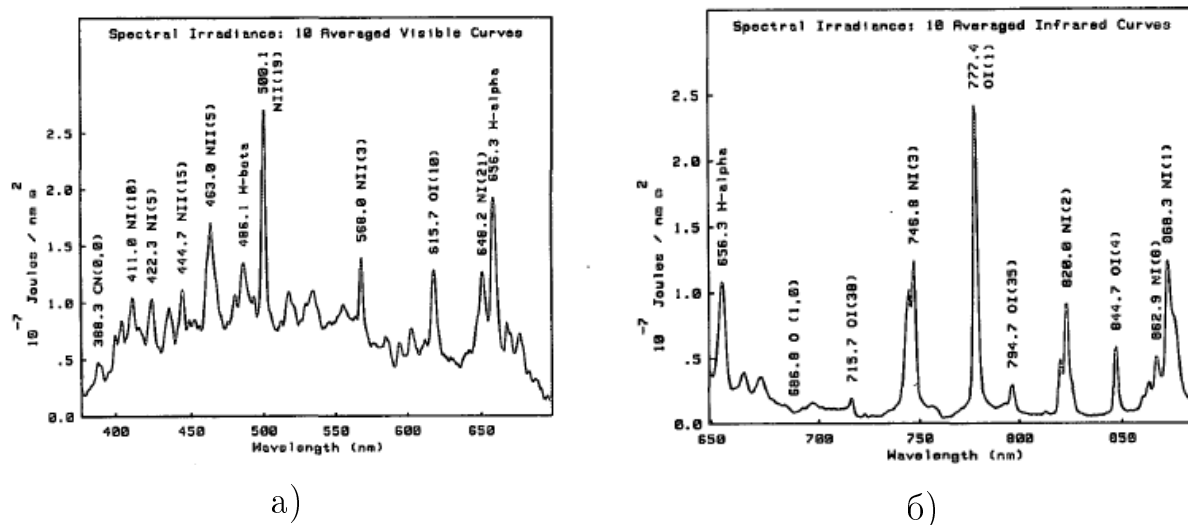


Рис. 1.3: Спектр молнии а) в видимом диапазоне, б) в ИК диапазоне [9].

Молния является высокоэнергетическим тропосферным явлением, в ходе которого молекулы N_2 , O_2 , H_2O распадаются на атомные составляющие. Важной особенностью спектров молний, указывающей на это, является присутствие именно атомарных линий излучения (которые отсутствуют в спектрах транзиентных атмосферных явлений). Это связано с большей плотностью энергии и температурой в стволе молнии по сравнению с высоко атмосферными разрядами.

1.2. Транзиентные атмосферные явления (ТАЯ)

Наблюдаемые транзиентные световые явления представляют собой вспышки электромагнитного излучения в верхних слоях атмосферы Земли на высотах от 10 до 90 км. Время их протекания составляет 1–500 мс, а протяженность в высоту 10–100 км. Их характерной особенностью является широкий спектральный диапазон (от инфракрасного и видимого до ультрафиолетового, рентгеновского и даже гамма-излучения). За время наблюдений были зарегистрированы события различных типов (по длительности, пространственной структуре излучения), получившие наименования: спрайты, эльфы, голубые и гигантские струи (Рис. 1.4).

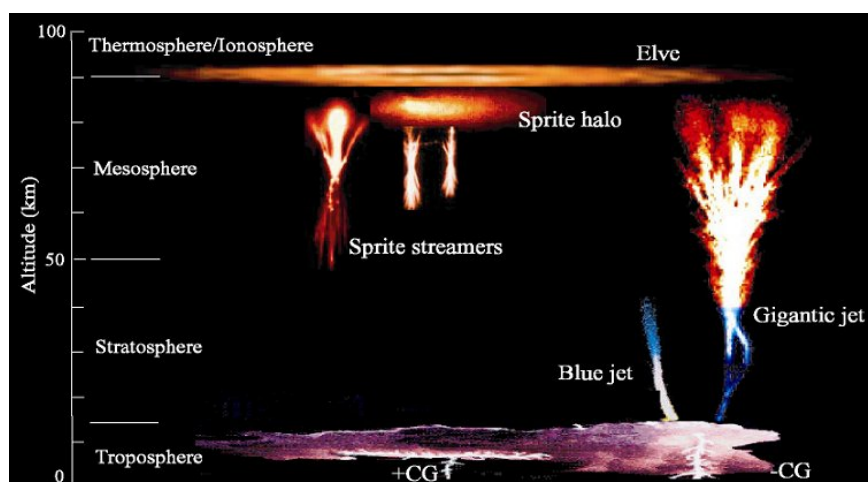


Рис. 1.4: Виды транзиентных атмосферных явлений [10].

Опишем различные типы транзиентных явлений по существующим экспериментальным данным.

1.2.1. Спрайты (sprites)

Впервые это явление было зафиксировано в 1989 году физиками из Университета Миннесоты при тестировании чувствительной камеры для экспериментов на большой высоте [1]. В поле зрения объектива попала гроза вдали. После просмотра записи учеными были обнаружены воронкообразные вспышки света длительностью несколько миллисекунд, примерно в 30 км над облаками.

Спрайты образуются почти в любую сильную грозу. Они представляют собой некое подобие молний, бьющих снизу вверх в промежутке от 40 до 90 км. Однако зарождаются они на высоте 70–80 км, как правило, после положительной молнии между облаком и землей (которая переносит с облака на землю положительный заряд) [11]. Положительная молния, которая происходит между верхней частью грозового облака и поверхностью Земли, имеет большой зарядовый момент и ток, что делает образование спрайта после нее более эффективным [12]. Задержка между родительской молнией и спрайтом составляет в среднем около 30 мс, хотя может достигать значений до 200 мс [13]. Высота образования спрайта обусловлена тем, что в этой области после молнии электрическое поле изменяется и превышает критическое поле разряда. На

больших высотах – так называемая, диффузная зона (объемное диффузное свечение газа), ниже – стримерная (разряд развивается по стримерному механизму). Общая длина спрайтов достигает 50 км, поперечные размеры 5–30 км, а длительность менее 17 мс [14]. Первые цветные фотографии данного явления были получены в ходе эксперимента Sprite94 [15]. Наблюдение велось с помощью телевизионных камер, находившихся на двух самолетах, движущихся вдоль грозового фронта на высоте 12.5 км со скоростью 790 км/ч. Полученные данные показали, что большая часть спрайта красная, но снизу обычно имеется синяя область свечения (Рис. 1.5). Такую разницу цветов можно объяснить различным давлением, плотностью и составом атмосферы на разных высотах. На больших высотах преобладает красное свечение первой положительной системы молекулярного азота (1PN_2), а чем ближе к земле, тем более значительный вклад вносит свечение второй положительной системы молекулярного азота (2PN_2), которое происходит преимущественно в синем и УФ диапазонах. Это связано с различием радиационного времени жизни разных возбужденных состояний азота и изменением плотности (частоты столкновений молекул) с высотой. Присутствие разных линий свечения в спектре обусловлено также распределением электронов, участвующих в процессе разряда, по энергии.

Оказалось, что спрайты чаще возникают сериями из 2–3 штук, а наиболее яркие события состоят из множества отдельных спрайтов (верхнее событие на Рис. 1.5). Расстояние между спрайтами в одной группе может составлять 50 км.

1.2.2. Голубые струи (blue jets)

Первое черно-белое изображение подобной вспышки было получено в 1990 году [16]. Регистрирующая камера находилась на борту шаттла, производившего измерения над грозами в разных областях Земного шара. В 1994 году американские ученые в ходе эксперимента Sprite94 подтвердили существование таких явлений и назвали их голубыми струями. Первое видео голубой струи было записано во время сильной

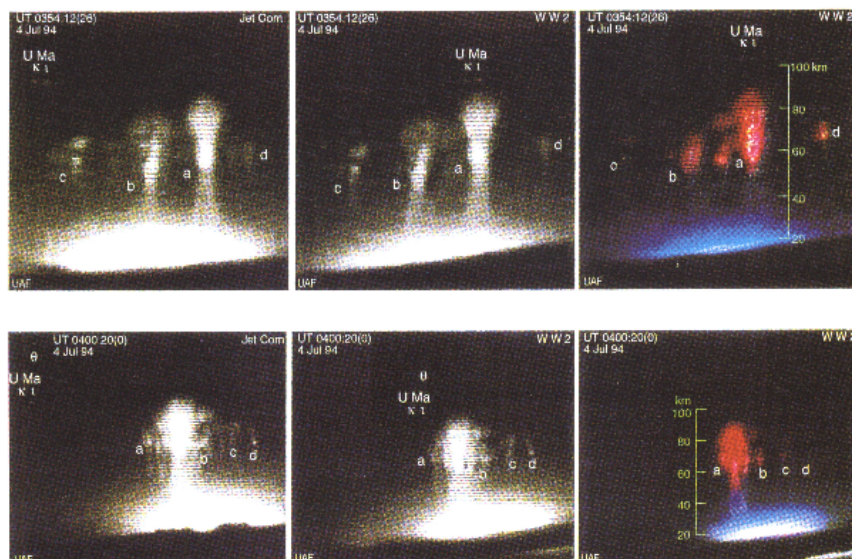


Рис. 1.5: Фотографии спрайтов, полученные в эксперименте Sprite94 [15].

ночной грозы в Арканзасе (США) с помощью монохроматических и цветных видеокамер с двух самолетов, перемещавшихся вокруг грозы [17].

Голубые струи – более редкое явление, чем спрайты. Они похожи на конусообразные вспышки с углом раствора примерно 15° , распространяющиеся от облака вверх. Снизу они тонкие и имеют более светлый оттенок, а с высотой они становятся синими и широкими (Рис. 1.6). Голубые струи образуются на высоте 15–20 км, и их вертикальная протяженность примерно 40 км. Длительность составляет около 200 мс, а скорость распространения от облаков вверх достигает 100 км/ч [17].

Интересен тот факт, что в литературе есть указания на то, что голубые струи не являются прямым следствием молний облако-земля, хотя и образуются в грозовых районах [18].

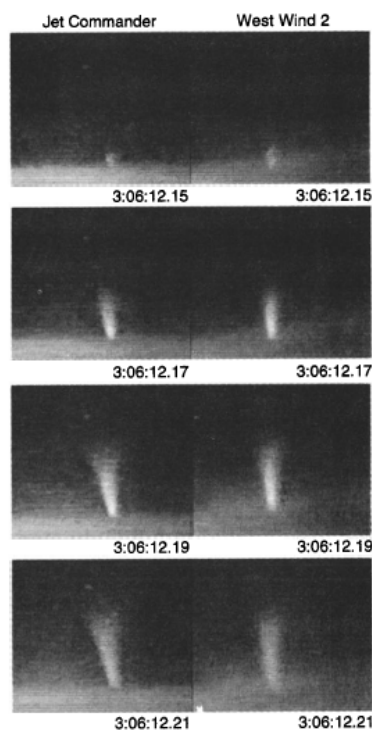


Рис. 1.6: Фотографии голубых струй, полученные в эксперименте Sprite94 [17].

1.2.3. Эльфы (ELVES)

Эльфы (ELVES - Emission of Light and Very Low frequency perturbations from Electro-magnetic pulse Sources) представляют собой довольно слабые дискообразные расширяющиеся вспышки, диаметр которых может достигать 400 км. Они возникают на большой высоте: 100 км – и длятся очень короткий промежуток времени – менее 1 мс. Это объясняет, почему эльфы долгое время не наблюдались экспериментально.

Впервые явление типа эльф было зафиксировано в 1990 году во время сильной грозы у берегов Французской Гвианы. Прошло несколько лет, прежде чем удалось повторно обнаружить подобное явление. Большая статистика эльфов была получена только в спутниковом эксперименте ISUAL [19]. Оказалось, что они являются самыми часто встречаемыми из всех типов ТАЯ и 80% таких событий происходят над океанами [20]. Пример события, зарегистрированного в этом эксперименте, показан на Рис. 1.7 [21].

Механизмом образования эльфов является нагрев электронов

нижних слоев ионосферы (75–100 км) за счет мощного электромагнитного импульса от обычных молний облако-земля. Измеряемая на экспериментах задержка между молниями и эльфами равна времени распространения электромагнитной волны (около 450 мкс) [21].

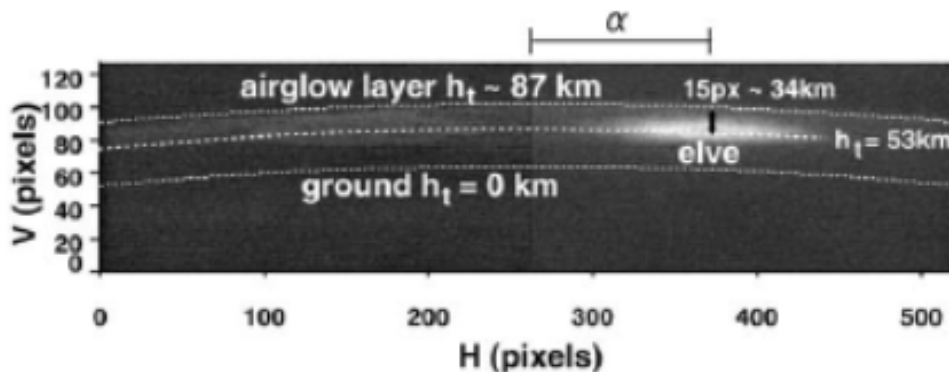


Рис. 1.7: Изображение эльфы, полученное в эксперименте ISUAL [21].

