

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
“МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА”
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ФИЗИКИ КОСМОСА

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА
«РЕКОНСТРУКЦИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИХОДА ШИРОКИХ
АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ ПО ДАННЫМ ДЕТЕКТОРА TUS»

Выполнил студент
414 группы:
Кущенко Анна Константиновна

подпись студента

Научный руководитель:
научный сотрудник Шаракин Сергей Александрович

подпись научного руководителя

Допущена к защите « ____ ».05.2019

Зав. кафедрой _____

подпись зав. кафедрой

Москва

2019

Содержание

Введение	4
1 Орбитальные детекторы космических лучей	7
1.1 Принцип орбитального детектирования. Обзор существующих и планируемых детекторов	7
1.2 Детектор TUS	9
2 Реконструкция направления прихода модельных событий	13
2.1 Постановка задачи реконструкции направления прихода .	13
2.2 Метод ЛТА	15
2.3 Моделирование параметрических событий	17
2.4 Задача распознавания образа	21
2.5 Управляющие параметры ЛТА	23
2.5.1 Выделение окна активности	24
2.5.2 Абсолютный порог	25
2.5.3 Относительный порог	27
2.5.4 Показатель степени веса n	29
2.6 ЛТА-реконструкция: зависимость от азимутального угла .	30
2.7 ЛТА-реконструкция: зависимость от зенитного угла	33
2.8 ЛТА-реконструкция: зависимость от величины шума	36
2.8.1 Гауссов шум	36
2.8.2 Негауссов шум	37
2.9 ЛТА-реконструкция: зависимость от количества отобран- ных каналов	40
2.10 Выводы	41
2.11 ЛТА-реконструкция: зависимость от размера изображения	42
3 Реконструкция событий TUS: примеры	45
3.1 ЛТА-реконструкция модельных событий с асимметричной кривой свечения	45
3.1.1 Параметрические события	45
3.1.2 ESAF-события	47

3.2	Событие TUS161003	49
3.2.1	Реконструкция при абсолютном пороге	52
3.2.2	Реконструкция при относительном пороге	53
3.2.3	Выводы	54
3.3	Событие TUS161031	54
3.3.1	Реконструкция при абсолютном пороге	54
3.3.2	Реконструкция при относительном пороге	57
3.3.3	Выводы	58
	Заключение	59
	Список использованных источников	60
A	Приложение. Пакет программ RecoStudio	62
A.1	Генерация события	62
A.2	Выделение события (распознавание образа)	67
A.3	Реконструкция события	70
B	Приложение. Базы данных модельных событий	71
B.1	Базы данных параметрических событий	71
B.1.1	Базы данных с фиксированным зенитным углом	71
B.1.2	Базы данных с выделенным направлением	71
B.1.3	БД с равномерным распределением по азимуту	72
B.2	Базы данных AssymmetricGauss	73
B.3	Базы данных ESAF	73

Введение

Космические лучи – поток частиц, приходящий к Земле из космоса. Они были открыты в 1912 году в экспериментах на воздушном шаре В. Гессом, который обнаружил, что ионизация воздуха растет с высотой, в то время как ионизация, вызванная радиоактивностью Земли, должна была бы падать с высотой. За более чем 100 лет исследований был получен энергетический спектр космических лучей, который простирается на много порядков по энергиям: от частиц солнечного ветра с энергией менее и порядка 10^6 эВ, до частиц космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ) [1], энергия которых превышает значение $5 \cdot 10^{19}$ эВ – теоретический предел Грайзена-Зацепина-Кузьмина [2, 3], обусловленный взаимодействием частиц с фоновым реликтовым излучением. Последние, частицы КЛ ПВЭ, представляют особый интерес в физике космических лучей [4].

Открытие КЛ ПВЭ сразу же вызвало вопрос: каков механизм, приводящий к возникновению и ускорению этих частиц, ведь достичь таких гигантских энергий в земных условиях не представляется возможным? До каких энергий вообще в природе возможно ускорить элементарные частицы? Что во Вселенной может являться источником КЛ ПВЭ? Каков химический (массовый) состав КЛ ПВЭ? На сегодняшний день мы имеем лишь ограниченные и противоречивые сведения об энергетическом спектре и химическом составе частиц в области сверх больших энергий. Исследования КЛ ПВЭ осложнены очень низкой частотой попадания частиц в атмосферу Земли из космического пространства – примерно 1 частица с пороговой энергией $5 \cdot 10^{19}$ эВ на 100 км^2 в год. Поэтому необходимо применение косвенных методов регистрации космических лучей. В экспериментах такого типа детекторы фиксируют не саму первичную частицу, а эффекты, производимые ей в атмосфере: поток вторичных частиц широкого атмосферного ливня (ШАЛ) и сопутствующие флуоресцентное, черенковское или радио излучения. Один из возможных и наиболее перспективных вариантов эксперимента – орбитальный детектор флуоресцентного свечения ШАЛ.

Первый орбитальный детектор КЛ ПВЭ TUS (Track Ultraviolet Setup) был запущен на околоземную орбиту в составе научной аппаратуры спутника «Ломоносов» 28 апреля 2016 года [5, 6]. За время работы детектора было зарегистрировано (отобрано триггером) более 80 тыс. событий, среди которых есть обладающие характерной для ШАЛ пространственно-временной динамикой [7]. Два наиболее интересных из этих события, зарегистрированные 3 и 31 октября 2016 года (TUS161003 и TUS161031), подробно рассмотрены ниже.

Целью данной работы является реконструкция направлений прихода событий TUS161003 и TUS161031, в том числе разработка нового метода реконструкции применительно к детектору TUS. Существующие методы не применимы (или плохо подходят) к данному детектору, так как не учитывают следующих его особенностей: большой размер светочувствительного сенсора (размер пикселя $a = 15$ мм) и неидеальность фокусирующей оптической системы (размер изображения заметно превышает размер отдельного пикселя).

Метод, рассматриваемый в настоящей работе, является эвристическим, т.е. не имеет надежного математического обоснования, и результаты реконструкции зависят от управляющих параметров метода. Для выявления оптимальных значений управляющих параметров, при которых метод дает наиболее точные результаты, были созданы базы данных модельных событий, обладающих основными характерными чертами событий, реально зарегистрированных детектором TUS.

В ходе работы на модельных событиях исследуется зависимость точности метода от:

- направления прихода;
- величины шума (фонового сигнала);
- числа каналов (пикселей) фотоприемника, используемых при реконструкции;
- размера изображения, формируемого оптикой детектора;
- вида кривой свечения ШАЛ (зависимости интенсивности от време-

ни).

Метод также апробируется на модельных событиях, сгенерированных при помощи специализированного пакета программ ESAF (EUSO Simulation and Analysis Framework).

На основе проведенного исследования делается вывод об оптимальном способе применения метода и оптимальных значениях его управляющих параметров, а также производится реконструкция событий TUS161003 и TUS161031.

1 Орбитальные детекторы космических лучей

1.1 Принцип орбитального детектирования. Обзор существующих и планируемых детекторов

Частицы КЛ ПВЭ в столкновениях с ядрами атомов атмосферы рожают ядерно-активные вторичные частицы (адронная компонента), которые двигаются практически по направлению первичной частицы и, в свою очередь, дают начало мюонной и электронно-фотонной компонентам каскада. Вместе эти три компонента и образуют широкий атмосферный ливень. Заряженные частицы ШАЛ ионизируют атомы атмосферы и возбуждают метастабильные электронные уровни молекул и атомов, которые возвращаются в исходное состояние, излучая изотропный свет. При больших потоках частиц в ливне сигнал флуоресцентного свечения ШАЛ оказывается весьма значительным и может быть зарегистрирован орбитальным детектором, расположенным на спутнике Земли на высоте около 500 км. В состав такого детектора обязательно входит оптическую систему, осуществляющую светосбор излучения ШАЛ, и многоканальный фотоприемник, расположенный в ее фокусе.

Рассмотрим подробнее, как формируется изображение на фокальной плоскости (ФП) фотоприемника. Поперечный размер ШАЛ на поверхности Земли может достигать нескольких километров, однако учитывая, что детектор находится на высоте 500 км, а ШАЛ развивается на высотах до 20 км, можно пренебречь размерами движущегося объекта и, в первом приближении, считать его точечным. Чаще всего оптика детектора проектируется так, чтобы осуществлять фокусировку каждой точки объекта в отдельный пиксель. Если же размерами источника можно пренебречь, то изображение на ФП представляет собой совокупность последовательно сработавших пикселей – трек. Так, при наблюдении свечения ШАЛ с околоземной орбиты трек фактически является результатом проекции оси ливня на фокальную поверхность фотоприемника, а скорость перемещения¹ сработавших пикселей позволяет вычислить угол наклона оси. Тем самым, изучая расположение трека на матрице фотоприемника

¹В данном случае под скоростью перемещения понимается скорость, с которой вовлекаются в

и скорость перемещения по нему изображения, можно восстановить – реконструировать – направление прихода первичной частицы космических лучей.

Метод орбитального детектирования ШАЛ путем наблюдения флуоресценции атмосферы вдоль трека каскада частиц обладает рядом преимуществ по сравнению с аналогичными наземными экспериментами. Во-первых, он позволяет полностью наблюдать каскадную кривую (точнее, пропорциональную ей кривую свечения) – зависимость интенсивности регистрируемого флуоресцентного света от времени. Интеграл по каскадной кривой является высокоточной мерой энергии первичной частицы, а анализ формы каскадной кривой (насколько глубоко в атмосфере находится максимум ливня) позволяет оценить ее массу, то есть определить химический состав КЛ ПВЭ. Во-вторых, орбитальный детектор, обладая большой площадью обзора, не требует при этом больших площадей при своем развертывании. Для сравнения приведем наибольшую из современных наземных установок – Pierre Auger Observatory, которая обладает гигантской общей площадью 3000 км^2 [8]. Немаловажно и то, что расположенный на орбите Земли детектор позволяет полностью обзирать небесную сферу, что не под силу наземным установкам.

Впервые метод регистрации КЛ ПВЭ на установках космического базирования предложил в 1981 году Дж. Линсли. В дальнейшем эта идея получила развитие в проектах «КЛПВЭ» [9] и «ТУС» Федерального космического агентства РФ и EUSO [10] Европейского космического агентства (который, с 2006 года стал активно развиваться усилиями и японских специалистов и был переименован в JEM-EUSO [11]).

В детекторах “КЛПВЭ” и TUS роль оптической системы выполняет зеркало-концентратор. При использовании зеркала поле зрения детектора ограничено размером фотоприёмника (не может быть большим, так как он затеняет зеркало). Однако преимуществом применения зеркала-концентратора является сравнительная простота изготовления зеркала большой площади и, тем самым, возможность наблюдения частиц КЛ

трек изображения все новые пиксели. Данное понятие хорошо определено в случае, когда размер изображения не превышает размер пикселя.

ПВЭ с большой высоты орбиты для осуществления большой площади обзора атмосферы даже при малом поле зрения детектора.

В детекторе JEM-EUSO вместо зеркала-концентратора используется сложная система линз. Поле зрения и угловое разрешение в этом случае оказывается выше. Однако время экспозиции детектора меньше (планируется работать лишь при небольших фазах луны, в российских же проектах работоспособность приборов сохраняется и при полной Луне за счёт автоматического регулирования коэффициента усиления ФЭУ).

1.2 Детектор TUS

Детектор TUS состоит из многоканального фотоприемника, расположенного в фокальной плоскости зеркала-концентратора площадью примерно 2 м^2 с фокусным расстоянием $f = 1.5 \text{ м}$. Фотоны флуоресценции атмосферы, порождаемые частицами ШАЛ, попадают на зеркало и фокусируются на матрицу ячеек фотоприемника – 256 каналов в виде фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). Отдельные каналы фотоприемника сгруппированы в модули с общей системой электрического питания (всего 16 модулей по 16 каналов). Входное окно каждого канала представляет собой квадрат («пиксель») со стороной $a = 15 \text{ мм}$, т.е. характерное угловое разрешение прибора составляет $\gamma_{\text{pix}} = a/f = 10 \text{ мрад}$, что при высоте орбиты 500 км соответствует области $5 \times 5 \text{ км}^2$ на поверхности Земли. Таким образом, общее поле зрения детектора TUS составляет $80 \text{ км} \times 80 \text{ км} = 6400 \text{ км}^2$.

Светочувствительный сенсор в каждом канале детектора представляет собой мультищелочной ФЭУ [12] – устройство, эффективно конвертирующее УФ-фотоны в электрический ток. Каждый фотон, попадая на вход ФЭУ (фотокатод), может с вероятностью примерно 20% (квантовая эффективность) выбить 1 электрон, который также называют фотоэлектроном. Далее фотоэлектрон в стеклянном баллоне ФЭУ (внутри которого создан высокий вакуум, необходимый для свободного движения электронов) попадает в диодную систему. Ускоренный сильным электрическим полем, он ударяется об очередную диод и в результате вторичной

электронной эмиссии выбивает из него 3-5 вторичных электронов. Они, в свою очередь, снова ускоряются и устремляются к следующему диноду, образуя нарастающую от динода к диноду электронную лавину. Форма и расположение динодов подобраны для эффективного ускорения и фокусировки вторичных электронов. Коэффициент усиления оказывается порядка $\sim 10^6$ – такое количество электронов в импульсе на аноде приходится на каждый выбитый фотоэлектрон.

На выходе канала формируется аналоговый сигнал в виде меняющегося во времени напряжения $U(T)$. Оцифровка сигнала осуществляется в десятиразрядном аналого-цифровом преобразователе (АЦП). АЦП оцифровывает аналоговый сигнал $U(T)$ линейным способом: минимальное значение напряжения (0 В) соответствует минимальному значению кода АЦП – “0000000000”₂ = 0, максимальное значение (примерно 2 В) – коду “1111111111”₂ = $2^{10} - 1 = 1023$. Оцифровка происходит не непрерывно во времени, а лишь в дискретные интервалы времени длительностью $\tau = 800$ нс. (Иногда это время называют интервалом дискретизации во времени, иногда – особенно в англоязычной литературе – GTU, gate time unit.) Таким образом, на выходе АЦП мы имеем сигнал дискретный как во времени, так и по значению – A_k , где k – номер временного интервала (такта), $T_k = k\tau$. Длительность временной развертки, записываемой в память детектора TUS, составляет 256 тактов, т.е. $\Delta T = 256 \cdot \tau = 204,8$ мкс.

Обратим внимание на то, что термин сигнал в нашем случае может иметь совершенно разное значение в зависимости от того, на каком этапе обработки информации в детекторе мы находимся. Это может быть физический сигнал УФ-свечения ШАЛ, характеризующийся интенсивностью $I(T)$, аналоговый сигнал $U(T)$ или оцифрованный сигнал A_k . Все эти три сигнала связаны друг с другом. В так называемом режиме постоянного тока² $U(T) \sim pG \cdot I(T)$, где G – коэффициент усиления ФЭУ, а p – квантовая эффективность фотокатода ($p \approx 0,2$). Цифровой

²Характерное время изменения кривой свечения, 10-15 мкс, заметно больше как длительности такта, 800 нс, так и временной постоянной RC-цепочки на аноде, 600 нс. Так что такой сигнал можно считать квази-постоянным.

код АЦП связан с аналоговым сигналом также пропорциональным образом, $A \sim U$. Следовательно, мы имеем пропорциональную зависимость и между физическим сигналом $I(T_k)$ и измеренным A_k . Коэффициент пропорциональности между этими величинами будем называть чувствительностью канала (англ. – sensitivity): $A_k = s \cdot I(T_k)$. Знание чувствительностей необходимо для интерпретации полученных данных: как для вычисления собственно интенсивности свечения изучаемого физического явления, так и для сравнения сигналов в различных каналах с целью воссоздания целостной пространственно-временной картины явления.

Что касается оптической системы детектора, она неидеальна. Формируемое оптикой изображение оказывается сложным по форме, и трек события представляет собой “толстую” траекторию, захватывающую каждое мгновение не один, а целую совокупность рядом расположенных пикселей. Форма изображения – распределение сфокусированной энергии по фокальной поверхности – в оптике получила название функции рассеяния точки, ФРТ (по англ. point spread function, PSF). Таким образом, в нашем случае речь идет о ситуации, когда характерный размер ФРТ заметно превышает размер отдельного пикселя.

Кроме того, напомним, что в виду чрезвычайной слабости регистрируемого сигнала (особенно с учетом больших расстояний между спутником и излучающим объектом) в детекторе используются высокочувствительные сенсоры типа ФЭУ. При этом размер пикселя оказывается достаточно большим и даже при очень хорошей оптике (размер ФРТ меньше размера пикселя), сигнал будет находиться в пикселе в течение некоторого интервала времени – и можно либо интегрировать его за весь этот интервал, теряя тем самым часть информации о динамике объекта, либо регистрировать меняющийся во времени сигнал внутри пикселя.

Таким образом, при обработке данных, зарегистрированных детектором TUS, мы сталкиваемся с ситуацией, когда в каждый момент времени GTU сработавшими являются сразу несколько пикселей, причем сигнал в каждом из них длится в течение нескольких GTU, т.е. данные представимы в виде совокупности набор пикселей – набор разверток. Реконструкция параметров исходного объекта по таким данным представляет

собой нетривиальную задачу.

2 Реконструкция направления прихода модельных событий

2.1 Постановка задачи реконструкции направления прихода

Перемещение точечного источника излучения в поле зрения детектора можно разложить на движение в плоскости, перпендикулярной лучу зрения, и движение вдоль луча зрения. Движение в плоскости, перпендикулярной лучу зрения, кодируется в виде трека на фокальной плоскости, анализ которого позволяет установить значение азимутального угла ϕ направления прихода частицы КЛ ПВЭ. Анализ движения вдоль луча зрения может быть проведен только с учетом временной зависимости перемещения изображения – тайминга. Тайминг позволяет оценить угловую скорость ω перемещения источника, которая непосредственно связана с зенитным углом θ направления прихода:

$$\omega = \frac{v}{R} \frac{\sin \beta}{1 + \frac{v}{c} \cos \beta}, \quad (1)$$

где β – угол между направлением движения частицы и лучом зрения (при наблюдении в надир он совпадает с зенитным углом). Здесь R – расстояние от детектора до точки излучения, v и c – скорость движущегося светящегося объекта и света соответственно, в случае ШАЛ они фактически совпадают, $v = c = 0,3$ км/мкс. (Заметим, что в этом случае последний множитель в (1) равен $\tan \beta/2$.) Высота максимума свечения ШАЛ интересующих нас энергий ($\sim 10^{20}$ эВ) лежит в интервале 5-15 км, поэтому с учетом узкого поля зрения детектора ($\leq 5^\circ$) ошибка в определении R при высоте орбиты спутника $H = 500$ км в этом случае будет не больше 1–2% (и при расчете угловой скорости ею можно пренебречь).