1.2.4. Гигантские струи (gigantic jets)

Первая регистрация гигантских струй была произведена в 2003 году во время грозы над Южно-Китайским морем [22]. Наблюдения велись с помощью наземных камер с низким пороговым уровнем света (low-light-level camera). Фотографии одного события из этой работы, сделанные с шагом 17 мс, приведены на Рис. 1.8.

Гигантские струи – самые большие, длительные и редкие транзиентные явления – образуются на высоте примерно 20 км, их протяженность составляет 60–80 км, а длительность достигает 500 мс. Скорость распространения в лидерной стадии на порядок выше, чем у голубых струй и сравнима со скоростью лидера в молниевых разрядах облако-земля – около 1000 км/с. Диапазон энергий таких явлений $10 - 10^3$ кДж [22].

По структуре гигантскую струю можно разделить на две части. Нижняя напоминает обычную голубую струю, а верхняя имеет древовидную форму. Гигантские струи соединяют облако с ионосферой, занимая все пространство между ними.

Наблюдения показывают, что гигантские струи происходят над

грозовыми районами, но интересно, что совпадений по времени с определенными молниями для них также не обнаружено [22].

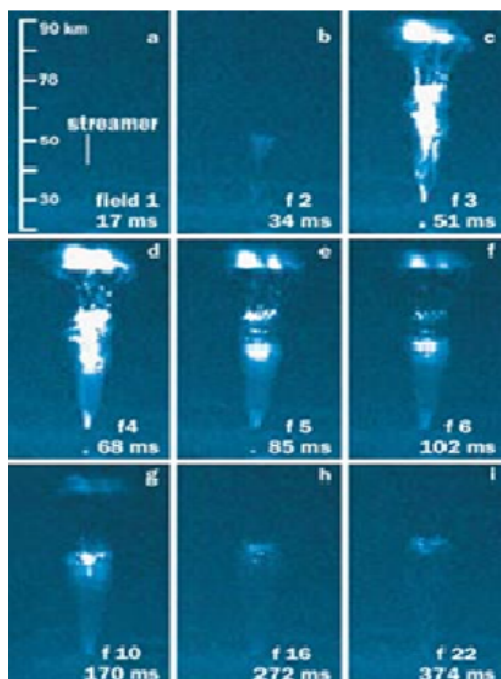


Рис. 1.8: Изображения гигантских струй, полученные в 2003 году во время грозы над Южно-Китайским морем [22].

1.3. Примеры регистрации ТАЯ вдали от гроз

Все описанные выше типы ТАЯ происходят в районах активного грозообразования. Для наиболее часто встречающихся из них (спрайтов и эльфов) при возможности точной локализации в пространстве и времени практически всегда удается определить предшествующий высоко атмосферному явлению молниевый разряд. Однако существует несколько экспериментов, в ходе которых были зарегистрированы ТАЯ вне грозных областей. Данные события крайне редки и представляют особый интерес для понимания механизмов их образования, который может быть основан на взаимодействии атмосферы с ближним космосом (магнитосферой и радиационными поясами Земли – РПЗ).

Примером такого эксперимента могут служить измерения с шаттла Columbia (MEIDEX sprite Campaign, январь 2003), во время которых было зарегистрировано «необычное» транзиентное световое явление в инфракрасном спектральном диапазоне, которое авторы называли TIGER

(Transient Ionospheric Glow Emission in Red). Оно было зарегистрировано южнее острова Мадагаскар над Индийским океаном. Его длительность составила менее 33 мс, а ближайшая молния была зафиксирована за 0.23 с и более чем в 1000 км от места регистрации события. Подробно данное измерение описано в работе [23]. Авторы показали отсутствие молнии также и в области сопряженной точки магнитного поля Земли. Кроме того не было зарегистрировано электромагнитного импульса («вистлера»), который мог бы вызвать высыпание частиц из РПЗ.

В работе [24] описаны быстрые атмосферные пульсации, обнаруженные в ясную погоду во время наземных измерений с помощью системы фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), рассчитанных на регистрацию излучения в диапазонах 320–430 нм и 430–650 нм, проводимых в течение двух лет в Анкаре (Турция). Авторы выделяют следующие характерные особенности таких явлений: длительность порядка 1 мс, преимущественное направление прихода – с юга относительно места наблюдения, образование групп по 5–6 штук (длительность одной группы ~ 10 мин). Такие пульсации были зарегистрированы в 46% ночей.

Аналогичные быстрые атмосферные пульсации длительностью порядка 1 мс наблюдались и в экспериментах, описанных в работах [25] и [26].

Также подобные быстрые атмосферные пульсации регистрировались авторами работы [27]. Наблюдения велись в ясные безлунные ночи с помощью трех фотометров. Большая часть событий была идентифицирована авторами работы как рассеянное излучение далеких молниевых разрядов, благодаря одновременной регистрации оптического излучения и электромагнитных импульсов. Однако среди всех событий были выделены две вспышки длительностью более 20 мс, которые не ассоциированы ни с одной молнией. Одной из гипотез их происхождения является высыпание частиц РПЗ, которые дают флуоресцентное свечение в атмосфере. Однако длительность зарегистрированных вспышек существенно меньше характерной длительности событий (более 100 мс), связанных с высыпанием частиц, измеренной в эксперименте [28].

Таким образом, в ряде экспериментов наблюдаются разнообразные

короткие оптические явления длительностью от 1 до 30 мс с разным спектральным составом излучения, которые происходят вдали от грозовых районов. В этих работах обсуждаются три возможные гипотезы происхождения ТАЯ вдали от грозовых регионов:

1. Рассеяние света от очень удаленных молний. Данная гипотеза представляется наиболее простой и естественной, однако, она требует наличия молнии на расстоянии до 1000 км, что выполняется далеко не всегда в приведенных выше работах. Более того, рассеянный сигнал далекой молнии должен быть сильно ослаблен.
2. Свечение атмосферы при высыпании релятивистских электронов из радиационных поясов Земли. Высыпания электронов РПЗ при взаимодействии с электромагнитным импульсом молниевых разрядов наблюдались экспериментально (так называемые, Lightning-induced electron precipitation – LEP). Однако, эти явления относительно медленные (порядка 100–500 мс) для типичных энергий электронов РПЗ – 100 кэВ.
3. Ускорение электронов молниевыми разрядами в сопряженной точке геомагнитного поля с их последующим проникновением в атмосферу. Эта гипотеза предлагается и обсуждается в работе [29].

Тем не менее ни одна из гипотез пока не подтверждена достаточным набором экспериментальных данных. С помощью аппаратуры, установленной на бортах университетских спутников «Вернов» и «Ломоносов», есть возможность изучать характеристики ТАЯ вне грозовых регионов, поскольку детекторы, расположенные на борту ИСЗ, проводят измерения как над грозами, так и далеко от них, как на экваторе, так и в высоких широтах. Таким исследованиям посвящена часть настоящей работы.

2. АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УФ ТРАНЗИЕНТНЫХ СОБЫТИЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА «ВЕРНОВ»

2.1. Детектор ДУФ на борту спутника «Вернов»

Спутник «Вернов» был выведен на солнечно-синхронную (с наклоном 98.4°) полярную орбиту высотой 640–830 км 8 июля 2014 года. С помощью комплекса научной аппаратуры, установленной на нем, были проведены исследования транзиентных световых явлений в ультрафиолетовом (УФ: 270–380 нм) и красном-инфракрасном (ИК: 610–800 нм) спектральных диапазонах. Срок активного существования аппарата на орбите составил 4 месяца. Внешний вид спутника показан на рисунке 2.1.



Рис. 2.1: Спутник «Вернов».

Детектор УФ и ИК-излучения (ДУФ) на борту спутника «Вернов» состоит из фотоэлектронных умножителей Hamamatsu R1463 и блока электроники (Рис. 2.2). Полоса пропускания каждого из детекторов ограничена соответствующими фильтрами (УФС2 и КС11) толщиной 2 мм.

Их поле зрения составляет 20° (определяется коллиматором на входе) и ориентировано в надир. Подробное описание детектора дано, например, в работе [30].



Рис. 2.2: Схема детекторов УФ и ИК излучения, установленных на борту спутника «Вернов».

Длительность развертки временного профиля сигналов от ФЭУ в детекторе составляет 128 мс с шагом 0.5 мс. Важно отметить, что триггерная система детектора отбирает и записывает одно самое мощное событие за каждые 4.5 секунды измерения. Таким образом, время регистрации события известно с точностью всего лишь 4.5 с. Информация о временном профиле сигнала от события в каждом из каналов УФ и ИК записывается в оперативную память каждые 0.5 мс в виде двух кодов: N – код АЦП и M – код высокого напряжения на обоих ФЭУ. По значениям кодов можно рассчитать число фотонов, прошедших через входные отверстия детектора за время t : $q(N, M) = \frac{\alpha N C t}{e p G(M) \tau}$, где α – коэффициент перехода от напряжения на конденсаторе анодной цепи в код АЦП N (разрешение АЦП), C – емкость анодной цепи, e – элементарный заряд, p – квантовая эффективность фотокатода, τ – постоянная времени анодной RC-цепи, G – коэффициент усиления ФЭУ. $G(M) \sim M^B$, B – калибровочный коэффициент.

Усиление ФЭУ подстраивается под условия фонового УФ освещения так, чтобы среднее значение кода N оставались постоянными. Эту задачу выполняет система автоматической регулировки усиления, изменяющая высокое напряжение на ФЭУ. На Рис. 2.3 показано экспериментальное распределение кодов АЦП в ходе измерения в течение всего времени работы аппарата на ночной стороне орбиты. Средний код АЦП

$N = 36 \pm 5$ при изменении интенсивности фонового излучения в широком диапазоне (от $3 \cdot 10^7$ фотон/см²ср с в безлунные ночи над океаном до $3 \cdot 10^9$ фотон/см²ср с в полнолуние и в области аврорального овала).

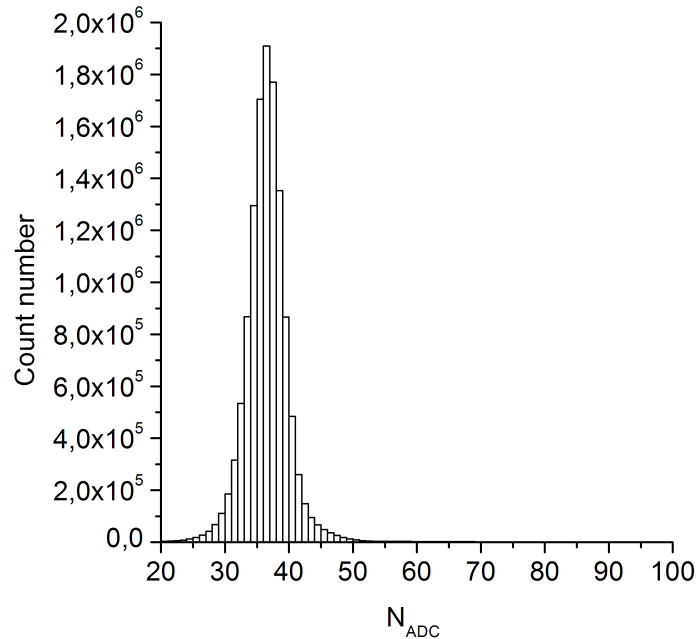


Рис. 2.3: Распределение кода АЦП N в ходе измерений фонового УФ излучения на спутнике «Вернов».

Общее время измерения детектора УФ излучения на спутнике «Вернов» на ночной стороне орбиты составило 166.5 часов. За это время было зарегистрировано более 150 тысяч событий (срабатываний триггера). Затем был произведен отбор полезных событий (УФ вспышек) по дополнительному критерию, выработанному после первичного анализа данных: превышение сигнала в двух соседних шагах развертки осциллографа, порог в одном из них составлял 5σ от среднего значения сигнала фонового свечения атмосферы и во втором – 3σ . Таким образом было отобрано ~ 8500 атмосферных вспышек. УФ вспышки очень разнообразны по временному профилю и энергии (числу фотонов). Классификация событий обсуждается в работе [31]. Примеры характерных осциллограмм событий приведены на рисунке 2.4. Географическое распределение всех зарегистрированных вспышек показано на рисунке 2.5. На карте очевидна корреляция УФ

вспышек с известными крупными грозовыми регионами, большая часть событий регистрируется в приэкваториальной зоне.

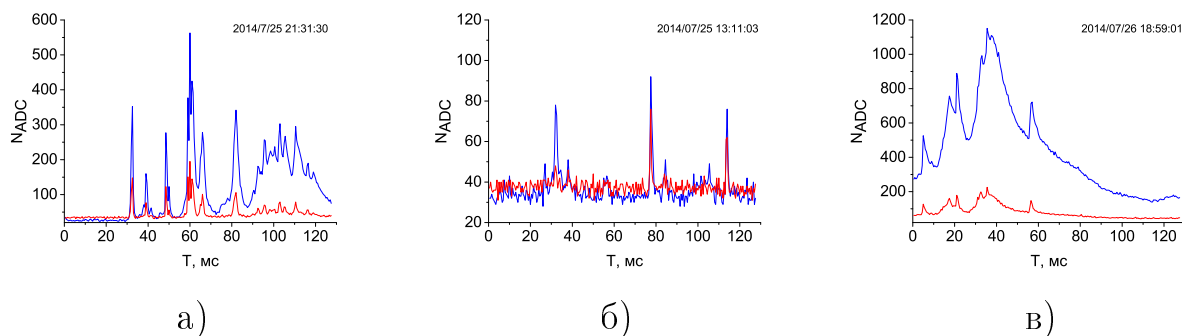


Рис. 2.4: Пример временных профилей событий, зарегистрированных детектором ДУФ со спутника «Вернов», в УФ (синяя кривая) и ИК (красная кривая) диапазонах длин волн.