При реконструкции удобнее рассчитывать не угловую, а линейную скорость перемещения изображения u , которые связаны друг с другом следующим образом:

$$u = \omega \cdot f,$$

где $f = 1500$ мм – фокусное расстояние зеркала.

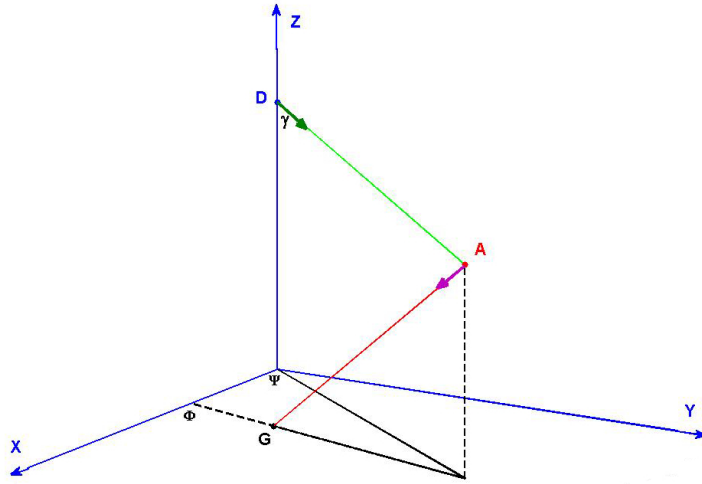


Рис. 1: Определение местной системы координат XYZ (с осью Z, направленной в зенит), луча зрения (зеленый), траектории частицы (красный), и углов ϕ , Ψ , β (пояснения в тексте). A – текущее положение частицы (“точка излучения”), D – положение детектора, γ – полевой угол.

Для того, чтобы получить выражение зенитного угла θ через скорость u , введем систему координат XYZ, связанную со спутником: ось Z направлена вертикально вверх, плоскость XY – горизонтальная, причем ось X направлена в сторону движения спутника³. В этой системе координат единичные вектора вдоль направления движения объекта и вдоль луча зрения (см. рис. 1) представлены следующим образом:

$$\vec{n} = \{-\sin \theta \cos \phi, -\sin \theta \sin \phi, -\cos \theta\},$$

$$\vec{s} = \{\sin \gamma \cos \Psi, \sin \gamma \sin \Psi, -\cos \gamma\},$$

где Ψ – азимутальный угол луча зрения. Если обозначить $\delta\phi = \phi - \Psi$ угол между проекциями на земную поверхность (плоскость XY) трека частицы и луча зрения, то

$$\cos \beta = \cos \gamma \cos \theta - \cos(\delta\phi) \sin \gamma \sin \theta. \quad (2)$$

Решая полученную систему уравнений (1) и (2) для случая $v = c$ (т.е.

³В принципе, ось X можно ориентировать в горизонтальной плоскости любым способом, например, вдоль меридиана – тогда ϕ является азимутальным углом в местных географических координатах. Важно лишь, чтобы существовал пересчет от координат XYZ к галактическим координатам (для анализа возможных источников) и к координатам в плоскости фотоприемника xy .

ультрарелятивистского движения источника), получим итоговые формулы для азимутального и зенитного углов ϕ и θ :

$$\phi = \operatorname{arctg}(u_y/u_x), \quad \theta = 2\operatorname{arctg}(uR/fc) + \gamma \cos(\delta\phi).$$

Второе слагаемое в формуле для θ представляет собой малую поправку, связанную с нецентральной расположением трека. Величина этой поправки находится в пределах от $-\gamma$ до γ и в первом приближении может характеризоваться значением γ_m в точке максимума развития ливня.

Таким образом, реконструируя проекции скорости перемещения изображения по треку u_x и u_y , можно восстановить направление прихода первичной частицы.

2.2 Метод ЛТА

В основе исследуемого в данной работе метода ЛТА (от англ. linear track algorithm) лежит хорошо известный метод наименьших квадратов (МНК), точнее, его обобщение в результате введения весовых коэффициентов. Метод осуществляет минимизацию суммы квадратов отклонений координат отобранных для реконструкции пикселей от теоретической зависимости, описываемой уравнениями равномерного прямолинейного движения:

$$x(t) = x_0 + u_x(t - t_0), \quad y(t) = y_0 + u_y(t - t_0),$$

где (x_0, y_0) – точка трека, соответствующая некоторому моменту времени $t = t_0$.

Предварительный отбор каналов, по которым будет производиться реконструкция, осуществляется при помощи порога q_{sel} (от англ. selection) с целью исключить из реконструкции каналы, сигнал в которых уже неразличим при текущем уровне шума. Подробнее эта задача рассматривается в разделе 2.4.

В итоге для каждого момента времени (такта) $t_k = k\tau$, где τ – интервал дискретизации по времени развертки (в случае работы детектора в режиме ШАЛ $\tau = \text{GTU} = 800$ нс, общее количество тактов – 256), имеем набор координат центров отобранных пикселей x_i и y_i (одинаковый для всех моментов времени t_k).

Далее сигнал каждого отобранного канала (за вычетом базового уровня) аппроксимируется гауссовым, и определяются моменты времени k_1 и k_2 , в которые этот аппроксимированный сигнал первый и последний раз достигает определенного значения. Такое временное окно $k \in [k_1(i), k_2(i)]$ будем называть окном активности, а пороговое значение – порогом активности (о двух вариантах введения порога – абсолютном и относительном – см. далее). Координаты центров пикселей x_i и y_i в МНК будем учитывать столько раз, сколько моментов времени k содержится в окне активности соответствующего i -го канала.

Окно активности позволяет уменьшить влияние на реконструкцию “хвостов” (моментов времени, в которые значение активного сигнала в канале мало), наличие которых приводит к занижению реконструированных значений зенитных углов по сравнению с исходными для базы данных модельных параметрических событий. Это связано с эффективным уменьшением скорости движения изображения по фотоприемнику. Центр пятна как бы притягивается “хвостами”, смещаясь ближе концу трека, если мы рассматриваем начальный момент времени, и, наоборот, смещается ближе к началу трека, если рассматриваем конечный момент времени движения. В результате центр изображения проходит меньшее расстояние за то же самое время (равное длительности 256 тактов).

Переходя к основной части метода ЛТА, требуется минимизировать сумму:

$$\mathcal{E} \equiv \sum_i \sum_{k=k_1(i)}^{k_2(i)} W_i(t_k) (x(t_k) - x_i)^2 = \sum_i \sum_{k=k_1(i)}^{k_2(i)} W_i(t_k) (x_0 + u_x(t_k - t_0) - x_i)^2$$

по параметрам t_0 , x_0 и u_x , и аналогичную сумму для координаты y по параметрам t_0 , y_0 и u_y . Веса $W_i(t_k)$ выбираются пропорциональными значениям сигнала $I_i(t_k)$ в i -м пикселе в момент времени t_k в степени n (по умолчанию $n = 1$) и нормируются: $\sum_i \sum_{k=k_1(i)}^{k_2(i)} W_i(t_k) = 1$.

Проекции скорости u_x, u_y найдем, решая системы уравнений:

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x_0} = 0, \quad \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial u_x} = 0$$

и

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial y_0} = 0, \quad \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial u_y} = 0$$

(параметр t_0 может быть “спрятан”, переопределив x_0, y_0).

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \langle t \rangle &= \sum_i \sum_{k=k_1(i)}^{k_2(i)} W_i(t_k) t_k, & \langle t^2 \rangle &= \sum_i \sum_{k=k_1(i)}^{k_2(i)} W_i(t_k) t_k^2, \\ \langle x \rangle &= \sum_i \sum_{k=k_1(i)}^{k_2(i)} W_i(t_k) x_i, & \langle xt \rangle &= \sum_i \sum_{k=k_1(i)}^{k_2(i)} W_i(t_k) x_i t_k \end{aligned}$$

(и аналогично для y), тогда итоговые формулы для оценки проекций скорости на оси x и y могут быть записаны в виде

$$u_x = \frac{\langle xt \rangle - \langle x \rangle \langle t \rangle}{\langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2}, \quad u_y = \frac{\langle yt \rangle - \langle y \rangle \langle t \rangle}{\langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2}.$$

2.3 Моделирование параметрических событий

Данный раздел посвящен описанию способов формирования баз данных (БД) модельных параметрических событий, используемых при анализе алгоритмов реконструкции, и обладающих основными характерными чертами реально зарегистрированных детектором TUS событий.

БД представляет собой mat-файл среды MATLAB, в котором содержится 4 массива: `Thetas`, `Events0`, `AZs0` и `ZNs0`.

- `Thetas [1, 8, Nev]` – список параметров событий, перечислим их в том порядке, в каком они записаны в массив: координаты X_p и Y_p точки максимума свечения, проекции скоростей u_x и u_y , момент времени максимума T_p , параметр длительности свечения FDHM (от англ. Full Duration at Half Maximum, ширина на полувысоте максимума), интенсивность в максимуме I_p и асимметричность кривой свечения α .⁴

⁴Все линейные размеры на фокальной поверхности измеряются в единицах стороны (квадратного) пикселя a (15 мм), все времена выражаются в тактах, т.е. в отношении к длительности интервала дискретизации по времени τ (800 нс), а скорости – в единицах a/τ .

- `Events0 [DURATION, ID_NBR, Nev]` – список сигналов событий во всех каналах (`ID_NBR = 256`) в каждый момент времени (`DURATION = 256`).
- `AZs0 [1, Nev]` и `ZNs0 [1, Nev]` – списки азимутальных и зенитных углов событий.

БД создается при помощи вызова функции-макроса `Simulation.m`. Размер изображения d_{70} (см. далее) в единицах пикселя и число событий N_{ev} задаются в качестве аргументов макроса, а параметры `Thetas` корректируются уже внутри функции (они могут быть фиксированы, а могут быть равномерно распределены в заданном интервале).

Подробное описание всех БД, которые используются в работе, представлено в приложении А.3.

Рассмотрим процесс моделирования параметрического события. В соответствие с выбранными значениями параметров X_p , Y_p , u_x , u_y и T_p на матрице пикселей проводится трек⁵ излучающего объекта (точнее, его центроида). Пиксели, через которые проходит трек, будем называть трековыми. Их число N_{track} определяется геометрией трека (азимутальный угол) и скоростью источника (зенитный угол). Далее при помощи параметра n_{ring} (число “колец” пикселей вокруг трекового) из трековых формируются так называемые сработавшие пиксели (англ. вариант `hit pixels`), в которых осуществляется генерация сигнала. Сработавшие пиксели включают в себя трековые и n_{ring} “колец” пикселей-соседей, т.е. $N_{hit} > N_{track}$. На рис. 2 изображен трек и отмечены сработавшие пиксели при $n_{ring} = 1$ (числа внутри сработавших пикселей – идентификаторы каналов).

Кривая свечения задается асимметричной гауссовой функцией (“сшитый гаусс” – результат гладкого соединения двух гауссиан в точке максимума) с параметрами ФДНМ, I_p и α . Коэффициент асимметрии α определяется как отношение времени “спада” кривой на полувысоте максимума к времени её “нарастания”. Координаты X_p и Y_p определяют местопо-

⁵Для построения трека выбирается шаг по времени $dT = 1/N_t$, где N_t – число разбиений такта (у нас равно 50). Таким образом, трек содержит $DURATION \cdot N_t = 256 \cdot 50 = 12800$ точек

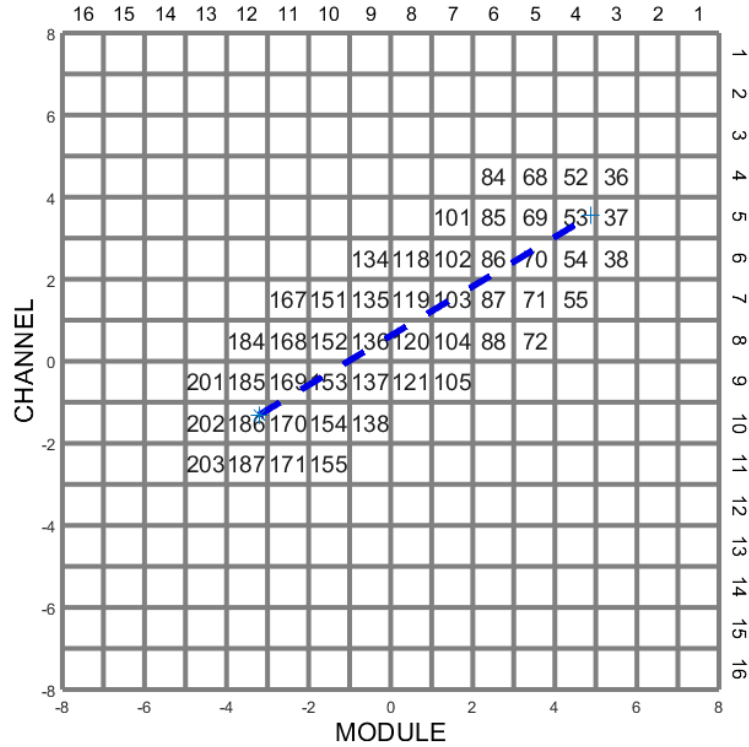


Рис. 2: Пример геометрии события на матрице фотоприемника: трек центра и сработавшие пиксели при $n_{\text{ring}} = 1$.

жение максимума кривой свечения на матрице пикселей фотоприемника.

Процесс генерации активного (не шумового) сигнала в сработавших пикселях осуществляется путем “набрасывания” точек пятна изображения в соответствие с гауссовым распределением с центром в каждой трековой точки. Характерный размер пятна задается с помощью параметра d_{70} – диаметр изображения с суммарной долей энергии 70%.⁶ Доля энергии в канале, определяемая числом точек гауссова пятна, координаты которых попали в пределы пикселя, в дальнейшем умножается на интенсивность кривой свечения в данный момент времени (всего $256 \cdot N_t$ моментов времени). Суммируя полученные значения по моментам времени, входящим в один такт, получаем значение сигнала в канале в данный такт (всего 256 тактов). Таким образом, на данном этапе моделирования имеем в каждом канале id , из числа сработавших, активный сигнал

⁶Заметим, что выбор ранее введенного параметра n_{ring} зависит от диаметра d_{70} : число “колец” должно быть достаточно большим (больше размера ФРТ).

$A_k(\text{id})$, где k – номер одного из 256 временных тактов. На рис. 3 разным цветом представлены активные сигналы модельного параметрического события, по ним можно проследить динамику моделируемого процесса (движение изображения по фотоприемнику).

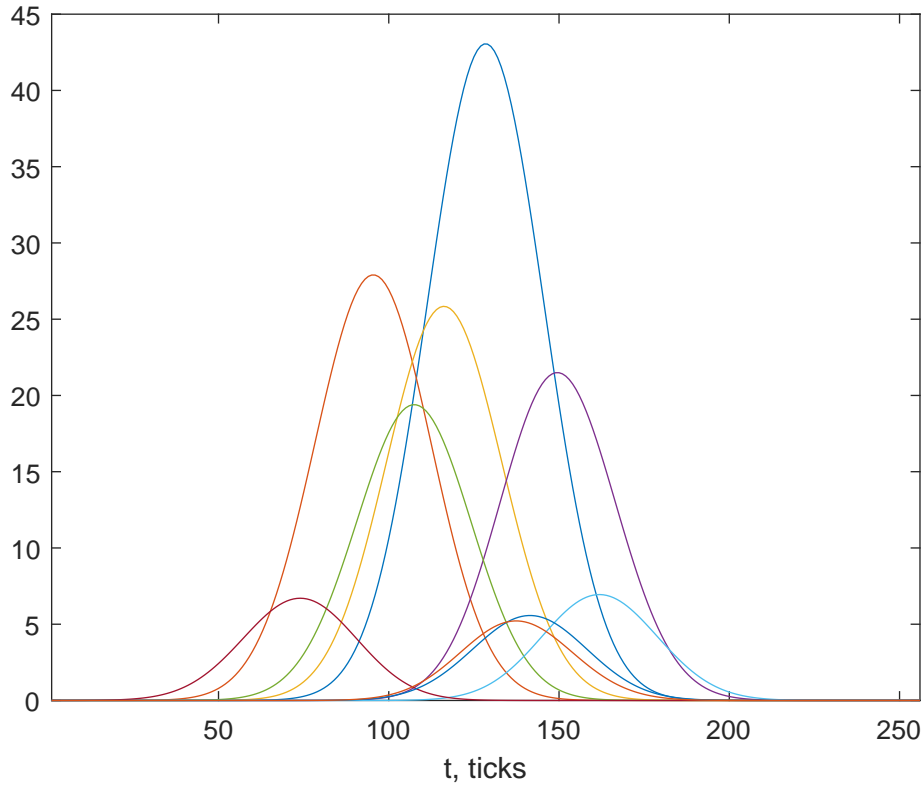


Рис. 3: Активные сигналы модельного параметрического события. Амплитуда кривой свечения (сумма активных сигналов) равна 100 единиц.

В качестве фона к каждому из 256 сигналов добавляется гауссов шум⁷ с некоторым средним значением и стандартным отклонением, которое далее будем обозначать Noise. На рис. 4 представлены фоновый сигнал и зашумленный активный сигнал в одном из сработавших каналов модельного события.

Параметры баз данных могут варьироваться в зависимости от целей исследования, при этом в каждом отдельном численном эксперименте большая часть параметров фиксируется в своих так называемых реперных значениях, а часть – варьируется. В таблице 1 приведены реперные

⁷В разделе 2.8, посвященном изучению зависимости реконструкции от величины шума, дополнительно рассмотрен случай негауссова шума, вызванного флуктуациями кривой свечения. Однако, во всех остальных разделах мы учитывали лишь флуктуации фонового сигнала.

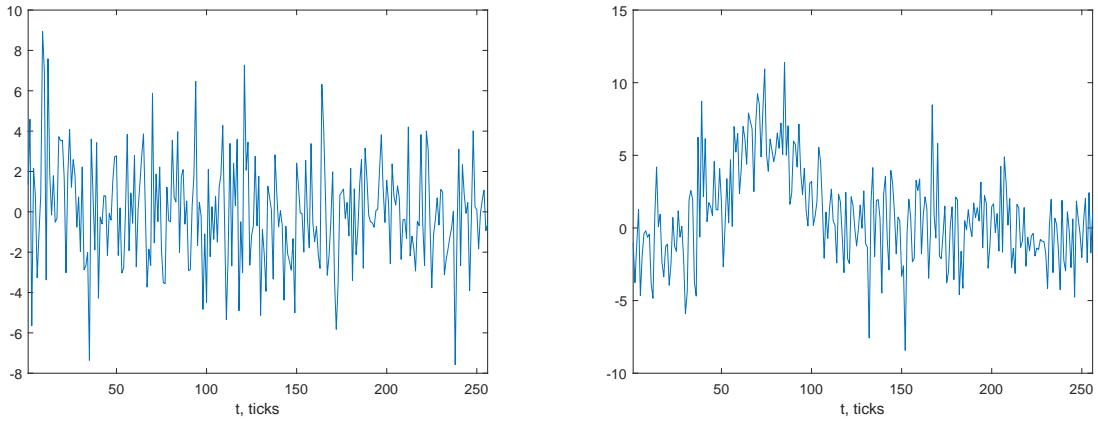


Рис. 4: Фоновый сигнал (гауссов шум, $\text{Noise} = 2.5$) и активный сигнал в одном из сработавших каналов на фоне шума.

значения всех параметров кроме азимутального и зенитного угла (об этом см. далее).

Таблица 1: Реперные значения параметров БД модельных параметрических событий: размер изображения d_{70} , координаты максимума (пика) на фотоприемнике X_p и Y_p , момент времени пика T_p , длительность на полувысоте FDHM амплитуда I_p , асимметричность кривой свечения α и стандартное отклонение шума Noise .

d_{70}	X_p, Y_p	T_p	FDHM	I_p	α	Noise
1.5	Unif[0, 1]	120	70	100	1	2.5

2.4 Задача распознавания образа

Задача распознавания образа заключается в отборе каналов, которые будут использоваться при реконструкции события, сигнал в них должен быть различим при текущем уровне шума. В данной работе для реконструкции модельных событий применялся простейший алгоритм отбора по порогу q_{sel} : сигнал в каналах предварительно сглаживался фильтром скользящего среднего с окном $M = 5$, отбирались каналы, амплитуда сглаженного сигнала в которых оказывалась больше порогового значения. Число так называемых отобранных каналов (от англ. selection) бу-

дем обозначать N_{sel} , $N_{\text{sel}} \leq N_{\text{hit}}$. В данной работе не рассматриваются более сложные алгоритмы распознавания образа, так как сама процедура отбора каналов не является ее целью, а необходима лишь для выделения необходимой для реконструкции информации о событии.

На рис. 5 представлена зависимость $N_{\text{sel}}(q_{\text{sel}})$ на примере двух событий с фиксированным зенитным углом 30° и 60° . Она имеет ступенчатый вид и изменяется в зависимости от направления прихода, а также от события к событию внутри БД с фиксированным направлением прихода. В связи с этим логично анализировать среднее по всем событиям число отобранных каналов $\langle N_{\text{sel}} \rangle$ при данном пороге отбора каналов q_{sel} .

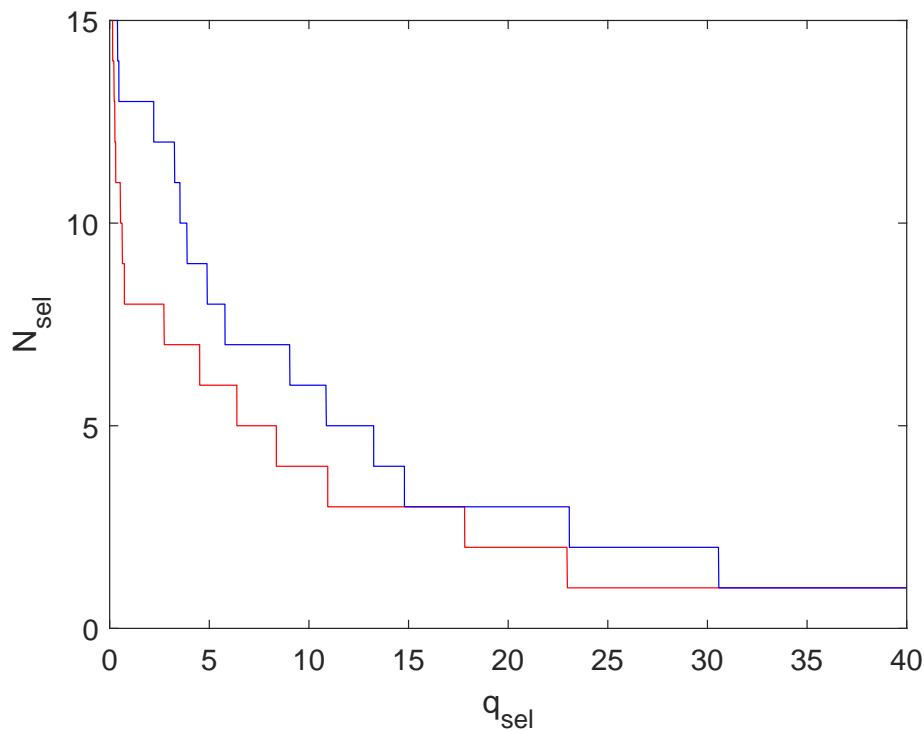


Рис. 5: Зависимость числа отобранных каналов N_{sel} от порога q_{sel} для события из БД с фиксированным зенитным углом 30° (красным) и 60° (синим).

На рис. 6 приведена гистограмма распределения N_{sel} для БД из 500 событий с фиксированными азимутальным и зенитным углами $\phi_0 = 30^\circ$ и $\theta_0 = 60^\circ$ при пороге $q_{\text{sel}} = 4$.

В качестве реперного значения порога отбора каналов везде далее будем использовать $q_{\text{sel}} = 4$. Поясним выбор данного значения, рассмот-

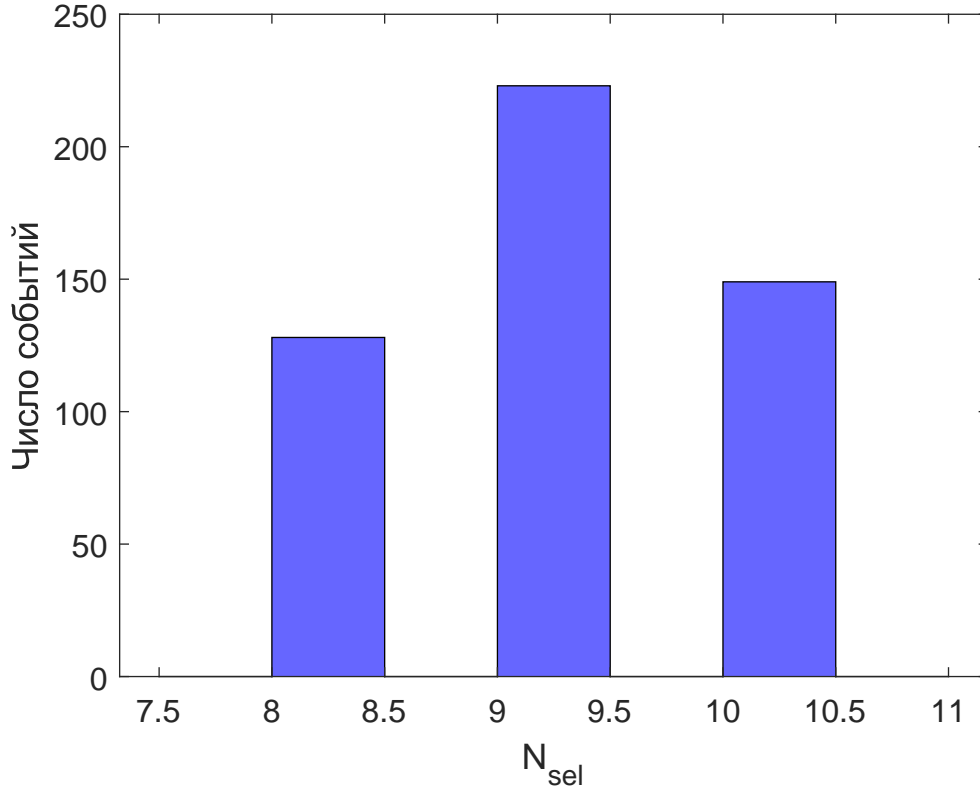


Рис. 6: Гистограмма распределения числа отобранных каналов N_{sel} при $q_{sel} = 4$ для БД из 500 событий с $\phi_0 = 30^\circ$ и $\theta_0 = 60^\circ$. Среднее значение $\langle N_{sel} \rangle = 9.04$, стандартное отклонение $\sigma_{N_{sel}} = 0.74$.

рев случаи малого, среднего и большого шума с $\text{Noise}=2.5, 5$ и 10 соответственно (при амплитуде кривой свечения 100 единиц). Минимальное отношение сигнала к шуму в случае с $\text{Noise}=2.5$ (реперное значение стандартного отклонения шума) составляет $q_{sel} \cdot \frac{\sqrt{M}}{\text{Noise}} = 4 \cdot \frac{\sqrt{5}}{2.5} = 3.6$, что является достаточно надежным критерием наличия активного (не фонового) сигнала в канале.⁸ При $\text{Noise}=5$ и 10 имеем соответственно $4 \cdot \frac{\sqrt{5}}{5} = 1.8$ и $4 \cdot \frac{\sqrt{5}}{10} = 0.9$ – более мягкие критерии отбора.

2.5 Управляющие параметры ЛТА

Рассматриваемый нами алгоритм реконструкции обладает следующей важной особенностью: результат его применения зависит от выбора конкретных значений ряда параметров, которые, по этой причине, будем

⁸Здесь мы учли уменьшение стандартного отклонения шума при сглаживании сигнала с окном $= 5$.

называть управляющими. В первую очередь речь идет о параметре, регулирующем выделение окна активности сигнала в каждом из отобранных каналов. Как уже ранее было отмечено, такое выделение позволяет избавиться от систематического занижения значений зенитного угла. Будем рассматривать два варианта введения данного управляющего параметра. Также в работе в первом приближении будет изучено влияние на реконструкцию показателя степени n , с которым амплитуды сигналов входят в качестве веса в задаче линейной регрессии.

Будем использовать два основных способа графического отображения результатов реконструкции. Основной информацией о методе реконструкции является ошибка – отличие реконструированного параметра от истинного (известного в случае модельного события).

Анализ статистических характеристик результатов реконструкции удобнее всего проводить на так называемых гистограммах ошибок – распределения ошибок $\Delta\phi$, $\Delta\theta$ реконструкции азимутального и зенитного углов для некоторой выбранной БД событий. Основными характеристиками гистограмм ошибок являются смещение и ширина, под которыми будем понимать среднее $\langle\Delta\phi\rangle$, $\langle\Delta\theta\rangle$ (m-функция `mean`) и стандартное отклонение $\sigma_{\Delta\phi}$, $\sigma_{\Delta\theta}$ (`std`) ошибки реконструкции соответствующего угла.

Для исследования зависимости результатов реконструкции от управляющего параметра будем использовать представление в виде графика ошибок, по оси абсцисс которого отложены значения параметра, а по оси ординат – соответствующее смещение и ширина распределения ошибки.

Продемонстрируем эти ключевые для данной работы понятия на примере БД, события в которой имеют равномерно распределенные в 10-градусных бинах азимутальный и зенитный углы, $\phi_0 \sim 30^\circ$ и $\theta_0 \sim 60^\circ$ ⁹, с гауссовым шумом малой амплитуды, `Noise=2.5` и порогом отбора каналов $q_{\text{sel}} = 4$. Общее количество событий в этой БД – 500.

2.5.1 Выделение окна активности

В данной работе рассматривается два варианта ЛТА, различающиеся способом выделения окна активности – путем сравнения с абсолютным

⁹Запись $\theta \sim \alpha$ означает равномерное распределение угла θ в интервале $[\alpha - 5^\circ, \alpha + 5^\circ]$.

и относительным порогом. Абсолютный порог измеряется в тех же единицах, что и величина сигнала, а относительный определяется как доля от максимума сигнала в канале, предварительно аппроксимированного гауссовой функцией. Для удобства введем различные обозначения для этих случаев: q_{abs} (от англ. absolute) для абсолютного порога активности и q_{rel} (от англ. relative) – для относительного.

При реконструкции с помощью абсолютного порога в случае пустого окна активности (сигнал в канале не превышает порог ни в один из моментов времени) канал исключается из реконструкции. В связи с этим количество активных каналов N_{act} , т.е. каналов, в которых выявлен надпороговый сигнал, меньше числа отобранных, $N_{\text{act}} \leq N_{\text{sel}}$. В случае же относительного порога все отобранные каналы дают вклад в реконструкцию, $N_{\text{act}} = N_{\text{sel}}$.

На рис. 7 приведены графики ошибок углов в зависимости от N_{sel} при некоторых фиксированных значениях порогов активности ($q_{\text{abs}} = 2 \cdot \text{Noise} = 5$ и $q_{\text{rel}} = 0.2$ – пока выбрано произвольное значение). Ширина ошибок ожидаемо уменьшается с ростом числа отобранных каналов. Отсутствие изменений на графике ошибок в случае реконструкции абсолютным порогом при больших N_{sel} свидетельствует о том, что число активных каналов N_{act} становится меньше числа отобранных N_{sel} , чего не наблюдается при реконструкции относительным порогом.

2.5.2 Абсолютный порог

Остановимся подробнее на реконструкции методом ЛТА с использованием абсолютного порога активности. Построим характерные гистограммы ошибок при фиксированном управляющем параметре и графики ошибок в зависимости от абсолютного порога активности.

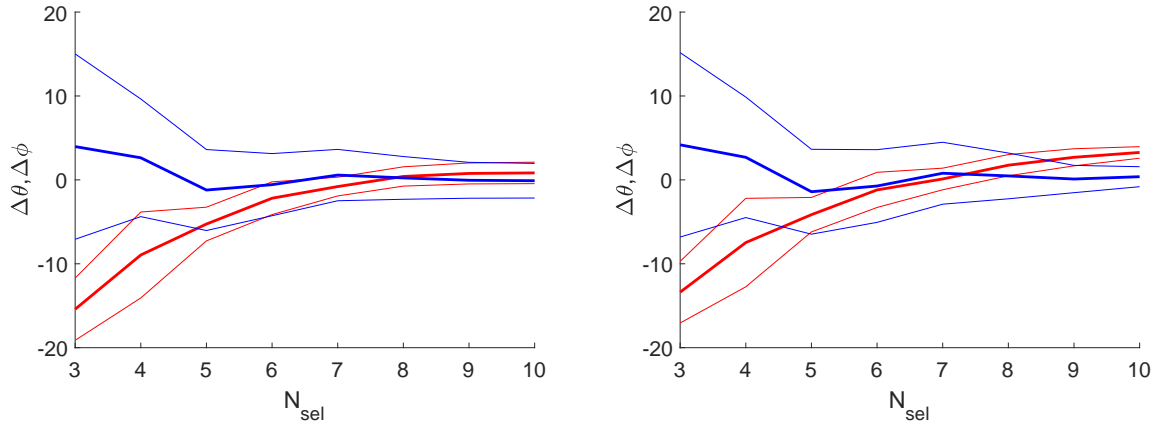


Рис. 7: Графики ошибок азимутального (синим) и зенитного (красным) углов в зависимости от N_{sel} в случае абсолютного порога активности $q_{\text{abs}} = 5$ (слева) и относительного порога $q_{\text{rel}} = 0.2$ (справа) ($\phi_0 = 30^\circ$, $\theta_0 = 60^\circ$, Noise=2.5).

На рис. 8 приведены гистограммы ошибок при $q_{\text{abs}} = 5$. Смещение и ширина распределения ошибок азимутального и зенитного углов соответственно равны:

$$\langle \Delta\phi \rangle = -0.31^\circ, \sigma_{\Delta\phi} = 2.37^\circ \text{ и } \langle \Delta\theta \rangle = -0.12^\circ, \sigma_{\Delta\theta} = 1.43^\circ.$$

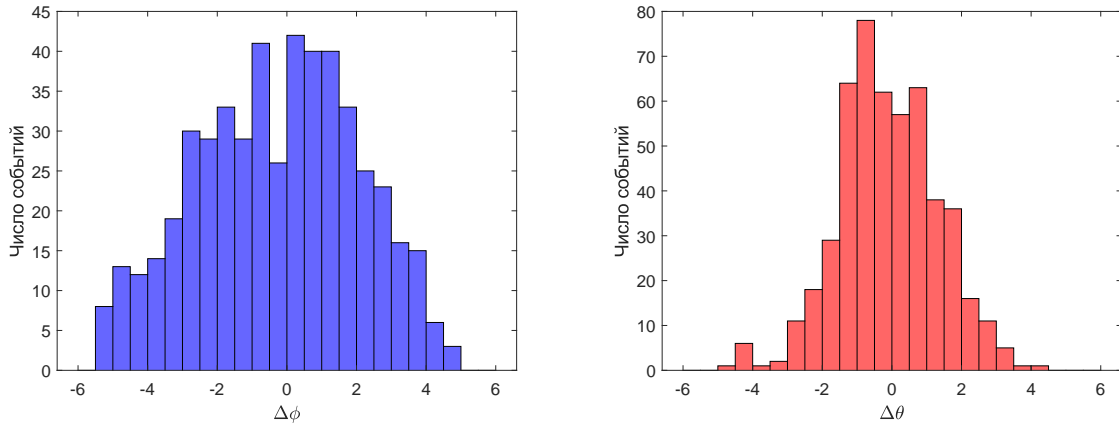


Рис. 8: Гистограммы ошибок азимутального (слева) и зенитного (справа) углов при фиксированном абсолютном пороге активности $q_{\text{abs}} = 5$ ($\phi_0 \sim 30^\circ$, $\theta_0 \sim 60^\circ$, Noise=2.5, $q_{\text{sel}} = 4$).

Более полное представление дают графики ошибок, представленные на рис. 9. Наблюдаем предсказанное занижение среднего значения ошибки зенитного угла при малых порогах, как если бы мы вообще не вводили окно активности. При увеличении абсолютного порога вышеупомянутое

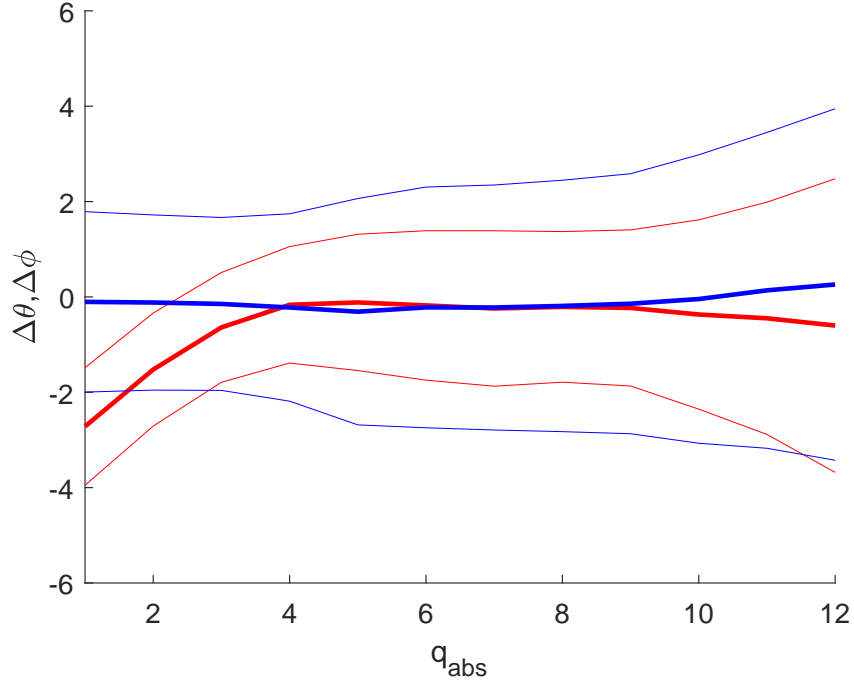


Рис. 9: Графики ошибок азимутального (синим) и зенитного (красным) углов в зависимости от абсолютного порога активности ($\phi_0 \sim 30^\circ$, $\theta_0 \sim 60^\circ$, Noise=2.5, $q_{\text{sel}} = 4$).