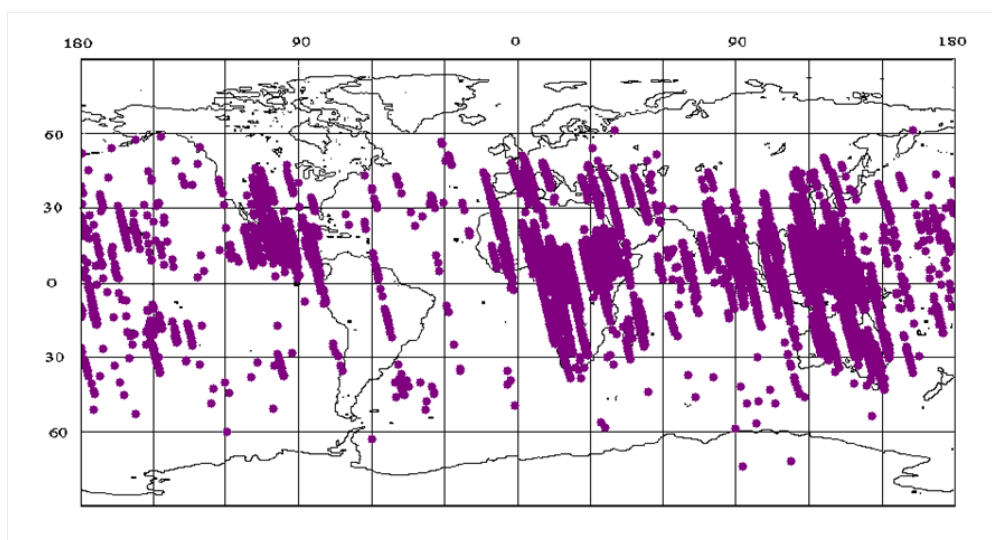


Рис. 2.5: Географическое распределение всех вспышек, зарегистрированных спутником «Вернов».

2.2. Оценка энергии (числа фотонов) УФ вспышек в атмосфере Земли

Одним из результатов исследования ТАЯ на спутнике «Вернов» является распределение атмосферных вспышек по их энергии (числу фотонов, производимых во время события в атмосфере). Получение этого распределения («спектра» по числу фотонов) является одной из задач, стоявших перед автором работы. Это распределение имеет как важное значение с точки зрения исследования атмосферных УФ

явлений, поскольку по его характерным особенностям можно ввести дополнительные критерии классификации событий (в случае обнаружения особенностей в спектре), так и методическое значение для планирования будущих орбитальных миссий по регистрации космических лучей предельно высоких энергий, таких как «КЛПВЭ» [32], JEM-EUSO [33].

Для получения этого распределения необходимо: 1) провести проверку калибровки детектора в ходе полета и возможное отклонение от параметров, измеренных в ходе предполетной подготовки; 2) произвести корректный учет времени экспозиции детектора с разным порогом по регистрации (порог изменятся ввиду подстройки кода высокого напряжения и измерения чувствительности детектора); 3) учесть влияние триггерной системы детектора, поскольку регистрируется определенная выборка событий (максимальное по коду АЦП за 4.5 с измерений), а не все УФ вспышки.

Для проверки и уточнения калибровки детектора ДУФ на спутнике «Вернов» использовались данные по интенсивности постоянного фонового свечения атмосферы в тех областях, где оно было измерено в предыдущем эксперименте на спутнике «Татьяна-2», на котором был установлен аналогичный прибор, и общая форма зависимости интенсивности от измеряемых параметров (кода АЦП N и кода высокого напряжения M : $I = \frac{A \cdot N}{MB}$). Для расчета коэффициентов A и B использовались значения интенсивности при пролетах в безлунные ночи над определенными городами, где в ходе обоих экспериментов наблюдались стабильные измерения с постоянной интенсивностью ($I = 2 \cdot 10^8$ фотон/см²ср с – в эксперименте «Татьяна-2») и в безлунные ночи над самыми темными регионами ($I = 3 \cdot 10^7$ фотон/см²ср с), которые расположены либо над океаном, либо в малонаселенных регионах над материком (центральная часть Африки). Координаты наименее ярких регионов на поверхности Земли, которые использовались в этой работе, были определены по географическому распределению интенсивности свечения в атмосфере, также полученному в эксперименте на борту спутника «Татьяна-2», представленному на рисунке 2.6 [34]. Пример понижения значения кода M , вызванного увеличением интенсивности при пролете спутника

«Вернов» над городами в Японии, показан на рисунке 2.7. Зная интенсивность в указанных регионах, которым соответствуют разные коды высокого напряжения, можно восстановить однозначное соответствие между интенсивностью свечения и измеряемыми кодами. Данный метод не является качественной калибровкой прибора, однако, позволяет контролировать параметры детектора и их возможные изменения в ходе орбитального полета с течением времени в отсутствии калибровочных источников на борту аппарата, используя естественное излучение атмосферы. Оказалось, что за 4 месяца работы поведение аппаратуры было достаточно стабильным, а полученные значения коэффициентов находятся в согласии с предполетными измерениями.

Рассчитанные описанным способом величины коэффициентов:
 $A = 4.6 \cdot 10^{24}$ фотон/см²ср с; $B = 8.3$.

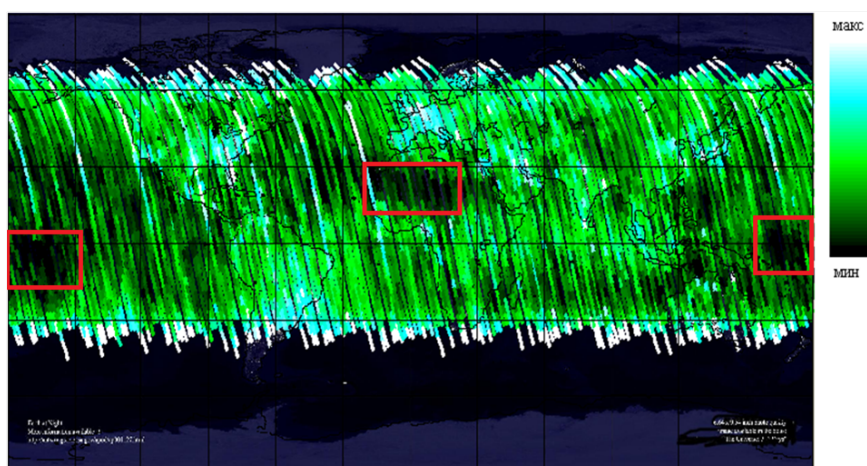


Рис. 2.6: Распределение интенсивности свечения в атмосфере по данным спутника «Университетский-Татьяна-2» (красными прямоугольниками выделены области с минимальной интенсивностью свечения).

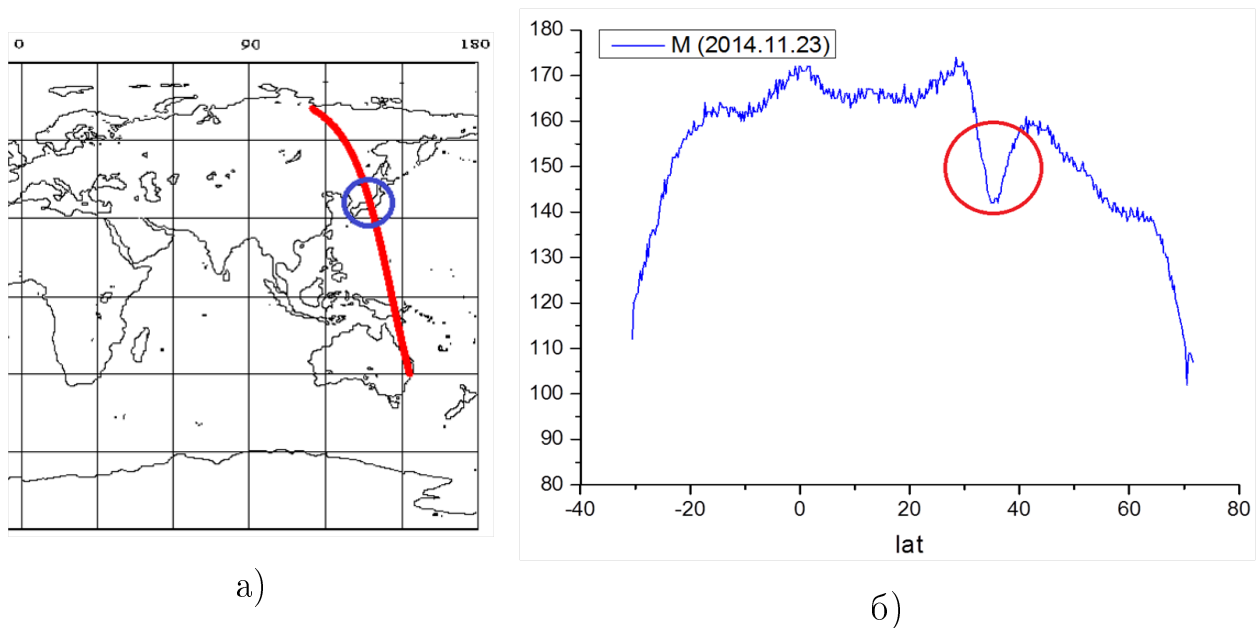


Рис. 2.7: Пример пролета спутника «Вернов» над городом в Японии в безлунную ночь а) карта с траекторией пролета спутника, б) изменение кода M в течение одного витка спутника вокруг Земли.

С использованием полученных коэффициентов был выполнен расчет интенсивности регистрируемого свечения атмосферы в разных областях и числа фотонов в каждом событии (УФ вспышке). Последнее определялось как сумма значений числа фотонов, падающих на входное окно детектора в одном шаге АЦП за всю длительность осциллограммы (256 тактов):

$$Q_a = 4\pi H^2 \Omega \tau \frac{A}{MB} \sum_{i=1}^{256} N_i,$$

где H – высота орбиты спутника, Ω – телесный угол поля зрения детектора, τ – шаг АЦП по времени. В этом случае расчет числа фотонов во вспышке производится в предположении, что событие произошло в центре поля зрения детектора, имеет малые размеры относительно всего поля зрения, а излучение в источнике изотропно. Как было сказано выше, помимо расчета энергии для получения распределения событий по числу фотонов необходимо учесть время экспозиции детектора для каждого порога регистрации. Для этого был проведен анализ времени наблюдения детектора при различных кодах высокого напряжения M . Для каждой энергии события рассчитано соответствующее ей пороговое значение кода – M_{thr} , при котором возможна регистрация и отбор данного события на фоне шума по описанному выше критерию, а значение времени наблюдения для данного порога определяется суммарным временем

регистрации, при котором $M > M_{thr}$. Таким образом число событий с определенной энергией было отнесено к времени измерения, в течение которого такие события вообще могли быть зарегистрированы детектором. В результате было получено распределение событий по числу фотонов, которое показано на рисунке 2.8. Отдельно показано распределение для всех событий, коротких (длительность менее 3 мс) и длинных. Очевидно, что максимальную суммарную энергию имеют длинные события и они определяют форму распределения при больших числах фотонов.

Важно отметить, что в данном распределение приведены минимальные оценки энергии событий, поскольку: 1) предполагается, что события произошли в центре поля зрения (эффективная площадь детектора максимальна в этом направлении) и 2) не учтена особенность триггерной системы – отбор максимального события за один период регистрации (4.5 с). Обсуждение влияния этих факторов на измеряемый спектр и моделирование триггерной системы приведены в следующем разделе.

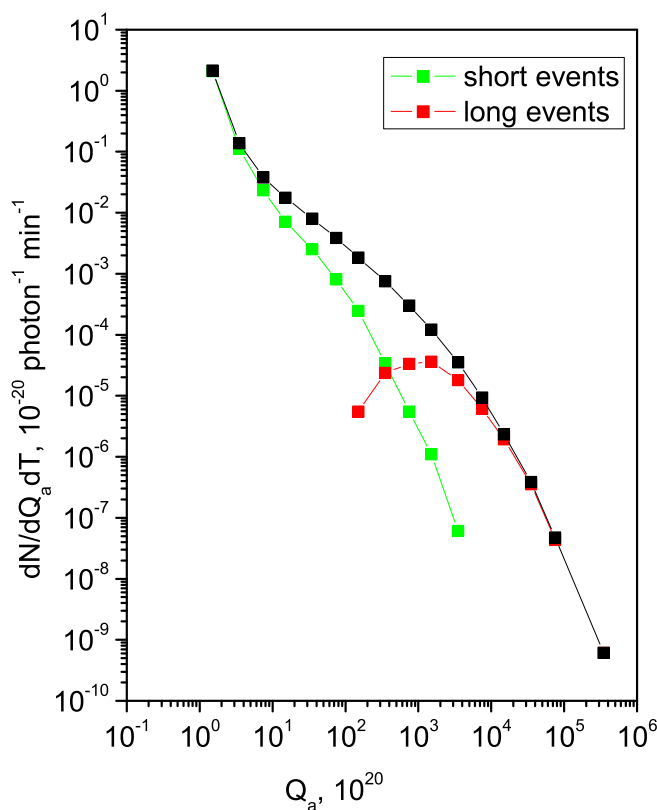


Рис. 2.8: Распределение УФ вспышек по числу фотонов по данным спутника «Вернов» с учетом времени экспозиции ($M > M_{thr}$). Черным цветом показаны все зарегистрированные события, зеленым – короткие события длительностью менее 3 мс, красным – длинные.