среднее значение выходит на плато вблизи нуля. Значение порога q_{abs}^* , при котором это происходит впервые, будем называть оптимальным.

Обратим внимание на увеличение ширины ошибок углов при увеличении абсолютного порога активности. Это связано с уменьшением числа активных каналов N_{act} , которые используются при реконструкции. То есть точность метода снижается при уменьшении количества используемой информации.

2.5.3 Относительный порог

Проведем аналогичное исследование для реконструкции методом LTA с использованием относительного порога активности.

Гистограммы ошибок при фиксированном относительном пороге $q_{\text{rel}} = 0.2$ представлены на рис. 10. Смещение и ширина распределения ошибок азимутального и зенитного углов соответственно равны:

$$\langle \Delta\phi \rangle = -0.09^\circ, \sigma_{\Delta\phi} = 1.94^\circ \text{ и } \langle \Delta\theta \rangle = 1.70^\circ, \sigma_{\Delta\theta} = 1.18^\circ.$$

Точность реконструкции улучшилась по сравнению с вариантом аб-

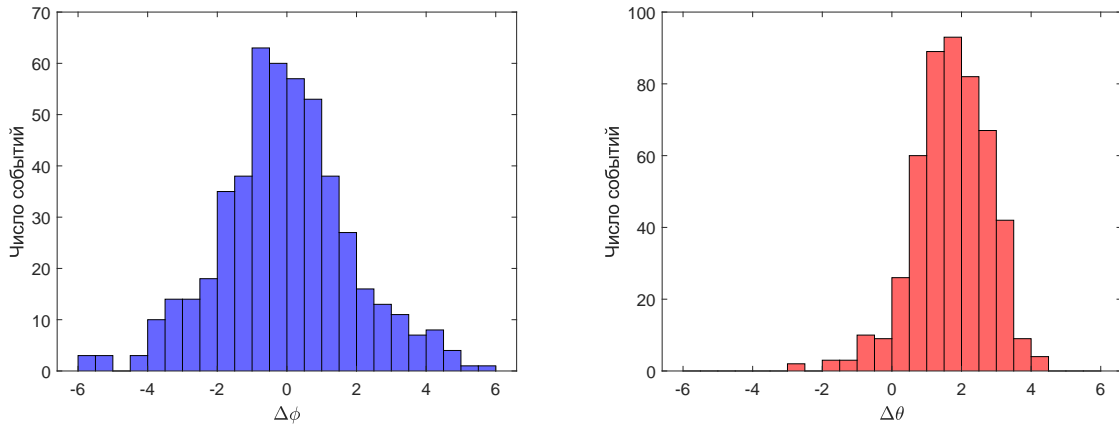


Рис. 10: Гистограммы ошибок азимутального (слева) и зенитного (справа) углов при фиксированном относительном пороге активности $q_{\text{rel}} = 0.2$ ($\phi_0 \sim 30^\circ$, $\theta_0 \sim 60^\circ$, Noise=2.5, $q_{\text{sel}} = 4$).

солютного порога. Однако обращает на себя внимание значительное увеличение смещения зенитного угла. Это свидетельствует о сильной зависимости результатов реконструкции от выбора величины относительного порога q_{rel} , т.е. о существовании оптимального значения.

Графики ошибок, представленные на рис. 11, подтверждают высказанное предположение. Среднее значение ошибки зенитного угла всюду увеличивается с увеличением относительного порога. Значение q_{rel}^* , при котором вышеупомянутое среднее пересекает ноль, будем называть оптимальным.

Занижение среднего значения реконструированных зенитных углов при малых относительных порогах объясняется тем же, чем и в случае реконструкции абсолютным порогом. Поясним, в свою очередь, причину возрастания ошибки зенитного угла при больших относительных порогах.

Напомним, что изображение на ФП точечного источника имеет размер (пятно). В результате есть более достоверные пиксели, через которые прошел центр пятна, а есть такие, которые лишь задеты его краем. Достоверность пикселя будет пропорциональна длительности сигнала в нем (количеству временных тактов). Уменьшая окно активности, мы теряем информацию о том, сколько времени сигнал провел в канале, поэтому ошибка зенитного угла растет. Данный эффект не наблюдается при уве-

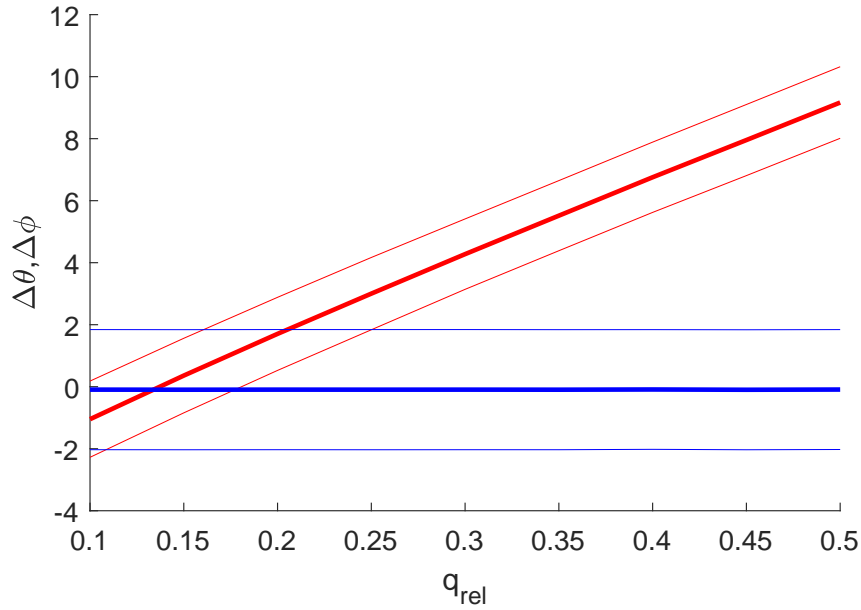


Рис. 11: Графики ошибок азимутального (синим) и зенитного (красным) углов в зависимости от относительного порога активности ($\phi_0 \sim 30^\circ$, $\theta_0 \sim 60^\circ$, Noise=2.5, $q_{sel} = 4$).

личении абсолютного порога активности, потому что пиксели, задетые краем пятна и вносящие ошибку, исключаются из реконструкции, так как сигнал в них достаточно слабый, т.е. они не входят в число активных каналов N_{act} .

Отметим однако, что метод ЛТА, использующий относительный порог активности, обладает высокой стабильностью с точки зрения ширины распределения ошибок, в отличие от варианта абсолютного порога.

2.5.4 Показатель степени веса n

Показатель степени веса также является управляющим параметром метода. В данной работе принято его фиксированное значение $n = 1$. Покажем, что меньшие значения данного управляющего параметра приводят к уширению гистограмм ошибок, большие значения – к их небольшому сужению.

В таблицах 2 и 3 приведены средние значения ошибок углов и их стандартные отклонения для случаев $n = 0.5$, 1.0 и 2.0 при абсолютном

пороге $q_{\text{abs}} = 5$ и при относительном пороге $q_{\text{rel}} = 0.14$ соответственно.¹⁰

Несмотря на небольшое улучшение точности реконструкции при показателе степени веса $n = 2$, мы для простоты будем использовать значение $n = 1$. Данный раздел приводим лишь в качестве демонстрации существования такого дополнительного управляющего параметра, как степень веса.

Таблица 2: Средние значения ошибок азимутального и зенитного углов и их стандартные отклонения для случаев $n = 0.5, 1.0$ и 2.0 при абсолютном пороге активности $q_{\text{abs}} = 5$.

n	$\langle \Delta\phi \rangle, ^\circ$	$\sigma_{\Delta\phi}, ^\circ$	$\langle \Delta\theta \rangle, ^\circ$	$\sigma_{\Delta\theta}, ^\circ$
0.5	-0.37	3.56	-0.07	2.13
1.0	-0.22	2.30	-0.02	1.45
2.0	-0.06	1.70	0.06	0.95

Таблица 3: Средние значения ошибок азимутального и зенитного углов и их стандартные отклонения для случаев $n = 0.5, 1.0$ и 2.0 при относительном пороге активности $q_{\text{rel}} = 0.14$.

n	$\langle \Delta\phi \rangle, ^\circ$	$\sigma_{\Delta\phi}, ^\circ$	$\langle \Delta\theta \rangle, ^\circ$	$\sigma_{\Delta\theta}, ^\circ$
0.5	-0.15	3.03	-0.18	1.69
1.0	-0.10	1.92	0.20	1.13
2.0	-0.07	1.74	0.23	0.94

2.6 ЛТА-реконструкция: зависимость от азимутального угла

На примере БД с фиксированным бином азимутального угла (размером 10°) исследуем характер зависимости точности реконструкции от абсолютного и относительного порогов активности. В данном разделе мы

¹⁰Значение $q_{\text{rel}} = 0.14$ выбрано как оптимальное, исходя из полученного в предыдущем разделе графика ошибок в зависимости от относительного порога.

ограничились рассмотрением одного-единственного значения бина зенитного угла $\theta_0 \sim 60^\circ$, зафиксировали порог отбора каналов $q_{\text{sel}} = 4$ и малый уровень шума с $\text{Noise} = 2.5$.

На рис. 12 представлены графики ошибок в зависимости от абсолютного и относительного порогов активности для различных бинов азимутального угла. Для обоих вариантов реконструкции оптимальные значения порогов активности сохраняются при всех азимутальных углах и составляют $q_{\text{rel}}^* \approx 0.14$ и $q_{\text{abs}}^* \approx 4$.

Средние значения и стандартные отклонения ошибок углов при реконструкции с оптимальными параметрами $q_{\text{abs}}^* = 4$ и $q_{\text{rel}}^* = 0.14$ представлены в таблицах 4 и 5, соответственно.¹¹ Видим, что ширина ошибок углов может незначительно варьироваться в зависимости от азимутального угла.

Для усреднения эффектов, связанных с выбором азимутального угла трека, удобно сравнивать результаты реконструкции, полученные на БД, в которых азимутальный угол распределен равномерно от -180° до $+180^\circ$. Так как результаты реконструкции могут сильно изменяться в зависимости от зенитного угла, зафиксируем его в 10-градусном бине $\theta_0 \sim 60^\circ$. Такую БД будем далее использовать в качестве “реперной”.

На рис. 13 представлены результаты реконструкции реперной БД. Минимум смещения ошибки зенитного угла по-прежнему наблюдается при $q_{\text{abs}}^* = 4$ и $q_{\text{rel}}^* = 0.14$. Соответствующие количественные характеристики распределения ошибок для этих оптимальных значений приведены в нижней строке таблиц 4 и 5.

Можем сформулировать два следующих вывода. Во-первых, точность реконструкции может изменяться в зависимости от азимутального угла, но незначительно. Во-вторых, оптимальные значения управляющих параметров q_{abs}^* и q_{rel}^* не зависят от азимутального угла.

¹¹Значения абсолютного и относительного порогов активности 4 и 0.14 выбраны из дискретного множества перебираемых значений управляющих параметров как наиболее близкие к оптимальным.

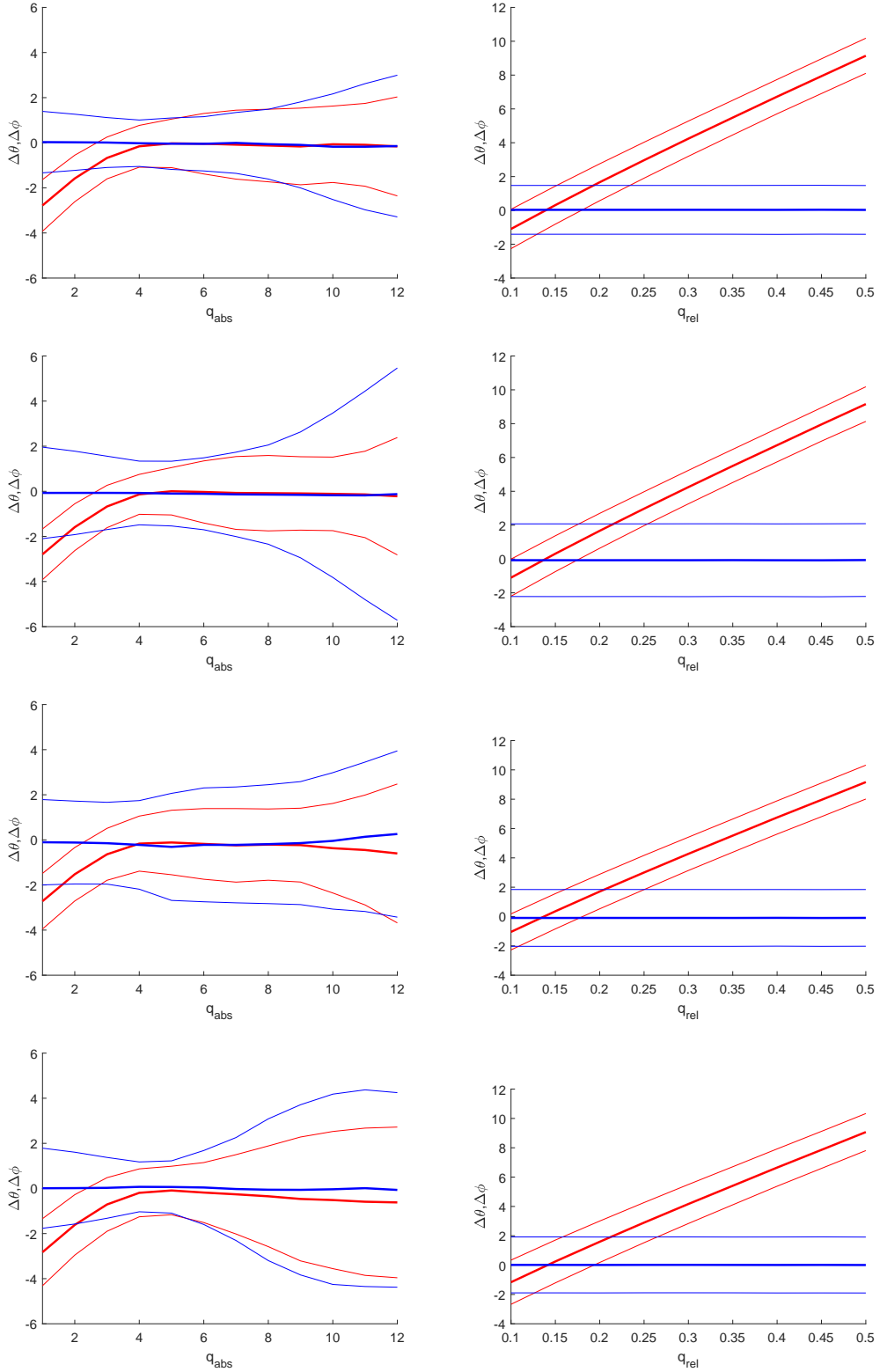


Рис. 12: Графики ошибок азимутального (синим) и зенитного (красным) углов в зависимости от абсолютного (слева) и относительного порога (справа) для различных бинов азимутального угла: $\phi_0 \sim 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ (сверху вниз), $\theta_0 \sim 60^\circ$ ($q_{sel} = 4$, Noise = 2.5).

Таблица 4: Средние значения и стандартные отклонения ошибок азимутального и зенитного углов при реконструкции с абсолютным порогом $q_{\text{abs}} = 4$ для различных бинов азимутального угла.

ϕ	$\langle \Delta\phi \rangle, ^\circ$	$\sigma_{\Delta\phi}, ^\circ$	$\langle \Delta\theta \rangle, ^\circ$	$\sigma_{\Delta\theta}, ^\circ$
$\sim 0^\circ$	-0.02	1.03	-0.16	0.93
$\sim 15^\circ$	-0.07	1.41	-0.13	0.88
$\sim 30^\circ$	-0.22	1.96	-0.17	1.22
$\sim 45^\circ$	0.07	1.10	-0.19	1.06
Unif	0.03	1.49	-0.09	1.01

Таблица 5: Средние значения и стандартные отклонения ошибок азимутального и зенитного углов при реконструкции с относительным порогом $q_{\text{rel}} = 0.14$ для различных бинов азимутального угла.

ϕ	$\langle \Delta\phi \rangle, ^\circ$	$\sigma_{\Delta\phi}, ^\circ$	$\langle \Delta\theta \rangle, ^\circ$	$\sigma_{\Delta\theta}, ^\circ$
$\sim 0^\circ$	0.03	1.43	0.11	1.10
$\sim 15^\circ$	-0.12	2.12	0.10	1.05
$\sim 30^\circ$	-0.10	1.92	0.20	1.13
$\sim 45^\circ$	-0.05	1.92	0.10	1.32
Unif	0.00	1.91	-0.01	1.09

2.7 LTA-реконструкция: зависимость от зенитного угла

В данном разделе на примере БД с фиксированным бином зенитного угла исследуется характер зависимости точности реконструкции от абсолютного и относительного порогов активности во всем диапазоне изменений наклона ливня. При этом азимутальный угол равномерно распределен по всему диапазону возможных значений $[-180^\circ, 180^\circ]$. Порог отбора каналов и уровень шума выбраны такими же как в предыдущем разделе ($q_{\text{sel}} = 4$, $\text{Noise} = 2.5$).

На рис. 14 представлены графики ошибок в зависимости от абсолютного и относительного порогов активности для различных бинов зенитного угла, ср. с аналогичными результатами для $\theta_0 \sim 60^\circ$ на рис. 13.

Ранее найденные оптимальные значения управляющих параметров

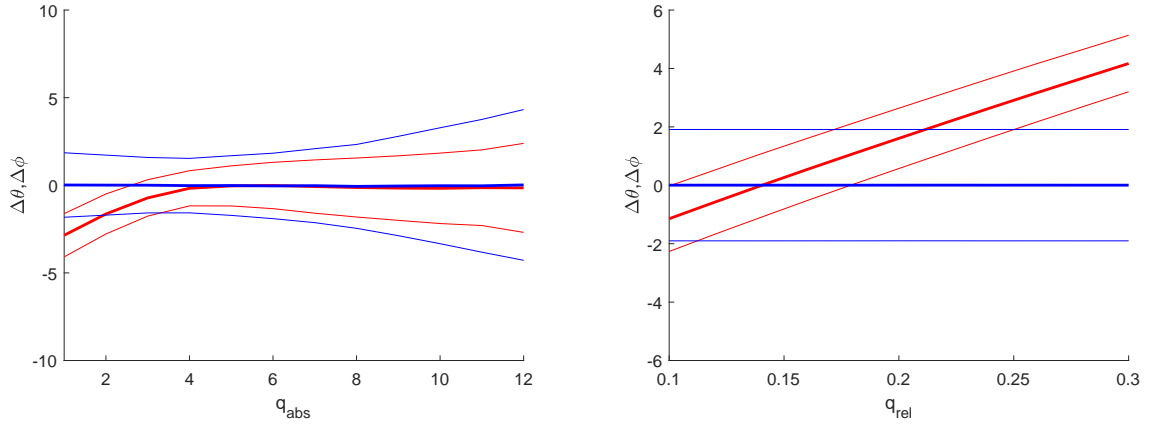


Рис. 13: Графики ошибок азимутального (синим) и зенитного (красным) углов в зависимости от абсолютного (слева) и относительного порога (справа) для реперной БД с $\phi_0 \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$ и $\theta_0 \sim 60^\circ$ ($q_{\text{sel}} = 4$, $\text{Noise} = 2.5$).

$q_{\text{abs}}^* = 4$ и $q_{\text{rel}}^* = 0.14$ наблюдаются также для всех бинов зенитного угла, за исключением случая больших углов $\theta \sim 75^\circ$. В этом случае абсолютный порог, при котором среднее значение ошибки зенитного угла достигает нуля, оказывается больше, чем при всех других углах. Это связано с тем, что с увеличением зенитного угла, возрастает число реально сработавших каналов. А так как при реконструкции с использованием абсолютного порога происходит отсеивание слабых каналов, вносящих ошибку в реконструкцию, то для достижения оптимального числа активных каналов, требуется больший порог q_{abs}^* . Так или иначе, при ранее выбранных $q_{\text{abs}}^* = 4$ и $q_{\text{rel}}^* = 0.14$ смещение не будет превышать двух градусов, и мы всегда можем подстраховаться и выбрать большее значение абсолютного порога, проиграв немного в точности (напомним, что ширина ошибки растет с увеличением абсолютного порога).

В отличие от результатов, полученных для различных азимутальных углов, ширина ошибок сильно зависит от бина зенитного угла и является максимальной при малых углах и минимальной при больших. Средние значения и стандартные отклонения ошибок углов при реконструкции с параметрами $q_{\text{abs}}^* = 4$ и $q_{\text{rel}}^* = 0.14$ представлены в таблицах 6 и 7 соответственно.

Таким образом, точность реконструкции сильно зависит от зенитного

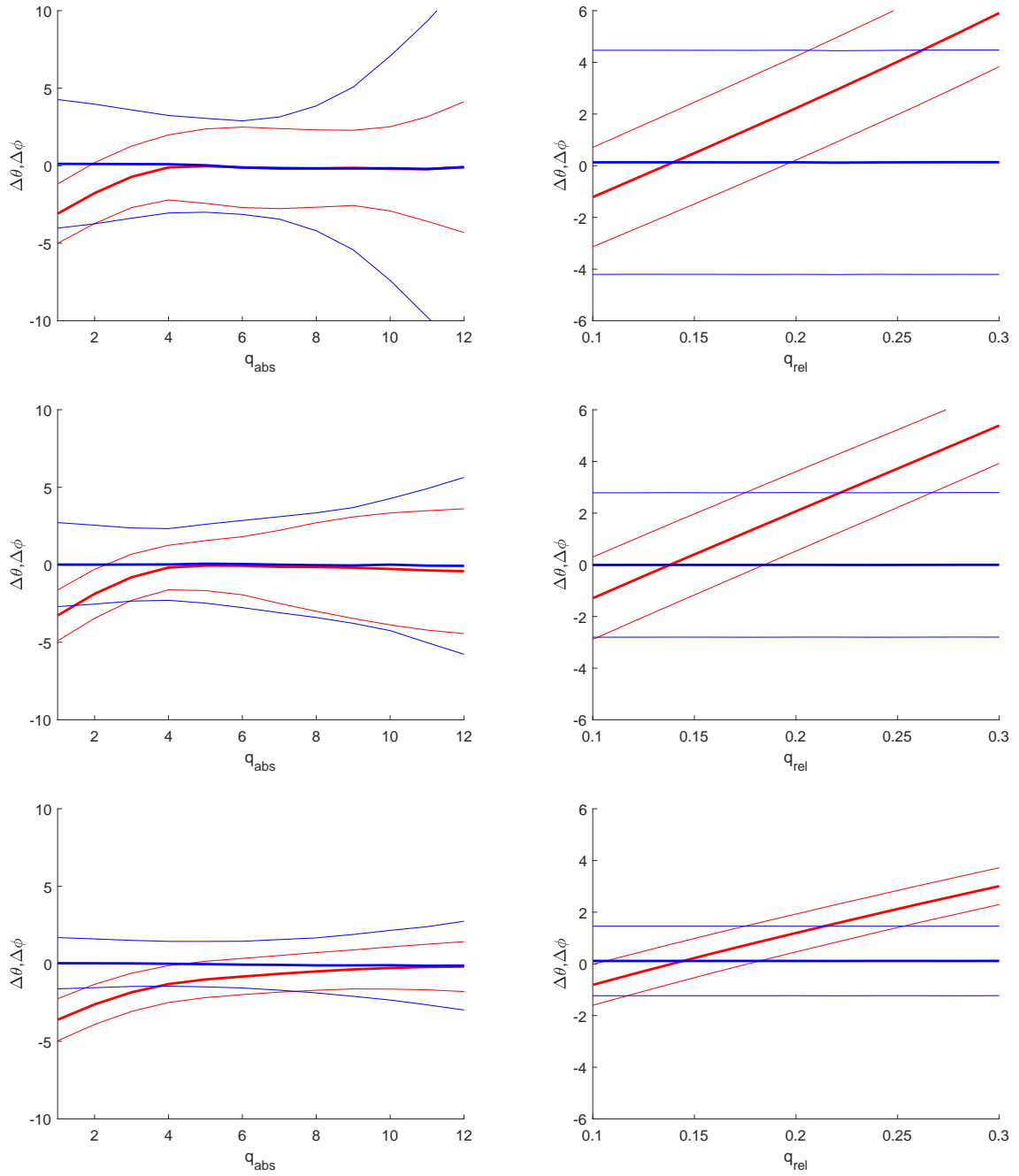


Рис. 14: Графики ошибок азимутального (синим) и зенитного (красным) углов в зависимости от абсолютного (слева) и относительного порога (справа) для различных бинов зенитного угла: $\theta_0 \sim 30^\circ, 45^\circ, 75^\circ$ (сверху вниз), $\phi_0 \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$ ($q_{\text{sel}} = 4$, $\text{Noise} = 2.5$).

угла, оптимальные же значения управляющих параметров q_{abs}^* и q_{rel}^* не зависят от зенитного угла.

Таблица 6: Средние значения и стандартные отклонения ошибок азимутального и зенитного углов при реконструкции с абсолютным порогом $q_{\text{abs}} = 4$ для различных бинов зенитного угла.

θ	$\langle\Delta\phi\rangle,^\circ$	$\sigma_{\Delta\phi},^\circ$	$\langle\Delta\theta\rangle,^\circ$	$\sigma_{\Delta\theta},^\circ$
$\sim 30^\circ$	0.10	3.15	-0.11	2.10
$\sim 45^\circ$	0.02	2.31	-0.18	1.44
$\sim 60^\circ$	0.03	1.49	-0.09	1.01
$\sim 75^\circ$	0.01	1.44	-1.30	1.19

Таблица 7: Средние значения и стандартные отклонения ошибок азимутального и зенитного углов при реконструкции с относительным порогом $q_{\text{rel}} = 0.14$ для различных бинов зенитного угла.

θ	$\langle\Delta\phi\rangle,^\circ$	$\sigma_{\Delta\phi},^\circ$	$\langle\Delta\theta\rangle,^\circ$	$\sigma_{\Delta\theta},^\circ$
$\sim 30^\circ$	0.13	4.33	0.15	1.96
$\sim 45^\circ$	0.00	2.79	0.07	1.57
$\sim 60^\circ$	0.00	1.91	-0.01	1.09
$\sim 75^\circ$	0.11	1.35	0.02	0.76

2.8 ЛТА-реконструкция: зависимость от величины шума

В данном разделе исследуется зависимость точности реконструкции от величины шума. Показывается степень деградации (ухудшения) точности при переходе к событиям на сильно зашумленном фоне. Исследуется поведение оптимальных значений управляющих параметров метода при увеличении величины шума. И в качестве дополнения рассматривается случай негауссового шума в виде флуктуаций активного сигнала, распределенных по Пуассону.

2.8.1 Гауссов шум

Напомним, что при моделировании к незашумленному сигналу (кривой свечения) добавлялся гауссов шум, характеризующийся некоторым средним значением и стандартным отклонением Noise.

Для исследования зависимости реконструкции от величины шума будем использовать шум со стандартными отклонениями $\text{Noise}=2.5, 5$ и 10 при амплитуде суммарного сигнала 100 единиц, что соответствует случаям малого, среднего и большого шума. Реконструируем реперную БД. Порог отбора каналов выбран стандартным $q_{\text{sel}} = 4$.

На рис. 15 представлены графики ошибок в зависимости от порогов активности при увеличенном шуме. Можно наблюдать смещение оптимальных значений управляющих параметров (ср. с рис. 13 при малом шуме с $\text{Noise}=2.5$). Новые оптимальные значения приведены в табл. 9 (см. $q_{\text{sel}} = 4$).

В табл. 9 также продемонстрировано увеличение ширины ошибок углов при переходе к большим шумам.

2.8.2 Негауссов шум

Ранее мы учитывали лишь флуктуации фонового сигнала, но не кривой свечения. В действительности сигнал, снимаемый с выхода детектора, флуктуирует также в результате происходящих в детекторе вероятностных процессов.

После поступления фотонов УФ-излучения во входное окно канала фотоприемника на фотокатоде с некоторой вероятностью (квантовая эффективность фотокатода $p = 0.20$) происходит выбивание фотоэлектронов, которые, попадая в диодную систему ФЭУ, размножаются и формируют импульс анодного тока на входе интегрирующей RC-цепочки. Проинтегрированный аналоговый сигнал уже преобразуется в соответствующий цифровой сигнал – код АЦП $\mathcal{A}(T)$. В силу того, что считывание сигнала происходит с определенным шагом по времени τ (в детекторе TUS $\tau = 800$ нс), целесообразно рассматривать дискретный сигнал $\mathcal{A}_k \equiv \mathcal{A}(T_k)$, где $T_k = T_0 + k \cdot \tau$.

Таким образом, \mathcal{A}_k является случайной величиной, так как флуктуирует число электронов \mathcal{N}_k , поступающих в k -ый такт времени на вход RC-цепочки. Будем считать, что \mathcal{N}_k распределены по Пуассону с средним значением N , не зависящим от момента времени k .

Задача сводится к вычислению среднего значения сигнала $A \equiv \langle \mathcal{A}_k \rangle$

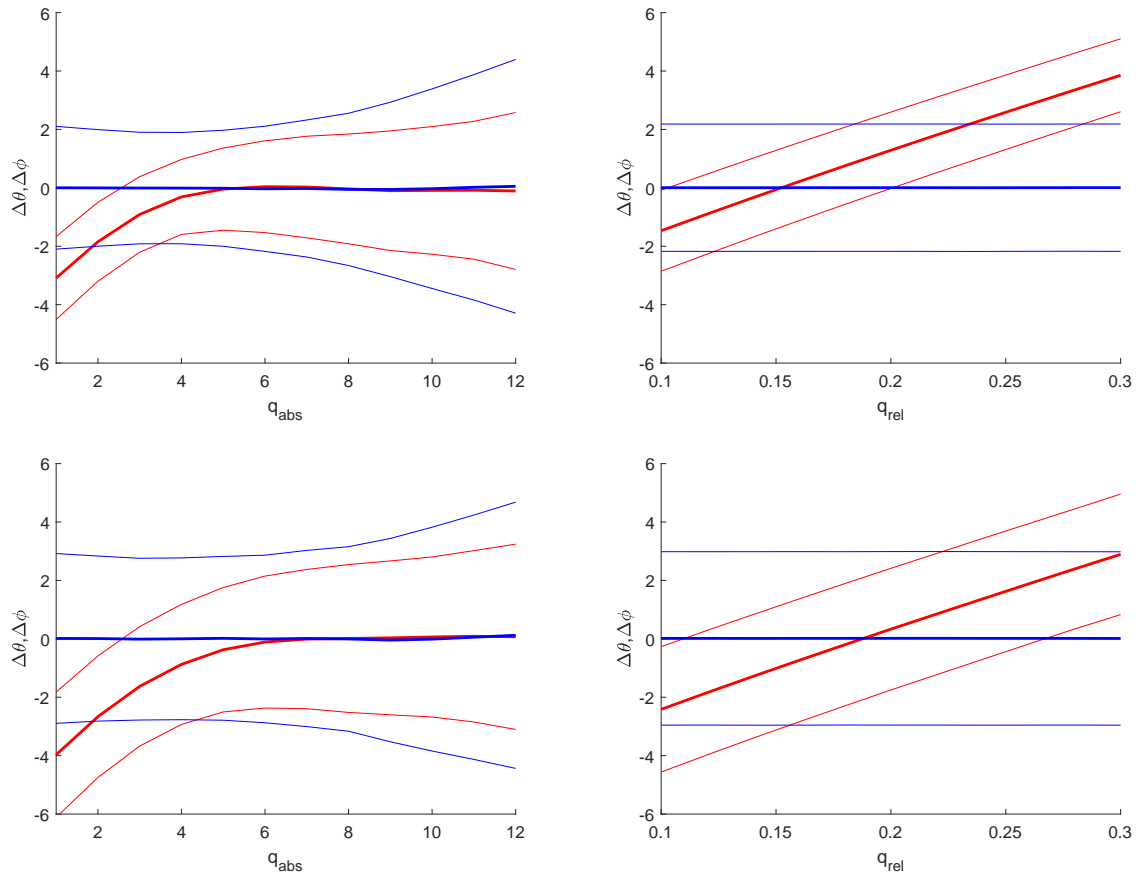


Рис. 15: Графики ошибок азимутального (синим) и зенитного (красным) углов в зависимости от абсолютного (слева) и относительного порога (справа) для шума с Noise=5 (сверху) и Noise=10 (снизу) ($\theta_0 \sim 60^\circ$, $q_{sel} = 4$).

и его среднестатистического отклонения σ_A , $\sigma_A^2 = D(\mathcal{A}_k) \equiv \langle \mathcal{A}_k^2 \rangle - \langle \mathcal{A}_k \rangle^2$. Для оценки мы будем считать, что распределение случайной величины \mathcal{A}_k с высокой степенью точности описывается нормальным со средним A и дисперсией σ_A^2 . Решая задачу, получим следующую зависимость среднестатистического отклонения от амплитуды сигнала:

$$\sigma_A = \sqrt{A} \cdot K$$

где $K = \frac{\beta G}{2} = \frac{\alpha q_e G}{2C}$ (в детекторе “ТУС” $\alpha \approx 512 \text{ В}^{-1}$, $G \approx 10^6$, $C = 30 \text{ пФ}$).

На рис. 16 представлены графики ошибок углов в зависимости от абсолютного и относительного порогов активности в случае, когда помимо гауссова шума с $\text{Noise}=2.5$ учитывается также пуассонов шум, для которого $\sigma_A \sim \sqrt{A}$.

Средние значения и стандартные отклонения ошибок углов при реконструкции с параметрами $q_{\text{abs}} = 4$ и $q_{\text{rel}} = 0.14$ для двух вариантов шума представлены в таблице 8. Порог отбора каналов $q_{\text{sel}} = 4$, стандартное отклонение гауссова шума $\text{Noise}=2.5$. Наблюдается небольшое ухудшение точности реконструкции при учете пуассоновского шума. Однако для простоты в дальнейшем при моделировании сигнала будем учитывать лишь гауссов шум.

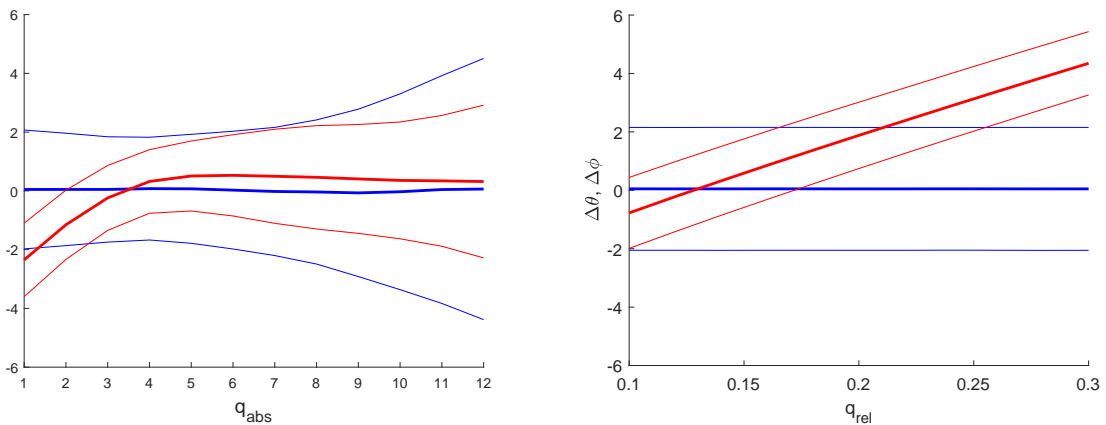


Рис. 16: Графики ошибок азимутального (синим) и зенитного (красным) углов в зависимости от абсолютного (слева) и относительного порога (справа) для гауссова шума с $\text{Noise}=2.5$ при учете пуассонова шума ($\theta_0 \sim 60^\circ$, $q_{\text{sel}} = 4$).

Таблица 8: Средние значения и стандартные отклонения ошибок азимутального и зенитного углов при реконструкции с параметрами $q_{\text{abs}} = 4$ и $q_{\text{rel}} = 0.14$ для двух вариантов шума.