2.3. Моделирование работы триггерной системы детектора ДУФ

Приведенная выше оценка числа фотонов в событии не учитывает некоторых особенностей работы детектора.

Важным параметром в определении энергии события является эффективная площадь детектора, которая зависит от угла падения излучения. Коллиматор, ограничивающий поле зрения, представляет собой углепластиковую пластину с отверстиями. Толщина пластины – 2.2 мм, количество отверстий – 57, диаметр отверстий – 0.8 мм. Были проведены измерения чувствительности детектора в зависимости от зенитного угла, которые показали, что эффективная площадь детектора уменьшается с увеличением угла падения [35]. График зависимости имеет максимум

при нормальном падении и практически спадает до нуля при углах больше 20° . Аналогичный результат дают и расчеты эффективной площади из геометрических соображений. Таким образом, для расчета числа фотонов в атмосферной вспышке необходимо ввести поправочный фактор, учитывающий угол прихода излучения. Тогда $Q = \frac{S_{eff}(0^\circ)}{S_{eff}(\theta)} Q_a$, где Q – число фотонов во вспышке, $S_{eff}(0^\circ)$ – эффективная площадь детектора при нормальном падении, $S_{eff}(\theta)$ – эффективная площадь детектора при падении излучения на коллиматор под углом θ .

Еще один фактор, оказывающий сильное влияние на распределение зарегистрированных атмосферных вспышек по энергии, – это триггерная система детектора. Важным параметром для количественной оценки такого влияния является число вспышек n , происходящих в поле зрения детектора за время отбора максимального по амплитуде события (4.5 с). При $n > 1$ возможна ситуация, при которой в память детектора будет записана более слабая вспышка, произошедшая в центре поля зрения, в то время как вспышка с большей интенсивностью свечения в атмосфере может создать меньший отклик в детекторе, если она попала на край поля зрения. Поскольку основная доля регистрируемых явлений связана с грозовой активностью, то число n определяется количеством молниевых и высоко атмосферных разрядов в поле зрения прибора за время 4.5 с.

Для оценки влияния описанных факторов на спектр УФ вспышек, в ходе данной работы было проведено моделирование отклика детектора на вспышки в атмосфере, основывающееся на следующих предположениях:

1. Все зарегистрированные вспышки связаны с грозовой активностью.
2. Размер вспышек мал по сравнению с полем зрения детектора.
3. Число фотонов в атмосферных вспышках распределено по степенному закону.

Процесс моделирования включал в себя несколько этапов:

1. В поле зрения детектора помещалось n вспышек. Угол падения излучения на детектор θ распределялся равномерно от 0° до $\theta_{max} = 20^\circ$.

2. Для каждой вспышки рассчитывалось число фотонов в детекторе с учетом эффективной площади для ее расположения в поле зрения

$$q = \frac{S_{eff}(\theta)}{4\pi H^2} Q.$$
3. Из n вспышек выбиралась одна, имеющая максимальное значение q . Именно её бы и зарегистрировал детектор в аналогичных условиях.

Моделирование производилось для $N = 10^6$ измерений. После проведения сеансов моделирования для разных значений параметра n была обнаружена сильная зависимость эффективного поля зрения детектора от числа вспышек, происходящих в поле зрения. На рисунке 2.9 приведены результаты такого моделирования для $n = 1, 2, 5, 10, 20$. Видно, что с увеличением числа пропускаемых вспышек (а из всех вспышек в поле зрения регистрируется только одна!) наиболее вероятный угол прихода излучения уменьшается (т.е. при одинаковых энергиях детектор «выберет» вспышку ближе к центру поля зрения). Таким образом, с увеличением числа n поправочный фактор для расчета энергии вспышке в атмосфере приближается к единице, и мы точнее можем оцениваем число фотонов в зарегистрированном событии.

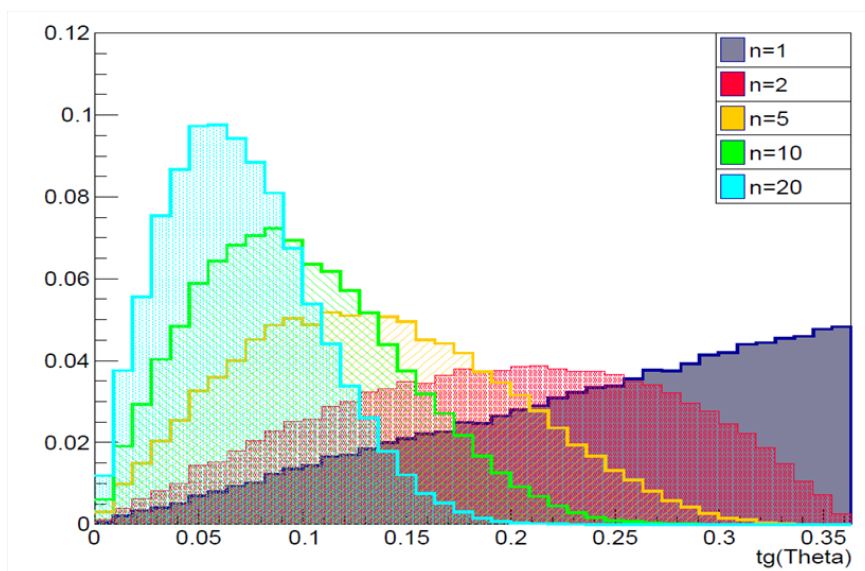


Рис. 2.9: Функция распределения угла падения на коллиматор при разных значениях n .

Характерные значения n можно оценить по числу молний, происходящих в поле зрения детектора за время срабатывания триггера (4.5 с). Такие расчеты были произведены по данным двух наземных сетей регистрации молний: всемирной WWLLN [36] и европейской EUCLID [37]. Были проанализированы данные сетей за период работы спутника «Вернов» и показано, что $n \leq 5$ для WWLLN и $n \leq 16$ для EUCLID. Такое различие в максимальном значении числа вспышек, попадающих в поле зрения, объясняется значительно более высокой эффективностью локальной европейской сети регистрации молний (но при этом, она охватывает своими измерениями только небольшой регион). Однако в ходе этого расчета так же выяснилось, что даже с использованием высокоэффективной сети EUCLID для 35% зарегистрированных спутником «Вернов» вспышек $n = 0$. С одной стороны, это является следствием того, что эффективность наземных сетей регистрации молний довольно мала, с другой, что реальная площадь зрения детектора превышает рассчитанные геометрическим способом (за счет рассеяния в атмосфере и отражения от стенок коллиматора). Однако важным следствием этих оценок можно считать то, что число n варьируется в достаточно больших пределах, а для большого числа случаев и вовсе равно 0. Это приводит к тому, что от случая к случаю эффективное поле зрения детектора сильно меняется, что существенно затрудняет расчет энергии событий. Это может привести к существенному изменению спектра и в первую очередь – к его смещению в область больших энергий.

После анализа результатов проведенного моделирования можно сделать следующие выводы: 1) реальное распределение атмосферных вспышек по числу фотонов (энергии) в УФ диапазоне сильно зависит от эффективной площади детектора, которая определяется углом падения излучения; 2) наиболее вероятный угол регистрации излучения (эффективная площадь обзора) зависит от числа вспышек, которые произошли в поле зрения детектора; 3) при малом числе вспышек в поле зрения энергия события может быть существенно больше рассчитанной в п.2.2 этой работы, а следовательно, спектр УФ вспышек

должен быть смещен в область больших энергий; 4) для последующих исследований УФ вспышек в атмосфере и оценки их энергии необходимо использовать детекторы с пространственным разрешением. Примером такого эксперимента может служить детектор ТУС на борту спутника «Ломоносов», некоторые результаты работы которого представлены в главе 4 данной дипломной работы.

3. СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ДЕТЕКТОРА ДУФ И НАЗЕМНЫХ СЕТЕЙ РЕГИСТРАЦИИ МОЛНИЙ

За время работы спутника «Вернов» детектором ДУФ было зарегистрировано около 8.5 тысяч атмосферных вспышек. Как было показано ранее, большая их доля связана с грозовой и молниевой активностью. Однако одним из самых интересных результатов эксперимента является регистрация УФ вспышек вдали от грозовых областей и вспышек над облаками, но без родительской молнии. Для анализа корреляции зарегистрированных событий с молниевой активностью и выделения «необычных» безгрозовых и безмолниевых ТАЯ были использованы данные наземных сетей регистрации молний WWLLN и Vaisala GLD360 [38]. Поскольку принцип их работы схож, опишем одну из них – WWLLN.

3.1. Мировая сеть регистрации молний WWLLN

Для отбора событий, произошедших вдали от грозовых областей, использовались данные наземной мировой сети регистрации молний WWLLN (World Wide Lightning Location Network). Эта сеть имеет станции регистрации по всему Земному шару (Рис. 3.1) и позволяет отслеживать грозовую активность в режиме реального времени. Станции определяют место положения молнии по времени прихода групп волн очень низких частот (3–30 кГц) от молниевых разрядов. Устойчивое распространение и слабое затухание таких волн при распространении в волноводе Земля-ионосфера позволяет регистрировать молнии, произошедшие в нескольких тысячах километров от станции. Тем не менее взаимодействие с ионосферой значительно искажает форму сигнала и делает затруднительным определение величины тока и полярности

молнии. Молния считается зарегистрированной, если сигнал от нее пришел на пять и более станций. При этом всего 15-30% от молний, зарегистрированных на одной станции, регистрируются еще на четырех. Таким образом, получается, что эффективность регистрации мощных разрядов значительно выше. Средняя же эффективность на сегодняшний день составляет 10%. Кроме мощности она также зависит от типа молнии и плотности станций в регионе регистрации [36]. Считается, что, в отличие от большинства наземных сетей регистрации молний, сеть WWLLN в равной степени способна фиксировать межоблачные молнии и молнии типа облако-земля, если они имеют сопоставимые значения пиковых токов и длин каналов [39].

В базе данных сети для каждой зарегистрированной молнии указываются время с точностью до микросекунды, географическая широта (-90,90) и долгота (-180,180).

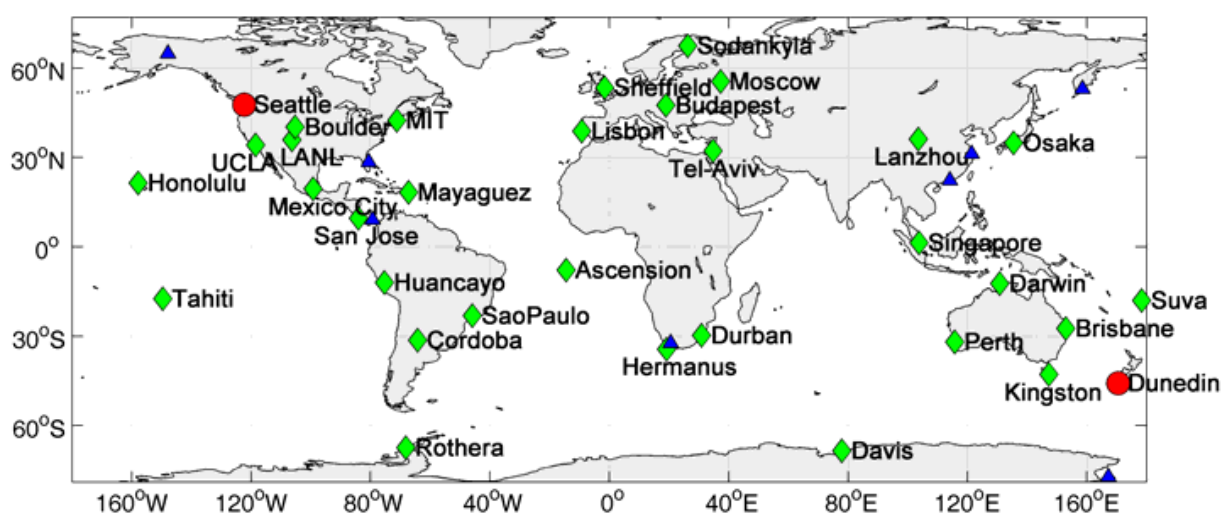


Рис. 3.1: Расположение станций регистрации молниевых разрядов сети WWLLN [36].

3.2. Постановка задачи и методика обработки данных

Как следует из описания триггера детектора ДУФ, приведенного в предыдущей главе, вспышки регистрировались с точностью по времени 4.5 с, а их географические координаты с точностью до размера поля зрения (круг с радиусом $R \approx 250$ км на поверхности Земли или угловое

расстояние $\Delta \approx 2.2^\circ$). Таким образом, первым шагом в совместном анализе стал поиск в базе данных наземной сети WWLLN ближайшей молнии. Зарегистрированная спутником вспышка могла быть как сигналом от этой молнии, так и высоко атмосферным разрядом, вызванным ею. На рисунке 3.2 представлен результат распределения молний относительно углового расстояния от подспутниковой точки в момент регистрации вспышки на спутнике «Вернов» при заданной погрешности измерения времени (для поиска совпадений критерий по времени был увеличен в 2 раза до ± 10 с). Число совпадений в поле зрения спутника оказывается малым и растет с увеличением области поиска.

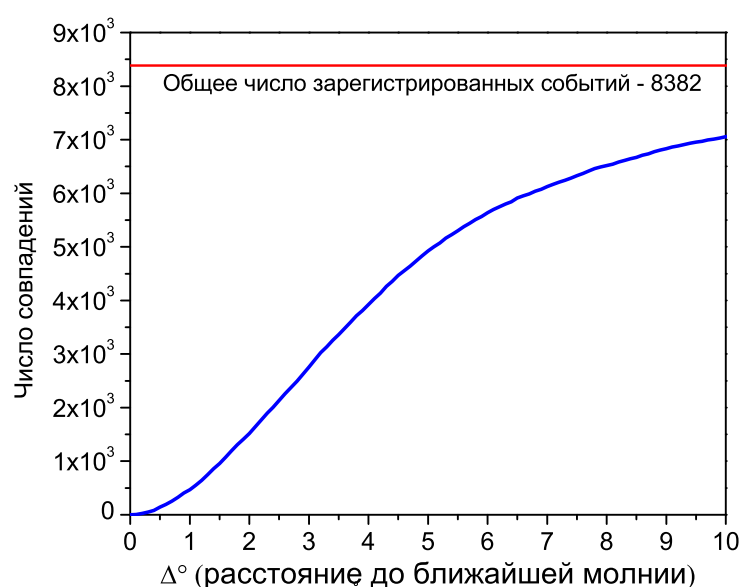


Рис. 3.2: Зависимость числа совпадений во времени события ТАЯ с ближайшей от его места положения молнией (зарегистрированной наземной сетью WWLLN) от размера области поиска совпадений за весь период получения данных на спутнике «Вернов».

Таких временных и пространственных точностей оказывается недостаточно для поиска совпадений зарегистрированных спутником вспышек и отдельных молниевых разрядов. Также существует вероятность попадания в поле зрения одновременно нескольких молний за время срабатывания триггера. И возможна ситуация, при которой по данным наземной сети в поле зрения спутника не попадет вообще ни одна молния. Это может быть связано, во-первых, с невысокой эффективностью

регистрации молний, а во-вторых, с откликом детектора на события, происходящие вне заявленного поля зрения (обсуждалось в прошлой главе).

Поэтому следующим этапом в определении безмолниевых ТАЯ стал поиск «антисовпадений» событий ТАЯ и молний. Как следует из рис. 3.2, в 1511 событиях из 8382 (18%) по данным сети WWLLN нет ни одной молнии в радиусе 1100 км от события в течение 20 секунд (± 10 до и после регистрации ТАЯ). Отобранные 1511 событий являются кандидатами в события ТАЯ, произошедшие вдали от грозовых областей и молний, но сделать однозначный вывод мешает существенная неопределенность в эффективности сети WWLLN и зависимость эффективности от географического района и мощности молнии.

Для обеспечения большей надежности отбора безмолниевых событий и исключения эффекта пропуска молний сетью WWLLN был применен критерий, реализующий кластерный подход к анализу имеющихся данных (поиск совпадения с большими по размеру грозовыми районами на большей площади и за большее время). Диаметр типичной грозы в среднем составляет около 100 км, а средняя продолжительность порядка 30 минут. Поэтому был проведен поиск совпадений событий из тех же баз данных спутника «Вернов» и сети WWLLN, но для временного интервала ± 30 минут от момента записи осциллограммы вспышки в блок информации спутника (т.е. в течение одного часа) в пределах большой пространственной области, задаваемой угловым размером $\Delta = 10^\circ$ (~ 1100 км). Если для события не находилось ни одного совпадения с молниями в области с угловым размером Δ и временем регистрации в пределах ± 30 минут, то оно засчитывалось как безгрозовое событие. Важно отметить, что в таком случае эффективность сети WWLLN по регистрации грозы существенно выше эффективности измерения отдельной молнии (более 80%) [40].

3.3. Результаты и обсуждение

Из всех событий ТАЯ, зарегистрированных спутником «Вернов», для 47 не нашлось совпадений с молниями в сети WWLLN по описанному выше критерию.

Было построено географическое распределение для этих 47 событий (см. рисунок 3.3). Очевидная связь с известными грозовыми областями не наблюдается. Внегрозовые события преимущественно концентрируются в Южном полушарии на высоких широтах, над океанами.

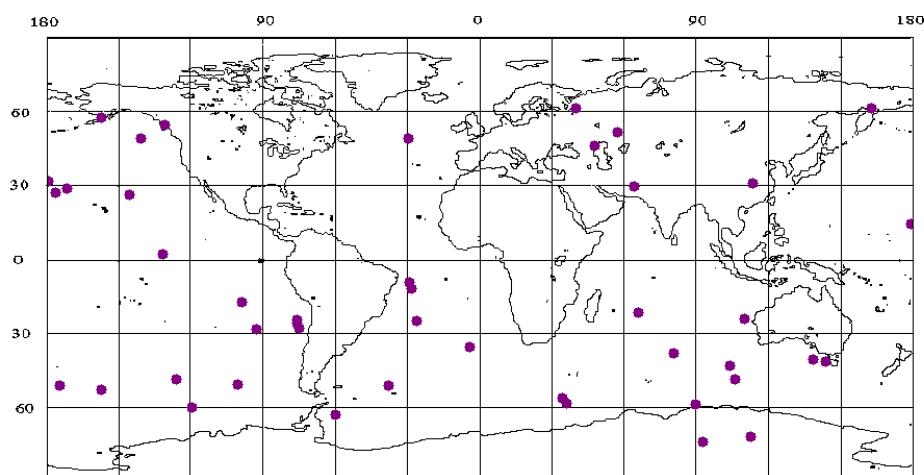


Рис. 3.3: Географическое распределение безмолниевых событий (всего 47 вспышек).

Были проанализированы формы импульсов от событий вне грозовых регионов (рисунок 3.4). Большинство таких вспышек (72%) представляют собой одиночные пики длительностью менее 3 мс (рис. 3.4). Вспышки являются достаточно слабыми – количество фотонов, выделенных в атмосфере в УФ области менее $5 \cdot 10^{21}$.

Из выделенных внегрозовых событий рассмотрим те, которые являются УФ вспышками длительностью более 10 мс. Они представляют наибольший интерес по следующим причинам:

1. поскольку их длительность более 10 мс и они имеют временную структуру, эти события не могут быть следствием одиночных сбоев регистрирующей аппаратуры;

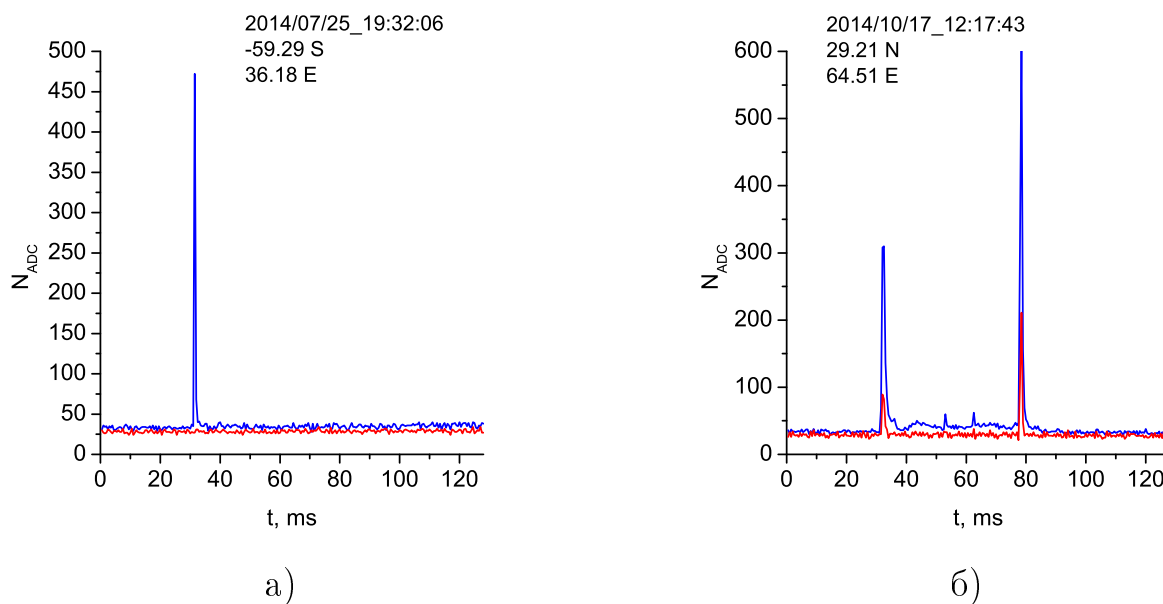


Рис. 3.4: Примеры временных профилей коротких (менее 3 мс) безмолниевых событий из базы данных спутника «Вернов» в УФ (синяя кривая) и ИК (красная кривая) диапазонах длин волн.

2. по той же причине они не могут быть следствием попадания заряженных частиц в стеклянные части фотодетектора (фильтр, фотокатод ФЭУ). Важно отметить, что в детекторе ТУС на спутнике «Ломоносов» такие имитации хорошо выделяются за счет характерного трека в фотоприемнике, состоящем из матрицы ФЭУ и фильтров [41]. После анализа первых данных детектора ТУС стало ясно, что большая доля слабых событий длительностью в один такт на спутнике «Вернов» являются следствием этого же эффекта – прямого попадания частиц низких энергий (протонов от 100 МэВ) в фотоприемник;

3. в этих событиях полностью отсутствует сигнал в ИК диапазоне.

Эти факты дополнительно подтверждают и безмолниевую природу событий: характерная длительность удара молнии составляет 30 мкс (т.е. молнии являются очень короткими событиями) и в спектре молнии преобладает излучение в красной области спектра [9].

Таких событий нашлось всего 6. Их временные профили показаны на рисунке 3.5. Три из них (а, б, в) имеют длительность около 30 мс, оставшиеся три события длятся больше 120 мс.

Был проведен дополнительный анализ отобранных событий с данным высокоэффективной наземной сети регистрации молний Vaisala GLD360 (средняя по всему Земному шару эффективность составляет 57%, в Северном полушарии $> 80\%$ [42]). Этот анализ подтвердил отсутствие грозы и молниевых разрядов в области образования этих событий.

Таким образом, можно утверждать, что в данных спутника «Вернов» выделен отдельный класс событий, которые не имеют грозовой природы и не связаны с приборными эффектами. Данные события имеют длительность более 30 мкс и в них отсутствует сигнал в красном канале детектора. Они дополняют статистику необычных ТАЯ в атмосфере Земли, полученных в других экспериментах, приведенную в первой главе данной работы.

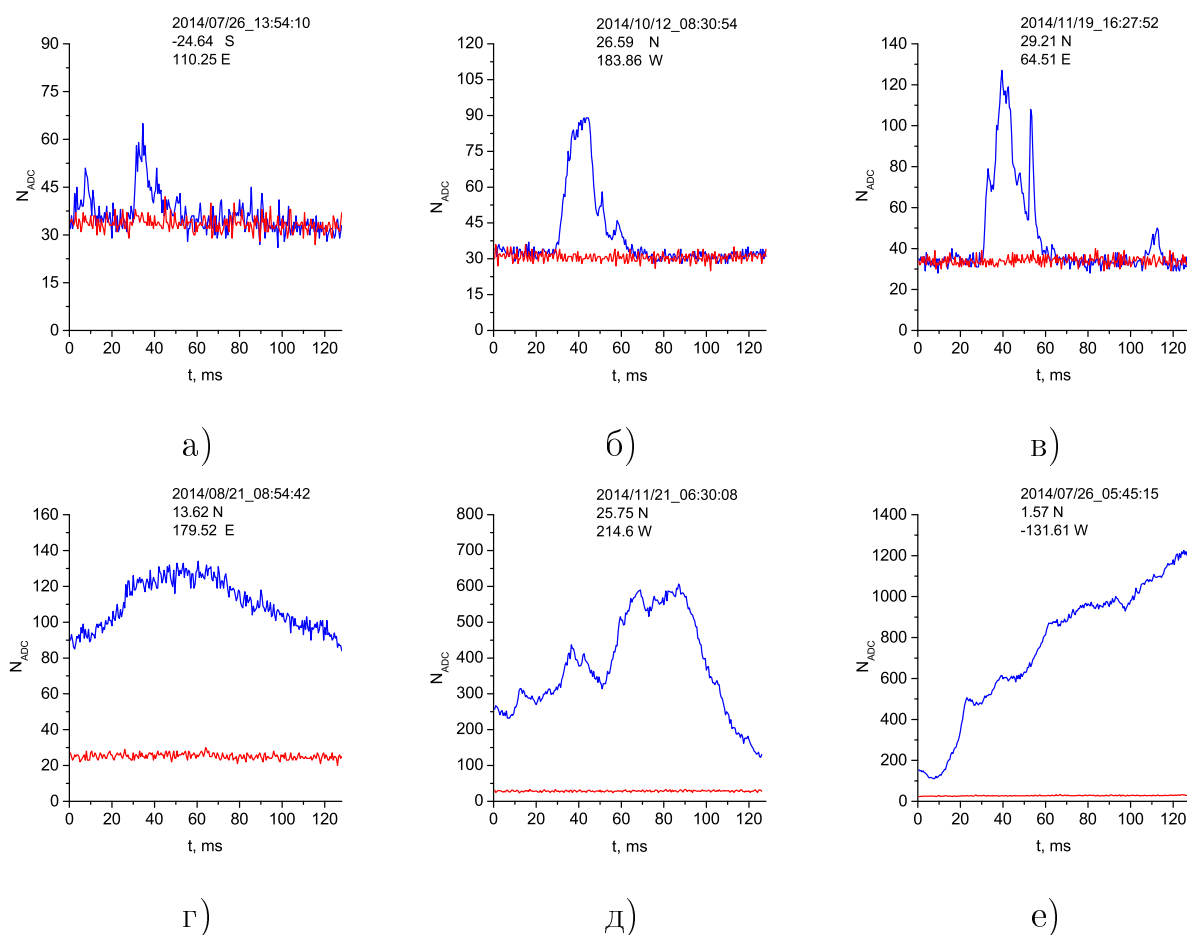


Рис. 3.5: Временные профили безмолниевых событий с длительностью более 10 мс из базы данных спутника «Вернов» в УФ (синяя кривая) и ИК (красная кривая) диапазонах длин волн.