Тип шума	q_{act}	$\langle \Delta\phi \rangle, ^\circ$	$\sigma_{\Delta\phi}, ^\circ$	$\langle \Delta\theta \rangle, ^\circ$	$\sigma_{\Delta\theta}, ^\circ$
гаусс	$q_{\text{abs}} = 4$	0.03	1.49	-0.09	1.01
	$q_{\text{rel}} = 0.14$	0	1.91	-0.01	1.09
гаусс + пуассон	$q_{\text{abs}} = 4$	0.08	1.75	0.32	1.08
	$q_{\text{rel}} = 0.14$	0.05	2.11	0.32	1.18

Таблица 9: Оптимальные значения управляющих параметров, средние значения и стандартные отклонения ошибок азимутального и зенитного углов при реконструкции с различными порогами отбора каналов q_{sel} при разной величине шума Noise.

q_{sel}	Noise	q_{abs}^*	$\langle \Delta\phi \rangle, ^\circ$	$\sigma_{\Delta\phi}, ^\circ$	$\langle \Delta\theta \rangle, ^\circ$	$\sigma_{\Delta\theta}, ^\circ$	q_{rel}^*	$\langle \Delta\phi \rangle, ^\circ$	$\sigma_{\Delta\phi}, ^\circ$	$\langle \Delta\theta \rangle, ^\circ$	$\sigma_{\Delta\theta}, ^\circ$
4	2.5	4	0.03	1.49	-0.09	1.01	0.14	0	1.91	-0.01	1.09
	5	5	-0.01	1.99	-0.04	1.41	0.15	0.06	2.20	0.04	1.38
	10	6	0	2.87	-0.11	2.26	0.18	0.02	2.97	-0.20	2.09
8	2.5	8	-0.05	2.49	-0.20	1.75	0.24	-0.07	3.30	-0.10	1.98
	5	10	-0.02	3.43	-0.11	2.19	0.25	-0.06	3.43	0.04	2.10

2.9 ЛТА-реконструкция: зависимость от количества отобранных каналов

В данном разделе производится реконструкция реперной БД при различных значениях порога отбора каналов q_{sel} .

На рис. 17 представлены графики ошибок углов в зависимости от абсолютного и относительного порогов активности для шума с Noise=2.5 и 5 при $q_{\text{sel}} = 8$ (соответствует $\langle N_{\text{sel}} \rangle = 6.54$). Сравнивая их с полученными ранее графиками при $q_{\text{sel}} = 4$ ($\langle N_{\text{sel}} \rangle = 9.02$), наблюдаем очередное смещение оптимальных значений управляющих параметров q_{abs}^* и q_{rel}^* (см. табл. 9).

Точность реконструкции снижается при переходе к большему порогу

отбора каналов q_{sel} , так как уменьшается количество каналов, по которым производится реконструкция. Увеличение стандартных отклонений ошибок углов при $q_{\text{sel}} = 8$ по сравнению с $q_{\text{sel}} = 4$ представлено в таблице 9.

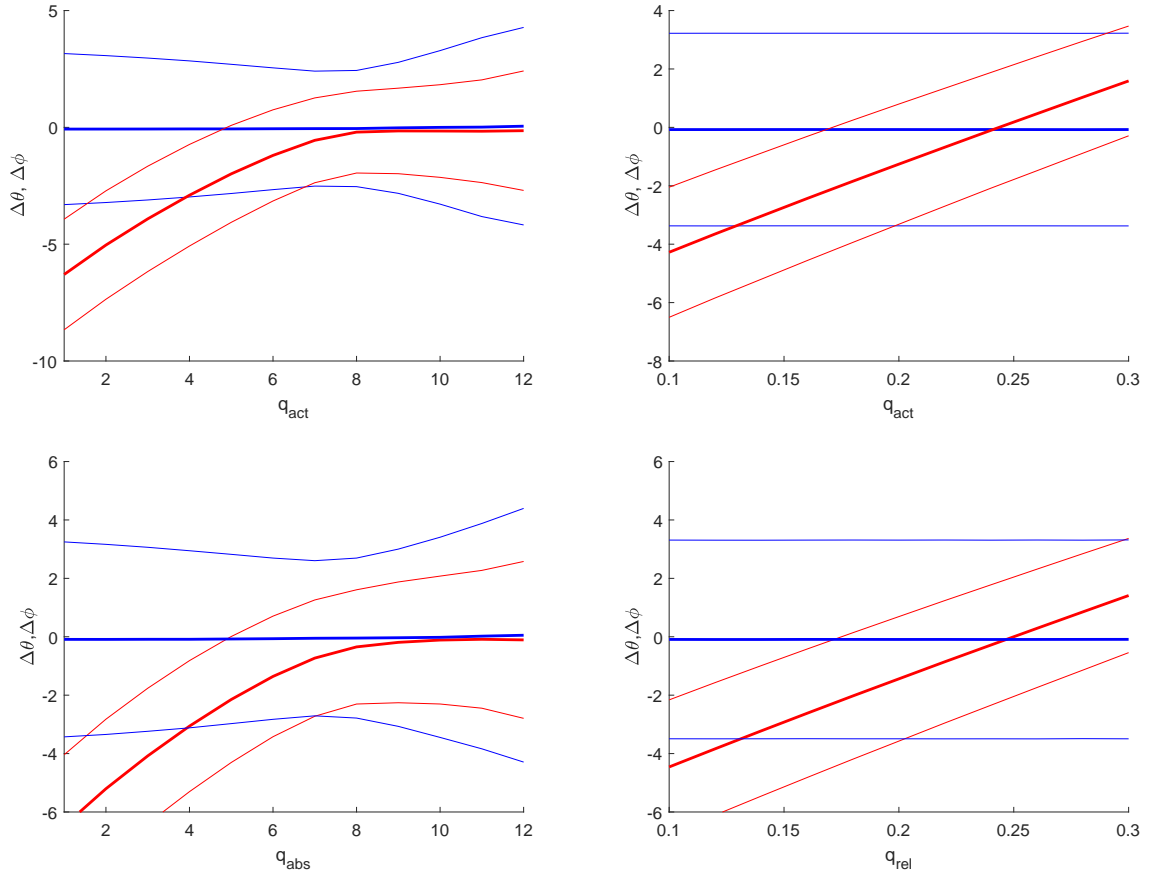


Рис. 17: Графики ошибок азимутального (синим) и зенитного (красным) углов в зависимости от абсолютного (слева) и относительного порога (справа) для шума с Noise=2.5 (сверху) и Noise=5 (снизу) ($\theta_0 \sim 60^\circ$, $q_{\text{sel}} = 8$).

2.10 Выводы

Таким образом, реконструкция зенитного угла с использованием относительного порога активности оказывается непредсказуемой в силу зависимости q_{rel}^* и от величины шума, и от порога отбора каналов q_{sel} . Реконструируя же зенитный угол с использованием абсолютного порога активности, мы всегда можем подобрать достаточно большой порог q_{abs} ,

при котором среднее значение ошибки будет равно нулю, однако при этом увеличится ее стандартное отклонение.

Азимутальный угол предпочтительно реконструировать методом относительного порога активности, из-за его высокой стабильности – стандартное отклонение ошибки не зависит от порога q_{rel} . При реконструкции азимутального угла с использованием абсолютного порога активности наблюдается область значений порога q_{abs} , при которых стандартное отклонение ошибки оказывается меньшим, чем в случае реконструкции относительным порогом, однако расположение этой области на графике ошибок сложным образом зависит от величины шума, порога отбора каналов q_{sel} и от значений самих углов.

Учитывая вышесказанное, можем дать следующую оценку точности ЛТА-метода по данным реконструкции БД модельных параметрических событий: ошибка азимутального угла составляет $\Delta\phi = 4^\circ$, зенитного – $\Delta\theta = 3^\circ$. Конечно, это оценки снизу, реальные ошибки могут быть больше, так как используемые нами модельные параметрические события являются лишь некоторым приближением реального ШАЛ.

2.11 ЛТА-реконструкция: зависимость от размера изображения

В заключение проведем исследование зависимости точности реконструкции от размера изображения (ФРТ). Напомним, что из-за неидеальности оптической системы по ФП перемещается не точка, а пятно, которое может занимать несколько соседних ячеек фотоприемника. Более того, в случае детектора TUS размер изображения изменяется в зависимости от его расположения на ФП: диаметр изображения увеличивается по мере его удаления из центра фотоприемника, а само пятно вытягивается в радиальном направлении (см. рис. 18).

Реконструируем реперную БД и построим графики ошибок углов в зависимости от абсолютного и относительного порогов активности для следующих размеров изображения: $d_{70} = 1, 1.5$ и 2 , соответствующих случаям последовательного перемещения пятна из центра фотоприемника к

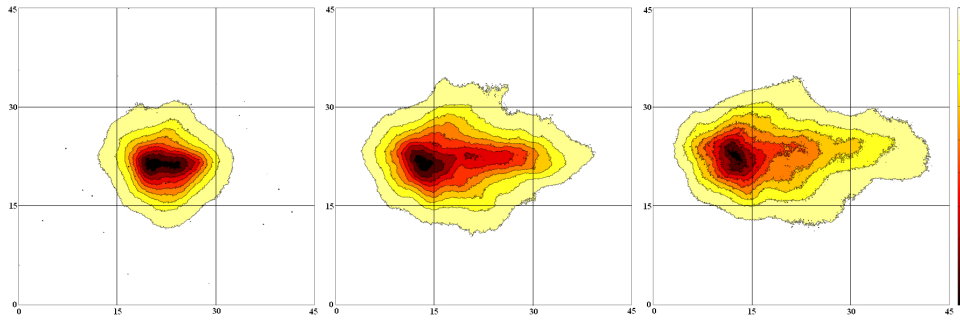


Рис. 18: Функция рассеяния точки (ФРТ) зеркала TUS для трех полевых углов: $\gamma = 0^\circ$ (на оси), 3° и 4.5° (на краю поля зрения). Контуры проведены при уменьшении амплитуды сигнала в 2 раза. Размер ячейки сетки совпадает с размером ячейки фотоприемника ($a = 15$ мм).

его краям. (Напомним, что d_{70} – это диаметр изображения с долей энергии 70%.) Используем малый шум ($\text{Noise}=2.5$) и порог отбора каналов $q_{\text{sel}} = 4$.

Как видно из рис. 19, точность реконструкции ухудшается при увеличении размера изображения, но незначительно (лучше прослеживается на графиках ошибок в зависимости от относительного порога). При этом количество отобранных каналов увеличивается: при $q_{\text{sel}} = 4$ и размере изображения $d_{70} = 1$ имеем $\langle N_{\text{sel}} \rangle = 7.82$, $d_{70} = 1.5$ и 2 соответствуют $\langle N_{\text{sel}} \rangle = 9.02$ и 10.05 . Несмотря на, казалось бы, меньшее количество используемой информации при малых размерах изображения точность реконструкции выше. С другой стороны, это вполне логично, так как трек на ФП в этом случае не размывается, т.е. эффект увеличения количества информации (числа отобранных каналов) при увеличении диаметра d_{70} оказывается слабее.

Таким образом, метод ЛТА дает более точные результаты при малых размерах изображения, которые получаются при наличии в детекторе хорошей оптики, способной фокусировать точечный излучающий объект в отдельный пиксель. В нашем случае точность реконструкции тем выше, чем ближе к центру фотоприемника расположено изображение. Однако метод вполне может использоваться и для реконструкции нецентральных событий.

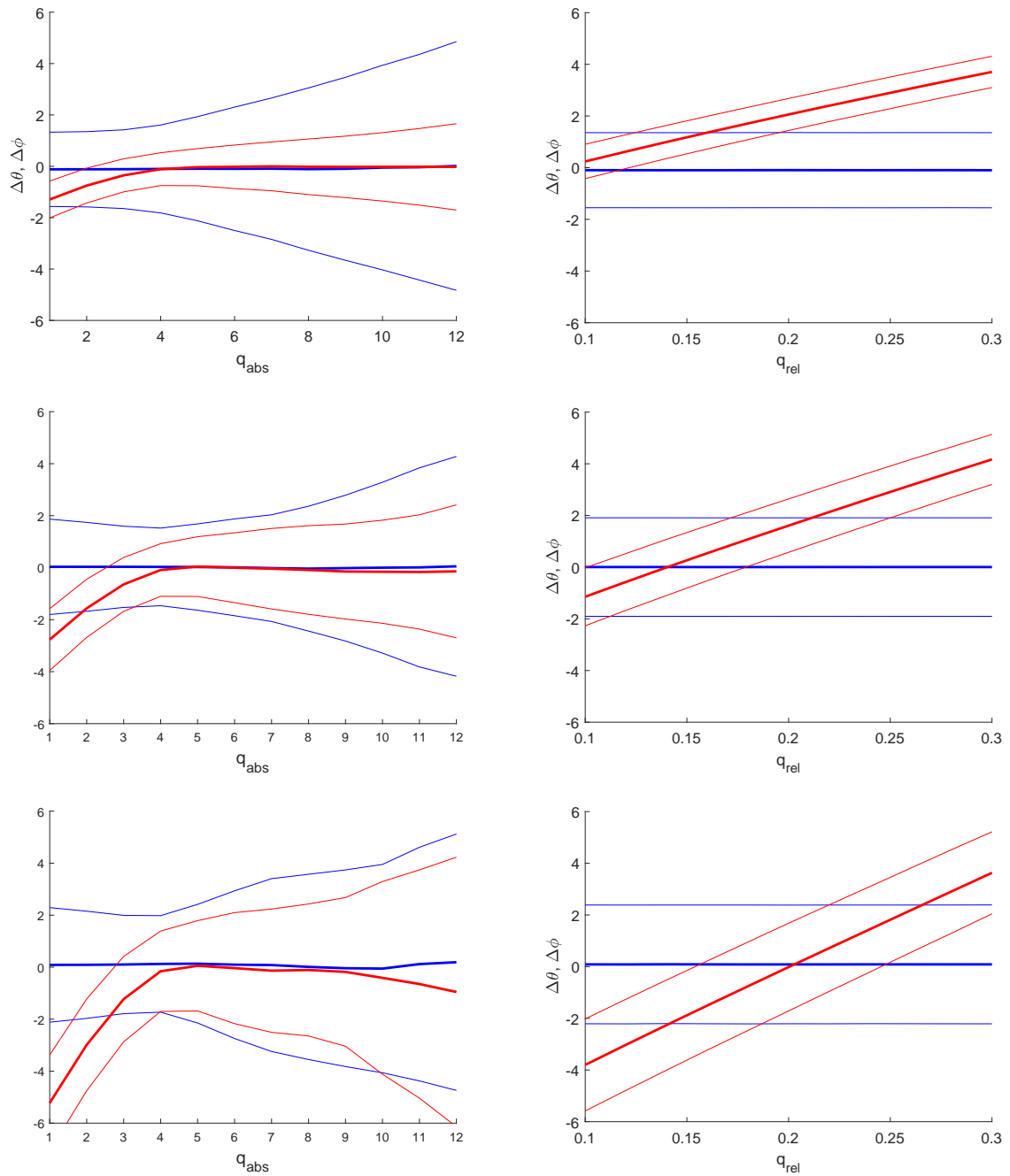


Рис. 19: Графики ошибок азимутального (синим) и зенитного (красным) углов в зависимости от абсолютного (слева) и относительного порога (справа) для $d_{70} = 1, 1.5$ и 2 (сверху вниз) ($\theta_0 \sim 60^\circ$, Noise=2.5, $q_{sel} = 4$).

3 Реконструкция событий TUS: примеры

В данном разделе производится реконструкция методом ЛТА двух реально зарегистрированных детектором TUS событий. Предварительно в качестве приближения к реконструкции реальных событий метод апробируется на БД модельных параметрических событий с асимметричной кривой свечения и БД, сгенерированных с помощью пакета программ ESAF.

3.1 ЛТА-реконструкция модельных событий с асимметричной кривой свечения

Везде ранее для проверки метода мы использовали БД симметричных событий, у которых коэффициент асимметрии $\alpha = 1$. В действительности кривая свечения ШАЛ не является симметричной. С одной стороны, при малых зенитных углах заряженные частицы ШАЛ попадают в землю и свечение “обрезается”. С другой стороны, в результате многократного рассеяния излучения (как флуоресцентного, так и черенковского) в сигнале появляется “хвост” – рассеянная компонента приходит в детектор с задержкой по времени. Из-за большого поля зрения отдельного канала и широкого ФРТ оптики детектора TUS разделить эти компоненты нельзя. Поэтому, прежде чем применить ЛТА-реконструкцию к реальным событиям TUS, необходимо проверить надежность методики на модельных данных с асимметричной кривой свечения.

3.1.1 Параметрические события

Использование в параметрических модельных событиях параметра асимметрии α , отличного от единицы, позволяет проверить оба указанных выше эффекта. Действительно, ситуацию с обрезанием кривой свечения можно смоделировать с помощью выбора $\alpha < 1$, а появление задержанной во времени компоненты многократного рассеяния выбором $\alpha > 1$.

Напомним, что в процессе ЛТА-реконструкции для выделения окна активности сигнал в канале предварительно аппроксимируется (симметричной) гауссовой функцией. Представляется разумным, что и в случае

асимметричных кривых свечения можно использовать данную методику, так как форма сигнала в канале в основном определяется ФРТ, а не его динамикой во времени. Проверим это утверждение на модельных параметрических событиях, сгенерив для этого две БД по 500 событий с асимметричной кривой свечения с $\alpha = 0.5$ и $\alpha = 2$. Азимутальный угол равномерно распределен по всем возможным значениям, а зенитный – в бине $\theta_0 \sim 60^\circ$. Шум малый с Noise=2.5. Порог отбора каналов $q_{\text{sel}} = 4$.

На рис. 20 представлены графики ошибок углов в зависимости от абсолютного и относительного порогов активности в случае асимметричной кривой свечения (ср. с аналогичным рис. 13 для симметричной кривой свечения с $\alpha = 1$). Средние значения и стандартные отклонения ошибок углов при реконструкции с управляющими параметрами $q_{\text{abs}} = 4$ и $q_{\text{rel}} = 0.14$ представлены в таблице 10. По этим данным можем сделать вывод о том, что метод применим и в случае небольшой асимметрии кривой свечения.

Таблица 10: Средние значения и стандартные отклонения ошибок азимутального и зенитного углов при реконструкции с параметрами $q_{\text{abs}} = 4$ и $q_{\text{rel}} = 0.14$ для трех различных коэффициентов асимметрии α .