3.4. Низковысотные УФ вспышки грозовой природы

В ходе анализа зарегистрированных на спутнике «Вернов» вспышек было построено распределение событий по отношению сигналов в ИК и УФ каналах детектора (рис. 3.6). На распределении виден значительный вклад событий с отношением $P = \frac{N^{IR}}{N^{UV}}$ близким к 0. Такие события являются кандидатами в ТАЯ, происходящими на сравнительно небольших высотах (10-30 км), так как с увеличением высоты в спектре атмосферных разрядов начинают преобладать линии первой положительной системы молекулярного азота, располагающиеся в красной части спектра [43]. Из всех зарегистрированных спутником «Вернов» событий было отобрано 721 событие без значимого сигнала в ИК диапазоне ($< 3\sigma$ над уровнем фона) – УФ события. И, так как в литературе есть указания на то, что ТАЯ типа голубые струи (blue jets) могут происходить в грозовых областях, но не являться прямым следствием молний облако-земля [18], был проведен совместный анализ этих УФ событий с наземными сетями регистрации молний.

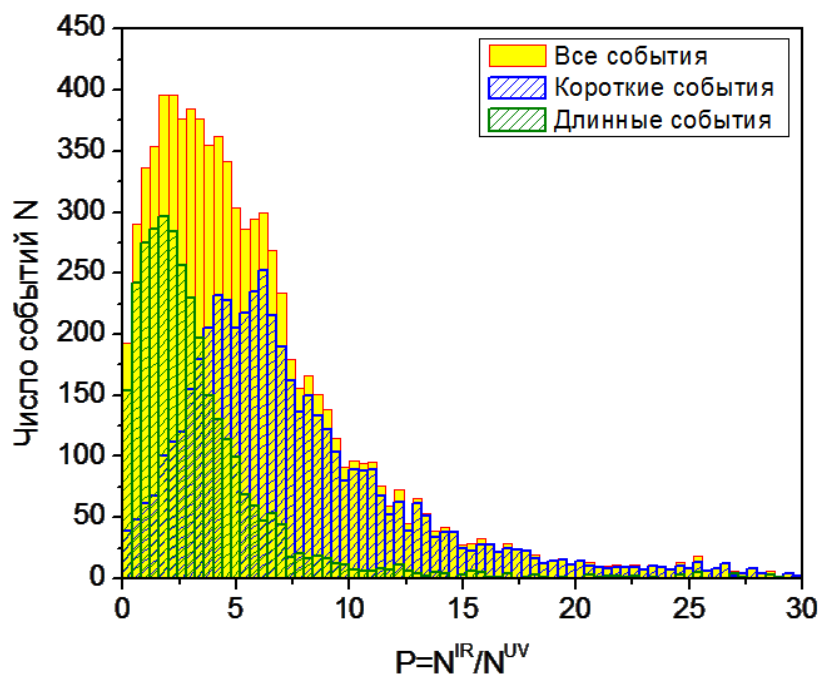
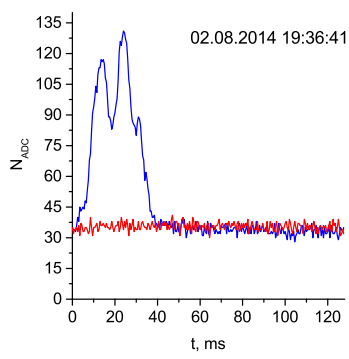


Рис. 3.6: Распределение событий, зарегистрированных спутником «Вернов», по отношению сигналов в ИК и УФ каналах.

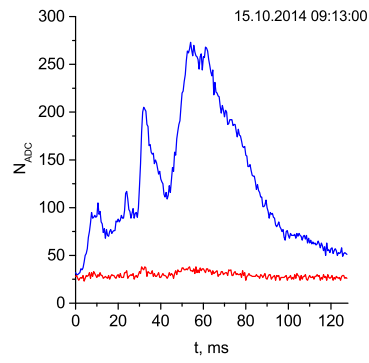
Из всего набора УФ событий по данным сети WWLLN было отобрано 236 событий, для которых:

1. нашлась молния за $\Delta t = \pm 30$ мин на расстоянии $\Delta s < 1000$ км от события, т.е. была грозовая активность,
2. нет молнии за $\Delta t = \pm 5$ с на расстоянии $\Delta s < 1000$ км от события.

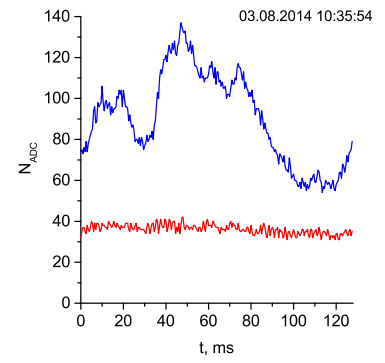
Эти вспышки имеют разную временную структуру и длительность. Ввиду невысокой эффективности регистрации сети WWLLN нельзя с высокой степенью уверенности утверждать, что отобранные события не имеют родительской молнии облако-земля. Поэтому был проведен дополнительный анализ с данными высокоэффективной сети Vaisala GLD360. Для 28 различных по форме сигнала событий были запрошены данные этой сети, и проведен еще один поиск молнии, произошедшей за $\Delta t = \pm 5$ с на расстоянии $\Delta s < 1000$ км от события. Для 20 из них такая молния нашлась (эта цифра показывает соотношение эффективностей наземных сетей WWLLN и Vaisala GLD360), для 8 – нет. При этом 6 из 8 безмолниевых «синих» событий имеют длительность более 30 мс. Их временные профили приведены на рисунке 3.7. Такие спектральные и временные характеристики отобранных вспышек соответствуют следующей гипотезе их происхождения: события относятся к транзиентным световым явлениям типа голубые струи, которые происходят в грозовом районе, непосредственно над облаками, однако, в отличие от других типов ТАЯ не имеют родительской молнии. Другим возможным источником данных сигналов могут служить внутриоблачные предмолниевые процессы, связанные с перераспределением зарядов внутри облака - предварительные пробои (initial breakdown – в англоязычной литературе). В последствии планируется провести дополнительный анализ на большей статистике событий и постановка нового эксперимента с более точной привязкой по времени и пространственным разрешением для проверки данных гипотез.



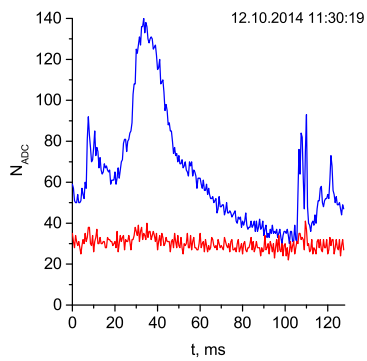
а)



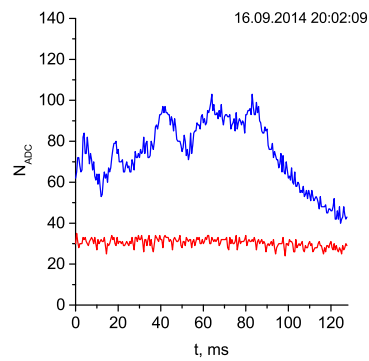
б)



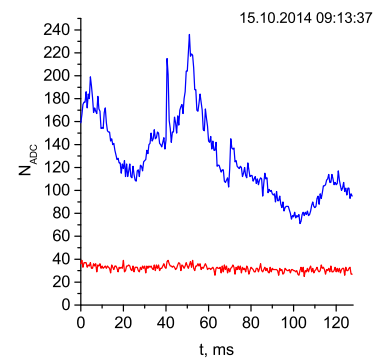
в)



г)



д)



е)

Рис. 3.7: Временные профили безмолниевых «синих» событий с длительностью более 30 мс, зарегистрированных спутником «Вернов».

4. СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ДЕТЕКТОРА ТУС И НАЗЕМНЫХ СЕТЕЙ РЕГИСТРАЦИИ МОЛНИЙ

4.1. Детектор ТУС на борту спутника «Ломоносов»

Орбитальный телескоп ТУС является первым в мире прибором, предназначенным для регистрации треков космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ - частиц с энергией больше $7 \cdot 10^{19}$ эВ) в атмосфере Земли с борта искусственного спутника. Детектор был запущен 28 апреля 2016 г. в составе спутника «Ломоносов» с космодрома Восточный на солнечно-синхронную орбиту высотой ~ 500 км.

Детектор ТУС представляет собой телескоп-рефлектор, состоящий из зеркала-концентратора френелевского типа большой площади (2 м^2) и фотоприемника, расположенного в фокальной плоскости. Схема детектора и его расположение на спутнике показаны на рисунке 4.1. Фотоприемник является матрицей (16×16) из 256 фотоэлектронных умножителей типа Hamamatsu R1463. Перед каждым ФЭУ стоит фильтр, пропускающий только УФ излучение в диапазоне 240-400 нм. Телесный угол обзора ячейки составляет 10^{-4} ср, что в атмосфере соответствует наблюдению квадрата $5 \text{ км} \times 5 \text{ км}$ [44].

В работе детектора ТУС предусмотрено четыре режима с разным временным разрешением и длительностью временной развертки - см. таблицу 4.1. Поэтому с помощью детектора ТУС можно изучать различные явления, происходящие в атмосфере Земли. Первый режим предназначен для регистрации широких атмосферных ливней от КЛ ПВЭ, второй и третий – для измерения молниевых разрядов и транзиентных атмосферных явлений, четвертый – для регистрации метеоров и грозových процессов длительностью больше 1 с.

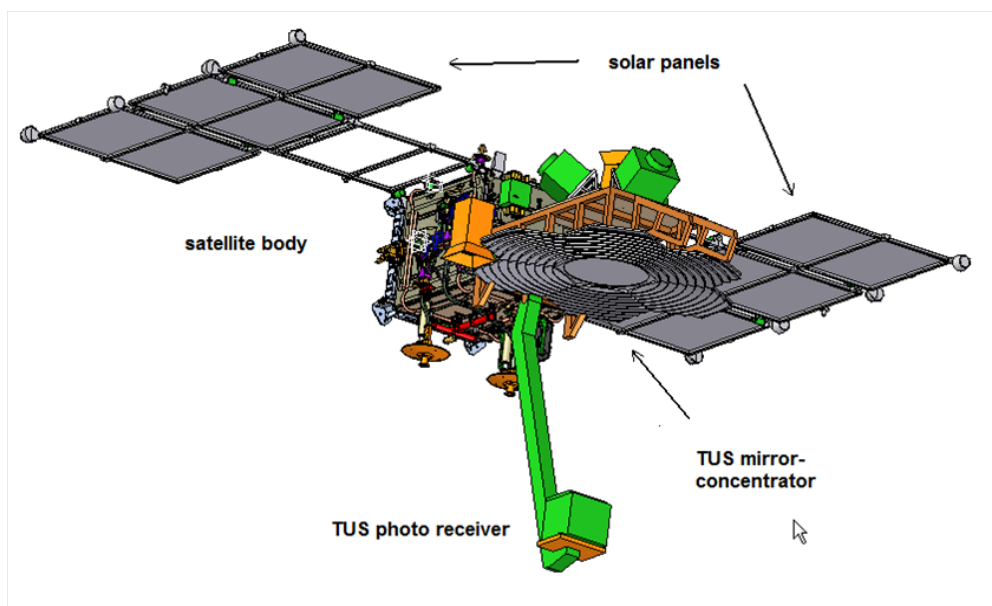


Рис. 4.1: Детектор ТУС на борту спутника «Ломоносов».

Таблица 4.1: Временные характеристики разных режимов работы детектора ТУС.

Режим работы	Временное разрешение, τ	Длительность временной развертки
ШАЛ	0.8 мкс	$256\tau = 205$ мкс
Короткие ТАЯ	25.6 мкс	$256\tau = 6.6$ мс
Длинные ТАЯ	0.4 мс	$256\tau = 105$ мс
Микрометеоры	6.6 мс	$256\tau = 1.7$ с

4.2. Совместный анализ данных детектора ТУС и сети WWLLN

В зарегистрированных детектором ТУС событиях было выделено несколько классов событий, имеющих характерную временную структуру. Грозы являются главным источником кратковременного ультрафиолетового излучения в атмосфере, которое регистрируется детектором в разных режимах работы. Для того, чтобы убедиться в этом, был проведен совместный анализ событий двух классов с данными всемирной наземной сети регистрации молний WWLLN.

Первый рассмотренный класс представляет собой события,

зарегистрированные в режиме ШАЛ (с временным разрешением 0.8 мкс), имеющие плавное нарастание сигнала. Характерный временной профиль такого события показан на рисунке 4.2. Анализ с данными наземной сети регистрации молний проводился для 144 событий такого типа. Для каждого из них в базе данных сети WWLLN был произведен поиск ближайшей молнии для двух временных интервалов: $\Delta t = \pm 30$ мин и $\Delta t = \pm 1$ с. Распределение событий по расстоянию до ближайшей молнии приведено на рисунке 4.3.

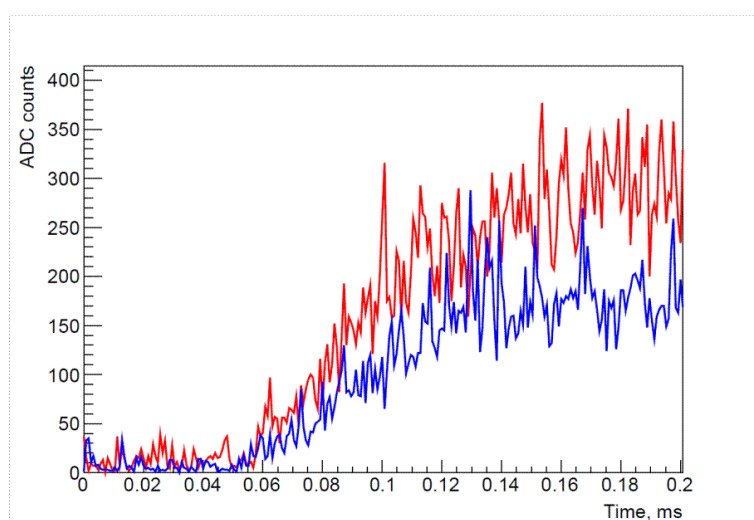


Рис. 4.2: Пример события, зарегистрированного детектором ТУС, с медленным нарастанием сигнала. Разными цветами показаны разные каналы детектора.

Второй класс событий, для которых был произведен совместный анализ с наземными данными о молниевой активности, составляют события с явно выраженной временной структурой, зарегистрированные в режиме «Длинные ТАЯ» (с временным разрешением 0.4 мс). Пример такого события показан на рисунке 4.4, а результат аналогичного поиска ближайшей молнии – на рисунке 4.5.

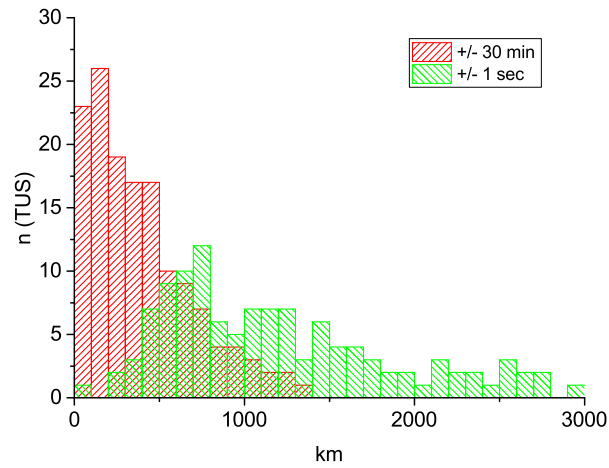


Рис. 4.3: Распределение событий с медленным нарастанием сигнала по расстоянию до ближайшей молнии по данным наземной сети WWLLN для двух временных интервалов поиска.

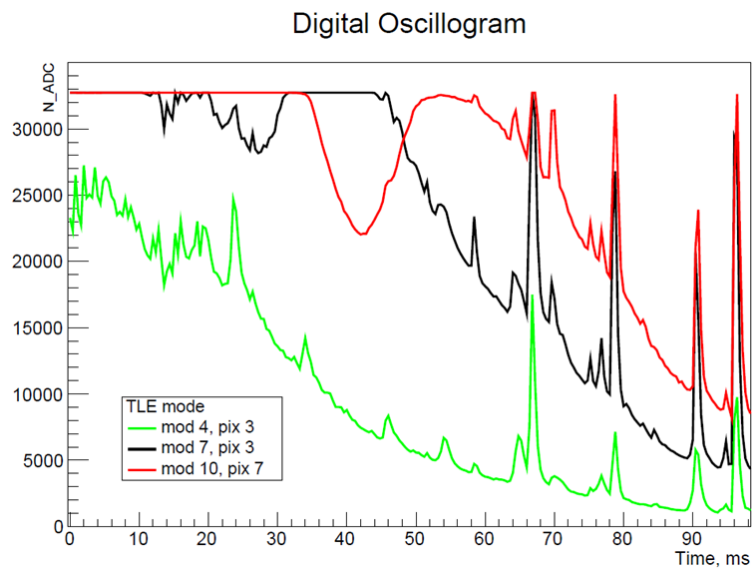


Рис. 4.4: Пример события, с явно выраженной временной структурой, зарегистрированного детектором ТУС. Разными цветами показаны разные каналы детектора.

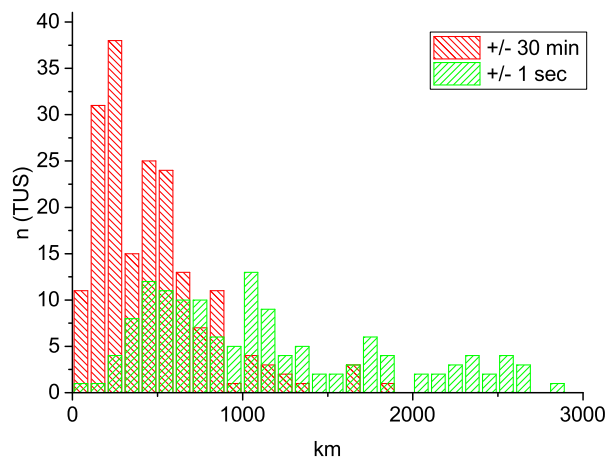


Рис. 4.5: Распределение событий с явно выраженной временной структурой по расстоянию до ближайшей молнии по данным наземной сети WWLLN для двух временных интервалов поиска.

По рисункам 4.3 и 4.5 видно, что далеко не для всех событий в базе данных наземной сети нашлась молния, которая могла быть источником УФ вспышки в атмосфере вблизи поля зрения детектора. Это является следствием эффективности наземной сети WWLLN. Однако, при увеличении длительности интервала поиска совпадения до 1 часа оказывается, практически все события произошли в грозовых районах. Важно отметить, что анализ пространственной структуры событий показал, что большая часть событий регистрируется всем фотоприемником одновременно и не имеет явного центра сигнала – своеобразная равномерная засветка. Наиболее естественным объяснением данного эффекта является то, что детектор реагирует на вспышки вне поля зрения, а равномерный сигнал по всему фотоприемнику – следствие рассеяния УФ излучения на шероховатости зеркала. Действительно, в ходе предполетных испытаний было показано, что доля фокусируемого света в изображение составляет 60%. Это означает, что половина УФ сигнала, попадающего на зеркало равномерно рассеивается и засвечивает все ячейки фотоприемника.

Данный результат имеет важное методическое значение для экспериментов «КЛПВЭ» и JEM-EUSO. Оптическая система детектора

должна быть защищена от сигналов вне поля зрения. Для проекта «КЛПВЭ» было принято решение перейти от однозеркальной оптической системы (как у детектора ТУС) на оптическую схему Шмидта, в которой зеркало находится внутри телескопа, а входное окно представляет собой линзу-корректор с блендой от боковой засветки.

4.3. События типа эльф, зарегистрированные детектором ТУС

В отличие от детектора ДУФ на спутнике «Вернов» телескоп ТУС обладает пространственным разрешением, и это позволило надежно идентифицировать некоторые типы ТАЯ по характерной пространственно-временной динамике. В частности, события типа «эльф», описанные в первой главе дипломной работы.

За время работы детектора ТУС на борту спутника «Ломоносов» было зарегистрировано 5 высоко атмосферных транзиентных события эльф (см. таблицу 4.2). Пример регистрации приведен на рисунке 4.6. Эти события имеют форму расширяющегося кольца диаметром 100-400 км. Вспышки такого рода хорошо идентифицируются в экспериментальном наборе данных по характерной форме сигналов в каналах детектора, выстраивающихся в дугу, бегущую по матрице фотоприемника (см. рис. 4.6 а-в). Длительность эльфа – меньше миллисекунды, поэтому их динамика хорошо видна именно в режиме работы детектора с временным разрешением 0.8 мкс (режим ШАЛ) и не различима в других режимах.

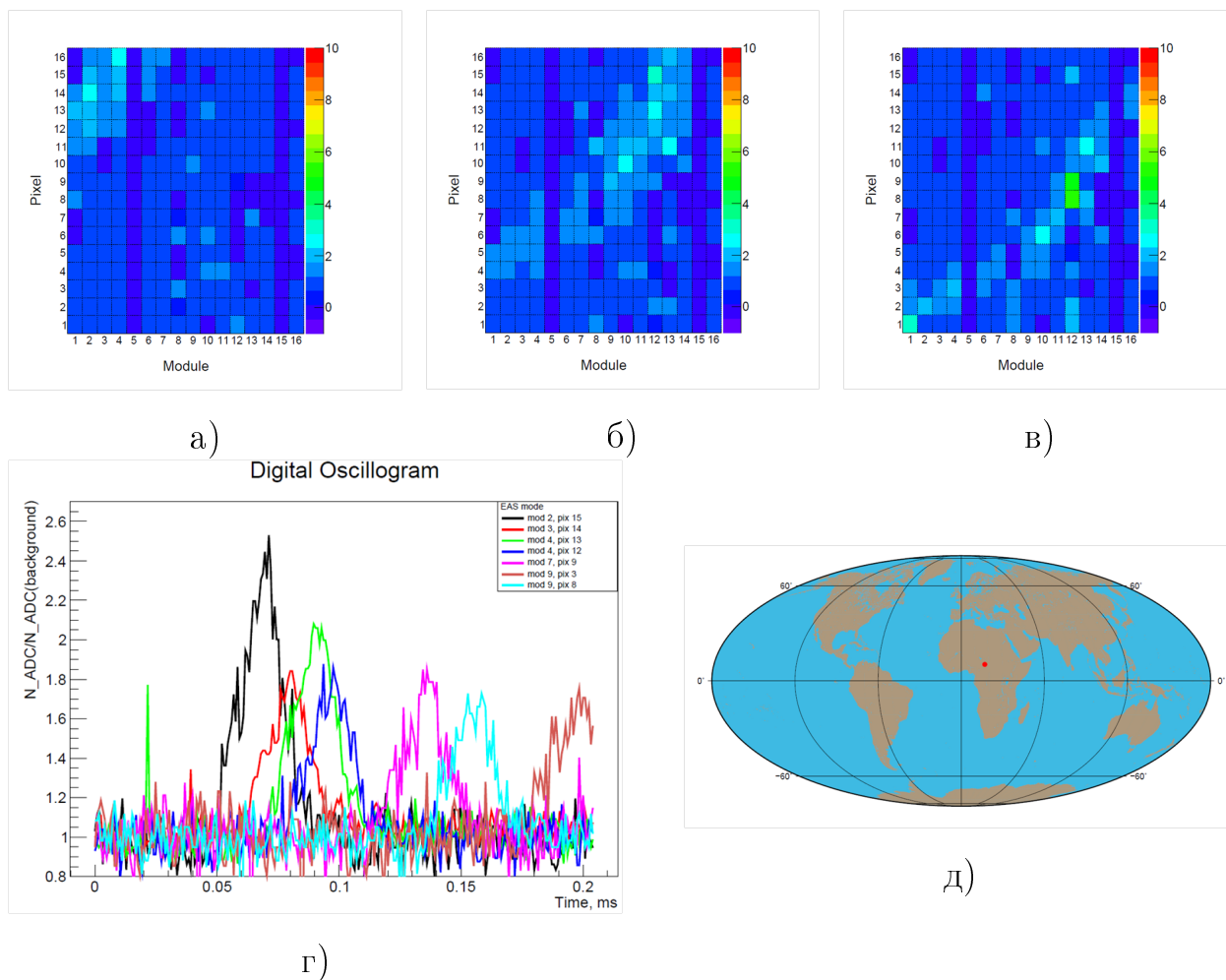


Рис. 4.6: Пример регистрации ТАЯ типа эльф детектором ТУС (событие №2 из таблицы 4.2): а),б),в) карты каналов матрицы фотодетектора на 0.077 мс, 0.174 мс, 0.182 мс от начала записи события в память детектора; г) временные профили нескольких пикселей фотодетектора; д) географическое местоположение события.