α	q_{act}	$\langle \Delta\phi \rangle, ^\circ$	$\sigma_{\Delta\phi}, ^\circ$	$\langle \Delta\theta \rangle, ^\circ$	$\sigma_{\Delta\theta}, ^\circ$
0.5	$q_{\text{abs}} = 4$	-0.10	1.45	-0.41	0.98
	$q_{\text{rel}} = 0.14$	-0.16	1.80	-0.27	1.04
1	$q_{\text{abs}} = 4$	-0.22	1.96	-0.17	1.22
	$q_{\text{rel}} = 0.14$	-0.10	1.92	0.20	1.13
2	$q_{\text{abs}} = 4$	-0.17	1.82	-0.31	1.10
	$q_{\text{rel}} = 0.14$	-0.13	1.88	-0.14	0.99

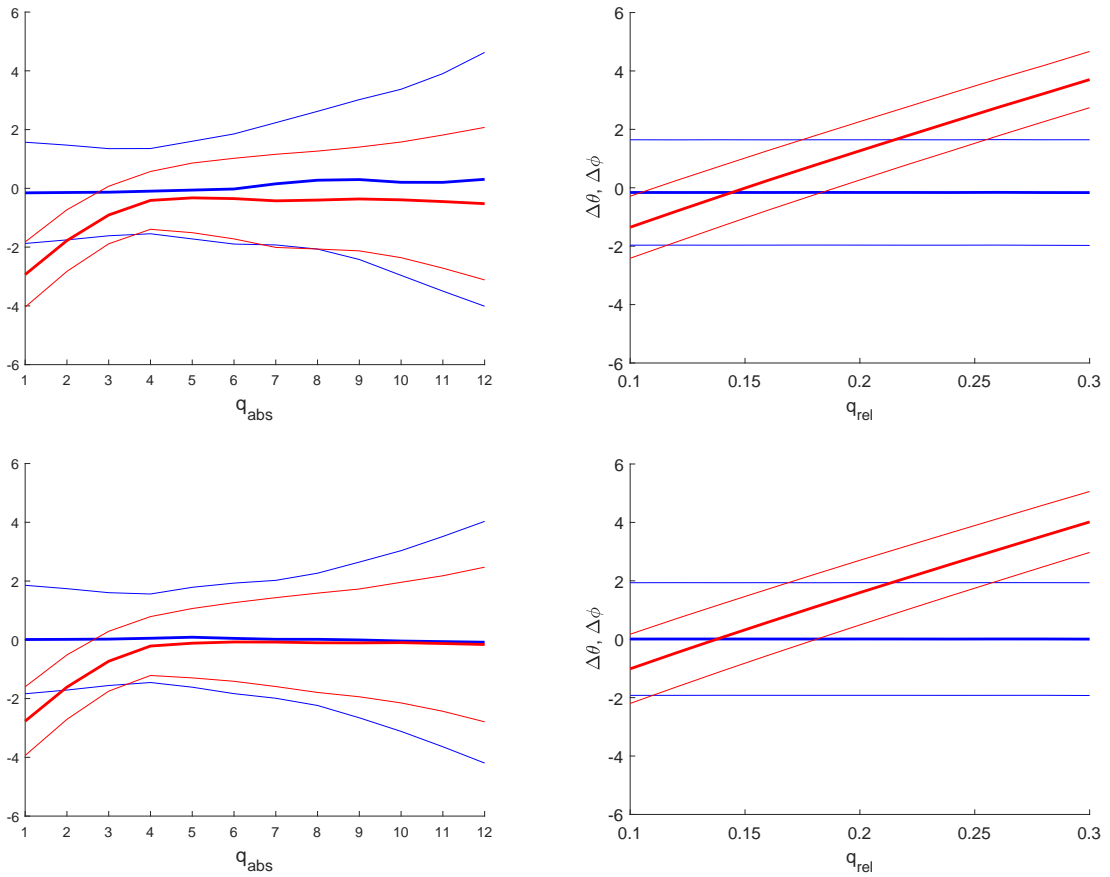


Рис. 20: Графики ошибок азимутального (синим) и зенитного (красным) углов в зависимости от абсолютного (слева) и относительного порога (справа) в случае ассиметричной кривой свечения с $\alpha = 0.5$ (сверху) и 2 (снизу) ($\theta_0 \sim 60^\circ$, Noise=2.5, $q_{sel} = 4$).

3.1.2 ESAF-события

Моделирование используемой в данном разделе БД производилось с помощью специализированного ПО ESAF (EUSO Simulation and Analysis Framework) [13], разработанного коллаборацией JEM-EUSO [11] для симуляции атмосферных процессов и отклика орбитального телескопа. ESAF включает в себя возможности как моделировать событие (от начала первого взаимодействия первичной частицей с молекулами воздуха до попадания в землю), так и реконструировать по отклику параметры первичной частицы: направление прихода, энергию и глубину максимума.

Программа моделирования использует объектно-ориентированный подход (C++ – код) и включает в себя:

- численное моделирование развития ШАЛ, как параметрически (GIL-параметризация, Greizen–Pina–Linsley), так и с помощью интерфейса с существующими MC-кодами (например, CORSIKA);
- подробное описание атмосферы (модель атмосферы), включая аэрозоли и облака;
- образование флуоресцентного и черенковского излучения;
- детальное моделирование распространения фотонов в атмосфере, начиная от точки их возникновения и до входного зрачка детектора (включая взаимодействие с землей и учет многократного рассеяния на основании MC-кода);
- моделирование оптики телескопа и трассировки лучей через нее и фотоприемника;
- моделирование работы электроники и триггерной системы детектора;
- моделирование фонового сигнала;
- визуализацию результатов моделирования (на разных уровнях).

Произведем реконструкцию LTA-методом БД ESAF-событий со следующими параметрами: энергией $E_0 \approx 1000$ ЭэВ, азимутальным углом $\phi_0 \sim \text{Unif}[40^\circ, 60^\circ]$ и зенитным углом $\theta_0 \sim \text{Unif}[35^\circ, 55^\circ]$. На рис. 21 изображена кривая свечения одного из событий БД. В качестве фонового сигнала добавим к кривой свечения гауссов шум с нулевым средним значением и стандартным отклонением $\text{Noise}=2.5$. Порог отбора каналов $q_{\text{sel}} = 4$.

Графики ошибок в зависимости от абсолютного и относительного порогов представлены на рис. 22. Наблюдается смещение средних значений ошибок азимутального угла на 4° и зенитного – на 2° , это может быть связано с краевым расположением событий БД на матрице пикселей.

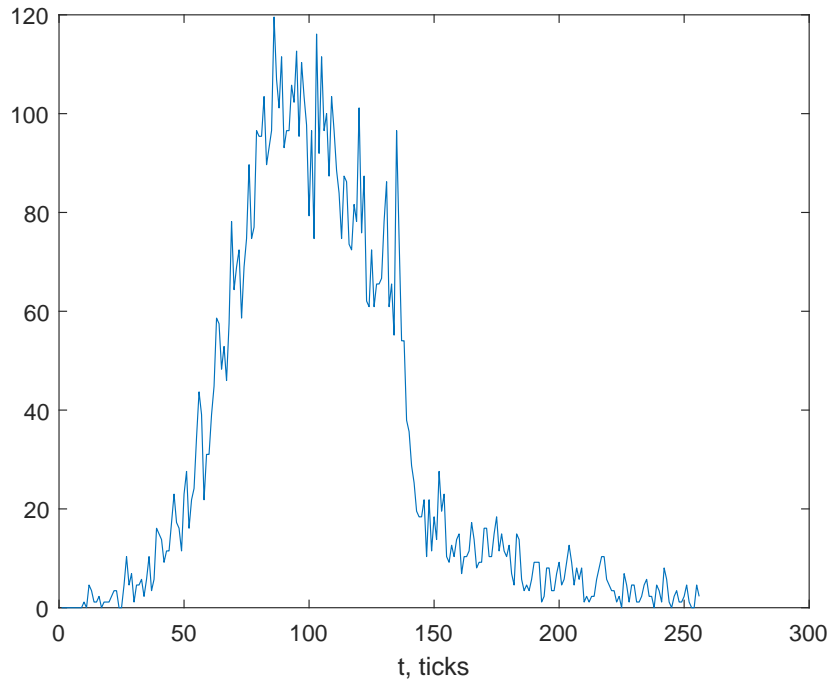


Рис. 21: Кривая свечения ESAF-события (без добавления фона).

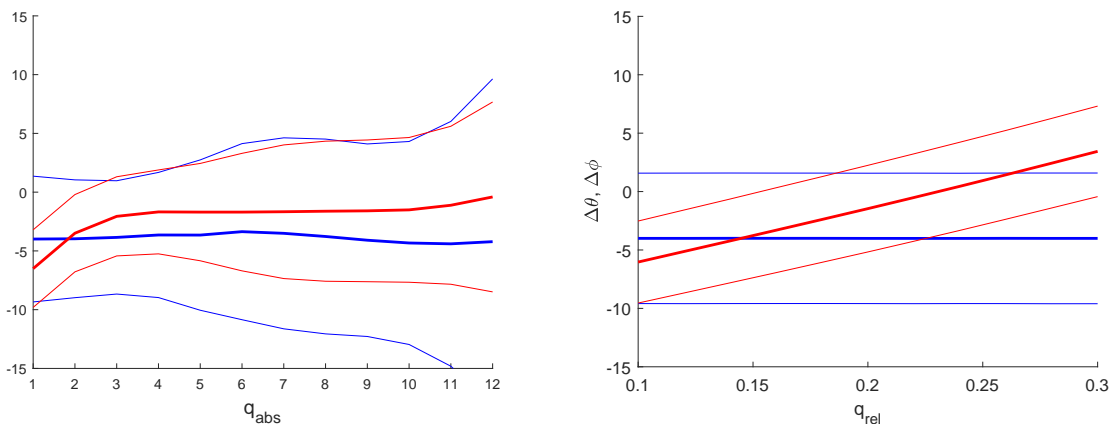


Рис. 22: Графики ошибок азимутального (синим) и зенитного (красным) углов в зависимости от абсолютного (слева) и относительного порога (справа) для БД ESAF-событий ($q_{sel} = 4$, $Noise=2.5$).

3.2 Событие TUS161003

В качестве первого примера реконструкции экспериментально зарегистрированного события рассмотрим событие, измерения которого детектор TUS провел в 05:48:59 UTC 3 октября 2016 года – для простоты будем называть его TUS161003. В этот момент детектор пролетал над штатом Миннесота (США) примерно в 100 км на юго-восток от г. Миннеаполис.

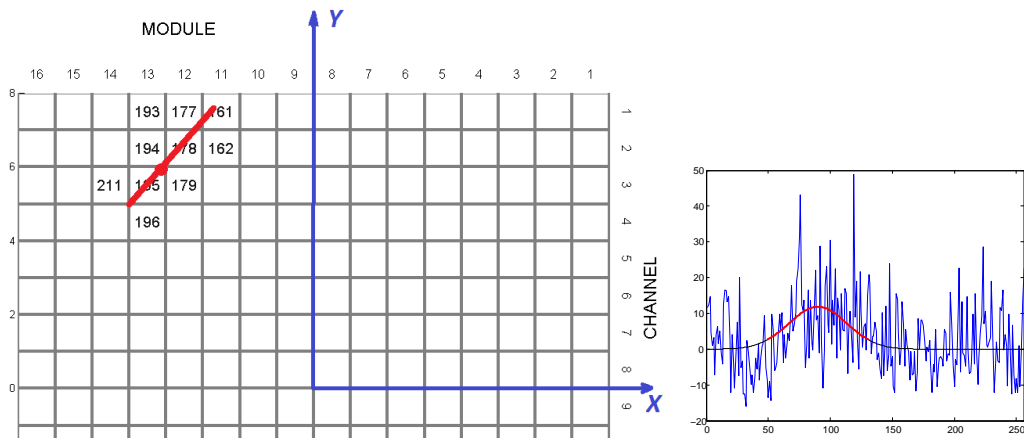


Рис. 23: Расположение 10 каналов с сигналом события TUS161003 на матрице фотоприемника. Схематически изображен трек (результат реконструкции, см. далее). Справа – сигнал в канале id=211(14,3).

Стоит отметить, что анализ условий наблюдения не выявил какой-либо грозовой активности и присутствия облаков в районе регистрации события, а также значимых свечений антропогенного характера. Эти факты совместно с пространственно-временной структурой события позволяют надеяться, что в данном случае детектор TUS зарегистрировал свечение ШАЛ. Ниже мы, исходя из этой предпосылки (малоразмерный источник УФ-излучения перемещается прямолинейно со скоростью света) проведем реконструкцию направления прихода методом LTA.

Для отбора сработавших каналов в данном событии сотрудниками ЛКЛПВЭ был разработан специальный алгоритм [7], отобравший $N_{\text{sel}} = 10$ каналов, в которых наряду с фоном присутствует также и активный сигнал. На рис. 23 представлены номера всех 10-ти отобранных каналов в системе координат фотоприемника модуль–канал (md,ch) (приведены также отнормированные на размер ячейки декартовы координаты с началом в центре фотоприемника) и схематически изображен трек события. Кружком отмечен максимум кривой свечения. Справа на рисунке приведена осциллограмма канала id=211(14,3), в котором сигнал зарегистрирован первым. Остальные девять отобранных сигналов и их гауссовы аппроксимации изображены на рис. 24 (сигналы расположены в хронологическом порядке по положению максимума), а на рис. 25 – суммарная кривая свечения события. Параметры гауссовой аппроксимации

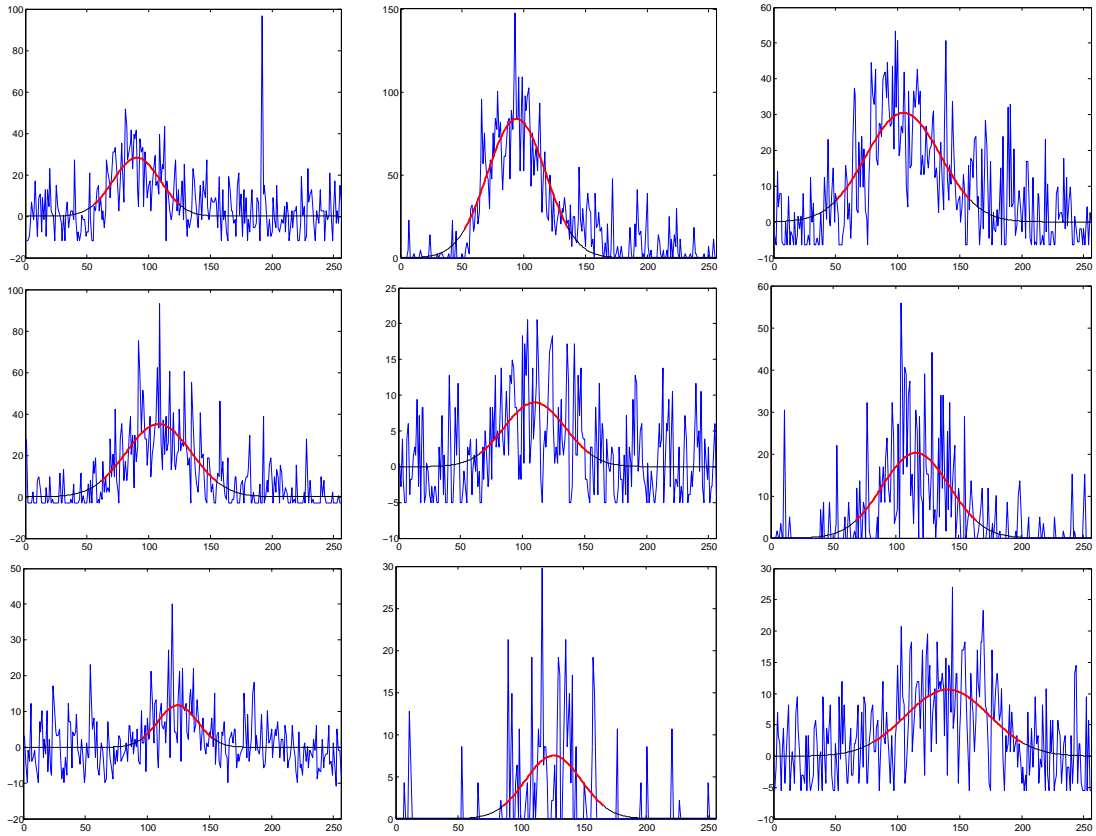


Рис. 24: Сигналы в 9-ти отобранных каналах события TUS161003, порядок расположения каналов (слева-направо; сверху-вниз): id = 196, 195, 179; 194, 193, 178; 162, 177, 161.

сигналов в каналах представлены в таблице 11.

Таблица 11: Параметры гауссовой аппроксимации 10-ти отобранных сигналов: положение максимума (пика) T_p , длительность на полувысоте FDHM и амплитуда T_p . В первых двух строках указаны идентификаторы каналов и их положение в системе модуль–канал.

id	211	196	195	179	194	193	178	162	177	161
(md,ch)	(14,3)	(13,4)	(13,3)	(12,3)	(13,2)	(13,1)	(12,2)	(11,2)	(12,1)	(11,1)
T_p	90.0	90.3	94.2	104.7	108.1	109.9	116.0	124.4	126.1	140.2
FDHM	55.0	45.5	55.9	70.0	62.8	58.6	63.6	37.9	52.9	79.9
I_p	11.8	28.2	83.8	30.5	35.1	9.0	20.3	11.7	7.5	10.6

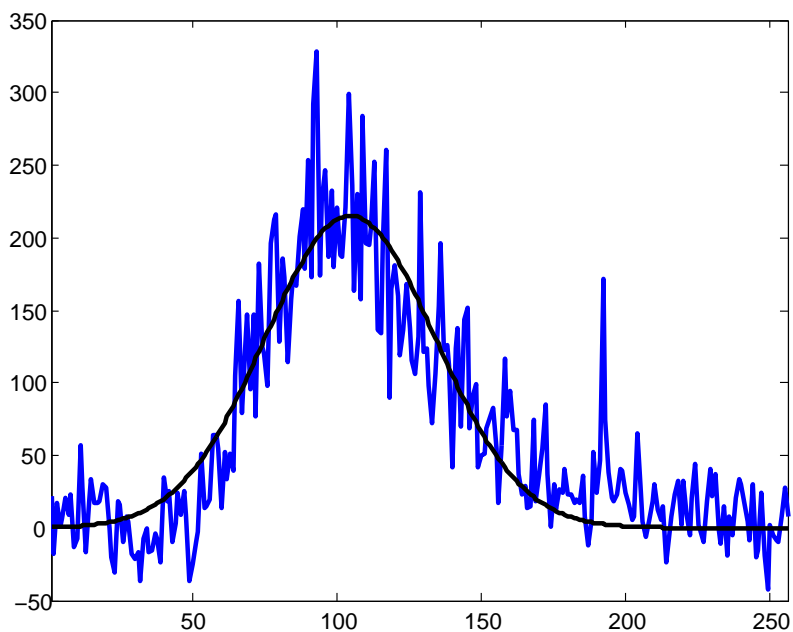


Рис. 25: Кривая свечения события TUS161003 (сумма по 10-ти отобраным сигналам) и ее гауссова аппроксимация.

Применим ЛТА-реконструкцию к данному событию отдельно с использованием абсолютного и относительного порогов активности.

3.2.1 Реконструкция при абсолютном пороге

Результаты ЛТА-реконструкции направления прихода события TUS161003 при варьировании абсолютного порога в пределах от 2.5 до 11 единиц (с шагом 0.5) представлены в таблице 12.

Таблица 12: Результаты реконструкции для различных абсолютных порогов активности.

q_{abs}	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
$\phi, ^\circ$	50.2	50.2	50.1	50.3	50.4	50.3	50.3	50.3	50.3
$\theta, ^\circ$	37.2	37.8	38.3	38.7	39.1	39.5	39.7	39.9	39.8

7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10	10.5	11
50.2	49.5	49.8	49.7	49.5	50.1	50.8	52.4	54.9
39.6	38.5	38.1	37.9	36.6	35.5	33.7	30.1	26.3

Азимутальный угол практически не изменяется при изменении абсолютного порога, что согласуется с полученными на модельных данных графиками ошибок. (Исключение составляет область больших порогов, для которых ширина ошибки угла значительно возрастает.)