Наземные наблюдения [45] показывают, что все молниевые разряды с амплитудой тока обратного удара больше 60 кА сопровождаются ТАЯ типа эльф. С целью найти родительскую молнию для всех зарегистрированных детектором ТУС событий такого типа и определить их полярность и величину тока был выполнен совместный анализ с данными высокоэффективной наземной сети регистрации молний Vaisala GLD360. Для каждого ТАЯ типа эльф в базе данных сети был произведен поиск молний, зарегистрированных за $\Delta t = \pm 2$ с на расстоянии $\Delta s < 500$ км от события. При таких условиях поиска для всех пяти событий нашлось число молний N_l , $1 \leq N_l \leq 19$. Причем для

каждого события среди отобранных молний присутствует ровно одна, для которой амплитуда тока > 60 кА, которую можно считать источником электромагнитного импульса, ответственного за появление эльфа. Среди них встречаются молнии разной полярности. При этом анализ геометрии событий показал, что эта мощная молния располагается таким образом, что является центром кольца, дуга которого перемещается по фотодетектору в событиях. Данный анализ носит качественный характер, в дальнейшем будет проведено моделирование этих явлений. Таким образом, имеются все указания на то, что для всех зарегистрированных событий типа эльф была идентифицирована родительская молния.

Таблица 4.2: События типа эльф, зарегистрированные детектором ТУС. Номер, дата, время, географические координаты зарегистрированного события; N_l – число молний зарегистрированных за $\Delta t = \pm 2$ с на расстоянии $\Delta s < 500$ км от события по данным сети Vaisala GLD360; d – расстояние до молнии с амплитудой тока > 60 кА; амплитуда тока и полярность этой молнии.

№	Дата	Время	Географические координаты (широта; долгота)	N_l	d , км	Амплитуда тока молнии, кА
1	07.09.2016	09:51:35	-11.62; -161.69	8	163.6	+64.5
2	18.09.2016	22:06:48	9.66; 17.14	19	125.2	-135.1
3	18.10.2016	13:20:11	15.07; 149.26	1	218.3	-327.4
4	12.12.2016	15:20:20	-11.74; 115.30	9	137.2	+101.3
5	14.12.2016	01:55:08	-21.60; -44.78	5	217.3	-210.3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы проведено исследование УФ вспышек в атмосфере Земли по данным детекторов, установленных на спутниках МГУ «Вернов» и «Ломоносов».

Основные результаты работы:

1. Получено распределение УФ вспышек по числу фотонов с учетом экспозиции без учета особенностей работы триггерной системы (запись события с максимальной амплитудой за время 4.5 с), зарегистрированных на спутнике «Вернов».
2. Проведено моделирование работы детектора УФ излучения на борту спутника «Вернов» с учетом особенностей триггерной системы. Показано, что эффективная площадь детектора уменьшается при увеличении числа вспышек, попадающих в поле зрения детектора. Это приводит к заниженной оценке энергии регистрируемых событий и смещению экспериментального спектра УФ вспышек в область малых энергий. Для идентификации типов событий и получения спектра важно пространственное разрешение прибора, которое позволит определять положение события и его форму.
3. В результате совместного анализа данных спутника «Вернов» и наземных сетей регистрации молний WWLLN и Vaisala GLD360 выделен класс внегрозовых УФ вспышек в атмосфере Земли, происходящих на расстоянии более 1000 км от ближайшей грозы и не связанных с молниевой активностью. Длительность событий составляет более 30 мс, энергия, выраженная в числе фотонов в УФ диапазоне – не более $5 \cdot 10^{21}$.
4. Из базы событий, зарегистрированных на спутнике «Вернов», выделен

класс УФ вспышек (максимальный уровень сигнала в ИК канале не превышает 3σ над уровнем фона). Из них отобраны события в грозовых областях, не сопровождающиеся молниевым разрядом по данным двух наземных сетей (WWLLN и Vaisala GLD360). 6 из 8 таких событий имеют длительность более 30 мс. Отсутствие сигнала в ИК канале свидетельствует о низкой высоте происхождения (в модели излучения молекулярного азота), а время развития близко к длительности транзиентного светового явления голубая струя.

5. Проведен совместный анализ данных детектора ТУС на спутнике «Ломоносов» и сети регистрации молний WWLLN. Для двух типов событий показано, что распределение событий по расстоянию до ближайшей молнии существенно шире поля зрения детектора. Это свидетельствует о регистрации событий, происходящих вне поля зрения детектора ТУС. Одновременный сигнал по всей матрице фотодетектора для таких событий подтверждает это предположение, которое объясняется рассеянием УФ излучения на шероховатости зеркала детектора ТУС. Этот результат должен быть учтен при проектировании детекторов КЛ ПВЭ следующего поколения («КЛПВЭ», JEM-EUSO).
6. Проведена обработка данных детектора ТУС в режиме регистрации ШАЛ (временное разрешение 0.8 мкс). Обнаружено 5 событий типа эльф. Для каждого из них был произведен анализ данных наземной сети регистрации молний Vaisala GLD360 и поиск молний в радиусе 500 км за интервал времени ± 2 с с момента времени регистрации. Для каждого события обнаружена родительская молния с амплитудой тока > 60 кА.

Автор благодарит коллективы коллабораций «Вернов», «Ломоносов» и наземных сетей регистрации молний WWLLN, EUCLID, Vaisala GLD360 за предоставленные данные, используемые в работе. А также научного руководителя П.А. Климова и сотрудников лаборатории Космических лучей предельно высоких энергий НИИЯФ МГУ за помощь и поддержку в процессе исследовательской деятельности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Franz R., Nemzek R., Winckler J. Television Image of a Large Upward Electrical Discharge Above a Thunderstorm System // Science. 1990. vol. 249, number 4964. p. 48-51.
2. Wilson C. T. R. The electric field of a thundercloud and some of its effects // Proceedings of the Physical Society of London. – 1924. – Т. 37. – №. 1. – С. 32D.
3. Schonland B. F. J., Malan D. J., Collens H. Progressive lightning. II // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. – 1935. – Т. 152. – №. 877. – С. 595-625.
4. Тарасов Л.В. Эволюция представлений о природе молнии и грома // ежемесячный журнал «Потенциал». URL: <http://potential.org.ru/Home/LineLightning>
5. Базелян Э.М. Физика молнии и молниезащиты / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер.-Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2001. - Глава 1.
6. Royalty Free Curated Stock Weather Footage, Photos and Illustrations. URL: <http://weathervideohd.tv/wvhd.php>
7. Юман М. Молния. Мир, 1972.
8. Yair Y. et al. Lightning flash multiplicity in eastern Mediterranean thunderstorms // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2014. – Т. 14. – №. 2. – С. 165.
9. Orville R., Henderson R. Absolute Spectral Irradiance Measurements of Lightning from 375 to 880 nm // Journal of the Atmospheric Sciences. 1984. vol. 41, number 21. p. 3180-3187.

10. CNES (Centre National d'Etudes Spatiales):
<https://cnes.fr/en/web/CNES-en/9128-gp-taranis-satellite-to-study-lightning.php>
11. Boccippio D. et al. Sprites, ELF Transients, and Positive Ground Strokes // *Science*. 1995. vol. 269, number 5227. p. 1088-1091.
12. Pasko V. et al. Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere // *J. Geophys. Res.* 1997. vol. 102, number A3. p. 4529.
13. São Sabbas F. et al. Statistical analysis of space-time relationships between sprites and lightning // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2003. vol. 65, number 5. p. 525-535.
14. Hampton D. et al. Optical spectral characteristics of sprites // *Geophysical Research Letters*. 1996. vol. 23, number 1. p. 89-92.
15. Sentman D. et al. Preliminary results from the Sprites94 Aircraft Campaign: 1. Red sprites // *Geophysical Research Letters*. 1995. vol. 22, number 10. p. 1205-1208.
16. Boeck W. et al. The role of the space shuttle videotapes in the discovery of sprites, jets and elves // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 1998. vol. 60, number 7-9. p. 669-677.
17. Wescott E. et al. Preliminary results from the Sprites94 Aircraft Campaign: 2. Blue jets // *Geophysical Research Letters*. 1995. vol. 22, number 10. p. 1209-1212.
18. Wescott E. M., Sentman D. D., Heavner M. J., Hampton D. L., Vaughan Jr., O. H. Blue jets: their relationship to lightning and very large hailfall, and their physical mechanisms for their production // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 1998. 60:713-724.
19. S. B. Mende, and the ISUAL team. Spacecraft based studies of transient luminous events // *CORSICA NATO summer study series*, 2004.

20. Chen A. et al. Global distributions and occurrence rates of transient luminous events // J. Geophys. Res. 2008. vol. 113, number A8.
21. Kuo C. et al. Modeling elves observed by FORMOSAT-2 satellite // J. Geophys. Res. 2007. vol. 112, number A11.
22. Su H. et al. Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere // Nature. 2003. vol. 423, number 6943. p. 974-976.
23. Yair Y. Space shuttle observation of an unusual transient atmospheric emission // Geophysical Research Letters. 2005. vol. 32, number 2.
24. Ögelman H. Millisecond time scale atmospheric light pulses associated with solar and magnetospheric activity // J. Geophys. Res. 1973. vol. 78, number 16. p. 3033-3039.
25. Charman W., Jelley J. A search for pulses of fluorescence produced by supernovae in the upper atmosphere // Journal of Physics A: General Physics. 1972. vol. 5, number 5. p. 773-780.
26. Elliot J.L. Atmospheric fluorescence as a groundbased method of detecting cosmic x-rays // Smithsonian Astrophysical Observatory Special Report 341, 1972.
27. Nemzek R., Winckler J. Observation and interpretation of fast sub-visual light pulses from the night sky // Geophysical Research Letters. 1989. vol. 16, number 9. p. 1015-1018.
28. Voss H. et al. Satellite observations of lightning-induced electron precipitation // J. Geophys. Res. 1998. vol. 103, number A6. p. 11725.
29. Lehtinen N., Inan U., Bell T. Effects of thunderstorm-driven runaway electrons in the conjugate hemisphere: Purple sprites, ionization enhancements, and gamma rays // J. Geophys. Res. 2001. vol. 106, number A12. p. 28841.
30. M. I. Panasyuk, S. I. Svertilov, et al. Relec mission: Relativistic electron precipitation and the study on-board small spacecraft // Advances in Space Research. 2016. 57(3):835-849.

31. Климов П.А., Гарипов Г.К., Хренов Б.А., Морозенко В.С., Барина В.О., Богомолов В.В., Казначеева М.А., Панасюк М.И., Салеев К.Ю., Свертилов С.И., Транзиентные атмосферные явления по результатам измерений на спутнике «Вернов» // Исследования Земли из космоса (в печати).
32. Г. К. Гарипов, М. Ю. Зотов, П. А. Климов и др. Детектор космических лучей предельно высоких энергий КЛПВЭ на борту МКС // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2015. — Т. 79, № 3. — С. 358–361.
33. J. H. Adams, G. K. Garipov, B. A. Khrenov et al. An evaluation of the exposure in nadir observation of the JEM-EUSO mission // Astroparticle Physics. — 2013. — Vol. 44. — P. 76–90.
34. Морозенко В.С. Фоновые явления в ночной атмосфере Земли при измерении космических лучей предельно высоких энергий с помощью орбитального детектора: Дис... канд. ф.-м. наук – Москва, 2014.
35. Казначеева М.А., Куликов И.С. Энергетическое распределение УФ вспышек в атмосфере Земли по данным спутника «Вернов» // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2016». 2016. ISBN 978-5-317-05237-9.
36. WWLLN (World Wide Lightning Location Network): <http://wwlln.net/new/>
37. EUCLID (EUropean Cooperation for LIghtning Detection): <http://www.euclid.org/>
38. Said R. K., Inan U. S., Cummins K. L. Long-range lightning geolocation using a VLF radio atmospheric waveform bank // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2010. — Т. 115. — №. D23.
39. Abarca S., Corbosiero K., Galarneau T. An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth. // J. Geophys. Res. 2010. vol. 115, number D18.

40. Hutchins, M. L., and R. Holzworth. Thunderstorm characteristics from cluster analysis of lightning. XV International Conference on Atmospheric Electricity. 2014.
41. П. А. Климов, М. Ю. Зотов, Н. П. Чирская и др. Предварительные результаты орбитального детектора космических лучей предельно высоких энергий “ТУС”: регистрация эффекта прохождения частиц низких энергий через фотоприемник // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2017. — Т. 81, № 4. — С. 442–445.
42. Said R. K., Cohen M. B., Inan U. S. Highly intense lightning over the oceans: Estimated peak currents from global GLD360 observations // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2013. — Т. 118. — №. 13. — С. 6905–6915.
43. Garipov G. K. et al. Global transients in ultraviolet and red-infrared ranges from data of Universitetsky-Tatiana-2 satellite // Journal of geophysical research: atmospheres. — 2013. — Т. 118. — №. 2. — С. 370–379.
44. J.H. Adams et al. Space experiment TUS on board the Lomonosov satellite as pathfinder of JEM-EUSO. // Experimental Astronomy 40(1), p. 315–326, 2015. DOI: 10.1007/s10686-015-9465-y.
45. Barrington-Leigh C. P., Inan U. S. Elves triggered by positive and negative lightning discharges // Geophysical Research Letters. — 1999. — Т. 26. — №. 6. — С. 683–686.