Зенитный угол растет при малых абсолютных порогах, но в итоге, как и было предсказано, выходит на плато. Данная область значений в таблице отмечена красным как наиболее достоверная. При больших порогах, когда ширина ошибки оказывается уже достаточно большой, плато исчезает.

3.2.2 Реконструкция при относительном пороге

Результаты ЛТА-реконструкции направления прихода события TUS161003 при варьировании относительного порога в пределах от 0.10 до 0.30 (с шагом 0.02) представлены в таблице 13.

Таблица 13: Результаты реконструкции для различных относительных порогов активности.

q_{rel}	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30
$\phi, ^\circ$	50.0	50.1	50.1	50.0	50.0	50.0	50.0	50.2	50.0	50.0	50.0
$\theta, ^\circ$	38.3	39.1	40.1	41.1	41.9	43.0	43.9	45.0	45.9	46.9	47.9

Азимутальный угол остается постоянным с точностью до 0.1° (точнее, чем при абсолютном пороге) для любых значений относительного порога активности.

Зенитный угол монотонно возрастает с увеличением порога, подтверждая результаты полученные для модельных БД. Определить истинное значение зенитного угла по данным таблицы 13 оказывается невозможным, так как не удастся предсказать оптимальное значение относительного порога. Лишь основываясь на данных, полученных при реконструкции методом абсолютного порога, мы можем установить область, в которой располагается истинное значение зенитного угла (в таблице выделена красным). В таком случае оптимальное значение относительного порога составляет примерно 0.14.

3.2.3 Выводы

Следуя оптимальному способу применения метода ЛТА, полученному еще на этапе реконструкции БД модельных параметрических событий, для определения азимутального угла трека будем использовать данные реконструкции по относительному порогу, а для зенитного угла – по абсолютному.

Имеем следующие результаты реконструкции направления прихода события TUS161003:

азимутальный угол $\phi = (50 \pm 4)^\circ$ и зенитный угол $\theta = (40 \pm 3)^\circ$.

3.3 Событие TUS161031

Аналогичное исследование проведем для события TUS161031, которое было зарегистрировано детектором TUS в 10:25:18 UTC 31 октября 2016 года над Аляской/ Несмотря на то, что в непосредственной близости с местом регистрации расположена мощная РЛС, доказать антропогенный характер происхождения события не удалось. Поэтому целесообразно изучить данное событие в качестве еще одного кандидата в ШАЛ.

Тем же методом, что и для события TUS161003, было отобрано 6 каналов, содержащих активный сигнал. На рис. 26 представлены номера отобранных каналов и их взаимное расположение на матрице пикселей фотоприемника. Сигналы в этих каналах и их гауссовы аппроксимации представлены на рис. 27 (сигналы расположены в хронологическом порядке по положению максимума), а на рис. 28 – суммарная кривая свечения события. Параметры гауссовой аппроксимации сигналов в каналах приведены в таблице 14.

Применим ЛТА-реконструкцию к данному событию отдельно с использованием абсолютного и относительного порогов активности.

3.3.1 Реконструкция при абсолютном пороге

Результаты ЛТА-реконструкции направления прихода события TUS161031 при варьировании абсолютного порога в пределах от 1.5 до 10 единиц (с шагом 0.5) представлены в таблице 15.

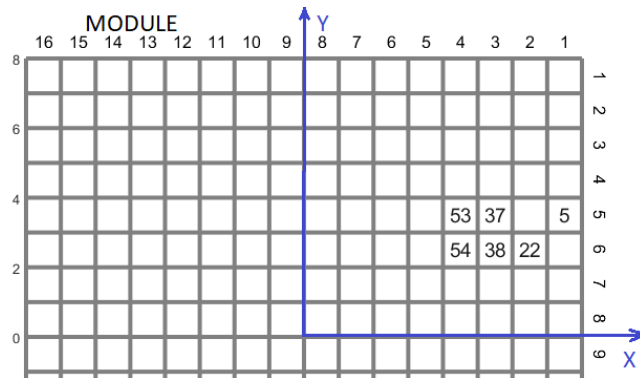


Рис. 26: Расположение 6 каналов с сигналом события TUS123 на матрице фотоприемника.

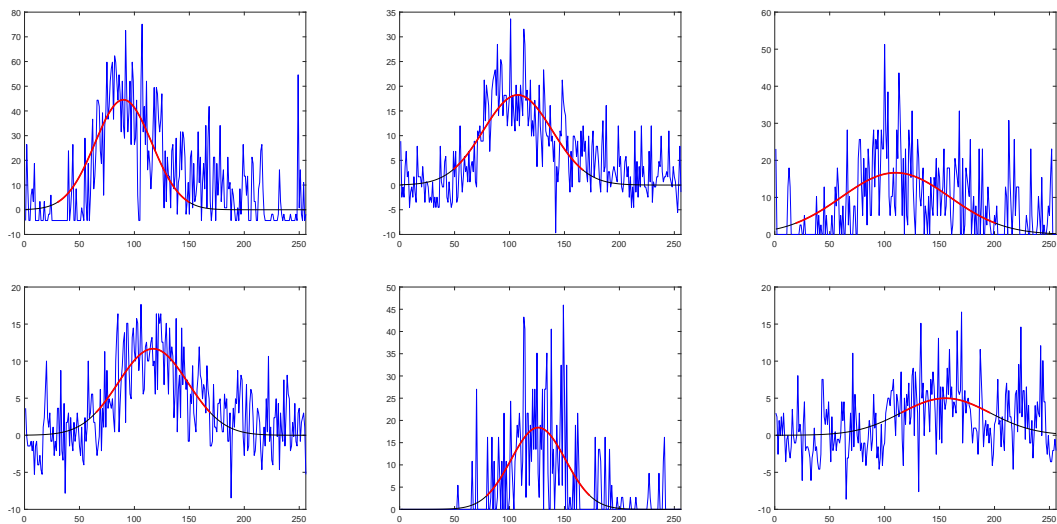


Рис. 27: Сигналы в 6-ти отобранных каналах события TUS161031, порядок расположения каналов (слева-направо; сверху-вниз): id = 54, 38, 53; 37, 22, 5.

Таблица 14: Параметры гауссовой аппроксимации 6-ти отобранных сигналов: положение максимума (пика) T_p , длительность на полувысоте FDHM и амплитуда I_p . В первых двух строках указаны идентификаторы каналов и их положение в системе модуль–канал.

id	54	38	53	37	22	5
(md,ch)	(4,6)	(4,6)	(4,5)	(3,5)	(2,6)	(1,5)
T_p	90.0	107.5	110.0	117.0	126.2	155.4
FDHM	60.9	73.8	116.1	74.8	58.4	95.2
I_p	44.5	18.2	16.7	11.7	18.4	5.0

Таблица 15:

q_{abs}	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
$\phi, ^\circ$	16.5	16.5	16.6	16.6	16.8	16.9	17.1	17.8	17.7
$\theta, ^\circ$	26.8	27.4	27.9	28.2	28.3	28.1	27.3	22.6	23.4

6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10
17.7	17.9	17.7	17.6	17.3	17.6	17.3	17.1	16.7
24.2	25.0	26.0	26.8	28.0	28.5	29.7	30.6	32.0

Азимутальный угол снова практически не изменяется (в пределах 1.5°) при изменении абсолютного порога.

Зенитный угол растет при малых абсолютных порогах, начинает выходить на плато при $q_{\text{abs}} = 2.5$, но далее при $q_{\text{abs}} = 5$ плато обрывается (зенитный угол начинает уменьшаться) и появляется снова только при $q_{\text{abs}} > 7.5$. При больших порогах плато исчезает уже в результате увеличения ширины ошибки.

Обрыв плато объясняется тем, что при переходе от $q_{\text{abs}} = 4.5$ к 5 из реконструкции исключается канал $\text{id}=5(1,5)$, сигнал в котором является слабым (см. значение I_p в табл. 14). Теряя один канал, мы теряем часть информации. Потеря информации в данном случае постепенно компенсируется уменьшением окна активности, т.е. увеличением порога q_{abs} , и точность восстанавливается. Красным цветом в таблице 15 отмечена об-

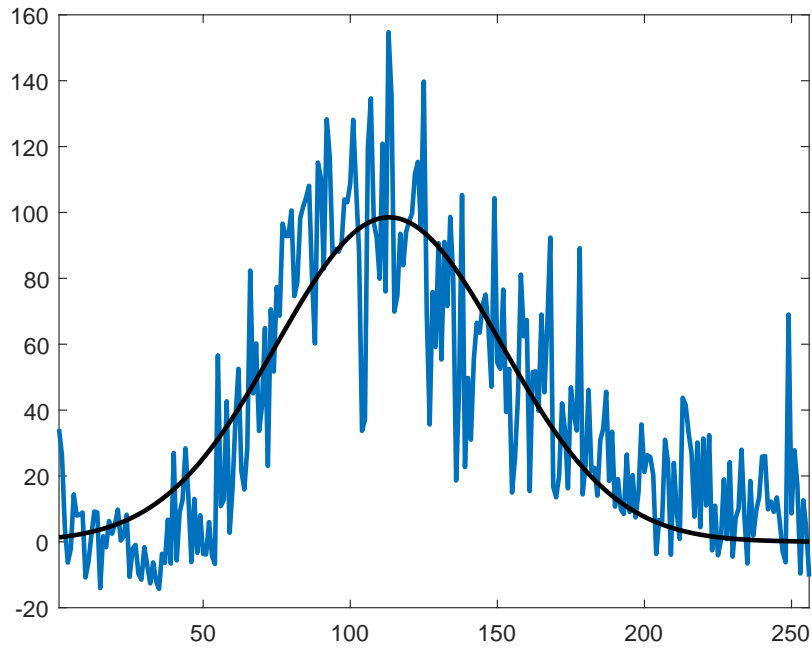


Рис. 28: Кривая свечения события TUS161031 (сумма по 6-ти отобранным сигналам) и ее гауссова аппроксимация.

ласть наиболее достоверных значений зенитного угла.

3.3.2 Реконструкция при относительном пороге

Результаты LTA-реконструкции направления прихода события TUS161031 при варьировании относительного порога в пределах от 0.10 до 0.30 (с шагом 0.02) представлены в таблице 16.

Таблица 16:

q_{rel}	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30
$\phi, ^\circ$	16.4	16.3	16.4	16.4	16.3	16.4	16.3	16.3	16.4	16.4	16.4
$\theta, ^\circ$	27.7	28.3	29.0	29.6	30.3	31.0	31.7	32.4	33.2	33.9	34.6

Азимутальный угол остается постоянным с точностью до 0.1° для любых значений относительного порога активности.

Зенитный угол монотонно возрастает с увеличением порога. Красным цветом в таблице 16 выделена область, в которой располагается истинное

значение зенитного угла (по данным реконструкции методом абсолютного порога). В таком случае оптимальное значение относительного порога составляет примерно 0.12.

3.3.3 Выводы

Реконструируя азимутальный угол методом относительного порога активности, а зенитный – по абсолютному порогу, имеем следующие результаты реконструкции направления прихода события TUS161031: азимутальный угол составляет $\phi = (16 \pm 4)^\circ$, зенитный – $\theta = (28 \pm 3)^\circ$.

Заключение

В ходе выполнения работы были получены следующие основные результаты:

1. Разработан метод ЛТА реконструкции направления прихода событий, зарегистрированных детектором “ТУС”, в двух вариантах (по абсолютному и относительному порогу активности).
2. Созданы базы данных модельных параметрических событий.
3. На базах данных модельных параметрических событий проведено исследование точности метода в зависимости от:
 - направления прихода;
 - величины шума;
 - числа отобранных каналов;
 - размера изображения;
 - асимметричности кривой свечения.
4. Проведено исследование точности метода на базе данных ESAF-событий.
5. Сделан вывод об оптимальном способе применения ЛТА-метода: для реконструкции азимутального угла использовать относительный порог активности, зенитного угла – абсолютный.
6. Произведена реконструкция направления прихода события TUS161003 методом ЛТА: азимутальный угол составил $\phi = (50 \pm 4)^\circ$, зенитный угол – $\theta = (40 \pm 3)^\circ$.
7. Произведена реконструкция направления прихода события TUS161031 методом ЛТА: азимутальный угол составил $\phi = (16 \pm 4)^\circ$, зенитный угол – $\theta = (28 \pm 3)^\circ$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Linsley J., Scarsi L., Rossi B. Extremely Energetic Cosmic-Ray Event // Physical Review Letters. 1961. . Т. 6. С. 485–487. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.6.485>.
- [2] Zatsepin G. T., Kuz'min V. A. Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays // Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. 1966. . Т. 4. с. 78.
- [3] Greisen K. End to the Cosmic-Ray Spectrum? // Phys. Rev. Lett. 1966. Apr. Т. 16. С. 748–750. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.16.748>.
- [4] Dawson B. R., Fukushima M., Sokolsky P. Past, Present and Future of UHECR Observations // Prog. Theor. Exp. Phys. 2017. Т. 2017, № 12. с. 12A101.
- [5] First results from the TUS orbital detector in the extensive air shower mode / B. A. Khrenov, P. A. Klimov, M. I. Panasyuk [и др.] // J. of Cosmology and Astroparticle Physics. 2017. Т. 2017, № 09. с. 006. URL: <http://stacks.iop.org/1475-7516/2017/i=09/a=006>.
- [6] Zotov M. Early Results from TUS, the First Orbital Detector of Extreme Energy Cosmic Rays // 2016 Conference on Ultrahigh Energy Cosmic Rays (UHECR2016) Kyoto, Japan, October 11-14, 2016. 2018. с. 011029. URL: <https://inspirehep.net/record/1519803/files/arXiv:1703.09484.pdf>.
- [7] Search for extreme energy cosmic ray candidates in the TUS orbital experiment data / S. V. Biktemerova, A. A. Botvinko, N. P. Chirskaya [и др.] // ArXiv e-prints. 2017. .
- [8] Fenu F. The cosmic ray energy spectrum measured by the Pierre Auger Observatory // Proceedings of Science (ICRC2017). № 486. 2017.

- [9] Klimov P., Lomonosov-UHECR/TLE Collaboration. Status of the KLYPVE-EUSO detector for EECR study on board the ISS // Proceedings of Science (ICRC2017). № 412. 2017.
- [10] EUSO – Extreme Universe Space Observatory / Osvaldo Catalano, Maria Concetta MacCarone, Andrea Santangelo [и др.] // Astronomy, Cosmology and Fundamental Physics. 2003. . с. 427.
- [11] The JEM-EUSO mission: An introduction / J. Adams, J.H., S. Ahmad, J.-N. Albert et al. // Experimental Astronomy. 2015. Vol. 40, no. 1. P. 3–17.
- [12] Hamamatsu R1463 photomultiplier tube datasheet.
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/R1463_TPMH1349E.pdf.
- [13] Full simulation of space-based extensive air showers detectors with ESAF / C. Berat, S. Bottai, D. De Marco [и др.] // Astroparticle Physics. 2010. . T. 33. C. 221–247.

А Приложение. Пакет программ RecoStudio

Здесь дается описание m -функций, вошедших в пакет RecoStudio, включая входные аргументы и возвращаемые значения.

Для простоты после каждого аргумента функции (как входного, так и выходного) в квадратных скобках указан его размер по всем измерениям. Для указания размерности массива ячеек используются фигурные скобки.

А.1 Генерация события

В данном пакете предусмотрено несколько вариантов создания модельного события:

- 1) трековое гауссовое событие (Theta-event);
- 2) трековое асимметричное событие (ThetaA-event);
- 3) событие, полученное в результате моделирования в пакете ESAF (ESAF-event).

Ниже представлено описание всех функций, осуществляющих как задание модельных трековых событий, так и формирование цифровых сигналов в них.

В функциях этого раздела используются обозначения:

$\text{Theta}[1,8]$ – параметры Theta-события.

$\text{Theta}(1,1:2) = [X,Y]$ – координаты максимума сигнала.

$\text{Theta}(1,3:4) = [U_x,U_y]$ – компоненты скорости.

$\text{Theta}(1,5) = T_p$ – момент времени максимума сигнала.

$\text{Theta}(1,6) = \text{FDHM}$ – длительность сигнала (Full Duration at Half Maximum).

$\text{Theta}(1,7) = I_p$ – амплитуда сигнала.

$\text{Theta}(1,8) = \alpha$ – асимметричность кривой свечения (отношение t_2/t_1).

$\text{Thetas}[1,8,Nev]$ – список параметров Nev Theta-событий.

- `function Thetas = GenThetas(R_range,U_range,LC_range,Nev)`
`function Thetas = GenThetasDir(R_range,DIR_range,LC_range,Nev)`
Функции формирования параметров трековых событий (Theta-events) Thetas , где все параметры равномерно распределены в областях, указанных во входных аргументах:

$R_range[2,2] = [X_min, X_max; Y_min, Y_max]$
 $U_range[2,2] = [U_X_min, U_X_max; U_Y_min, U_Y_max]$
 $DIR_range[2,2] = [AZ_min, AZ_max; ZN_min, ZN_max]$
 $LC_range[4,2] = [AMP_min, AMP_max; T_min, T_max; FDHM_min, FDHM_max; alpha_min, alpha_max]$
 Nev – число событий (по умолчанию $Nev=1$).

- `function [AZs,ZNs] = u2dir(Us, Rs_source, factor)`
`function Us = dir2u(AZs, ZNs, Rs_source, factor)`
 Утилиты, осуществляющие прямое и обратное преобразования проекций скоростей в углы направления прихода.
 $Us[Nev, 2]$ – список скоростей частицы (в пикселях за такт – безразмерная скорость), Nev – количество событий в списке.
 $Rs_source[1, Nev]$ – список расстояний от детектора до точки излучения (в км, количества событий Nev в списках Us и Rs_source должны быть одинаковым).
 $factor=c*tau/gamma_pix$, где $c=300.e-3$ – скорость света (в км/мкс), tau – длительность одного такта (в мкс), $gamma_pix$ – угловой размер пикселя (в рад) (для ТУСа $factor = 300.e-3*0.8 / 10e-3 = 24$ км/рад).
 $AZs(Nev, 1)$ – список азимутальных углов (в градусах).
 $ZNs(Nev, 1)$ – список зенитных углов (в градусах).
- `function [IDs_track, Rs_track] = FindTrackPixels(Theta, Nt)`
 Определение пикселей, через которые проходит трек с параметрами $Theta$. Дополнительно функция возвращает координаты точек трека.
 Nt – количество суб-тактов в такте (эквидистантное разбиение, используется для задания точек трека).
 $IDs_track[1, Ntr]$ – список пикселей, через которые прошел трек (Ntr – количество трековых пикселей).
 $Rs_track[Nt*DURATION, 2]$ – координаты точек трека ($DURATION=256$ – длительность развертки в тактах).

- `function IDs_nbr = FindSimuPixels(IDs_track, rings)`
 Определение сигнальных пикселей, т.е. тех, в которых будет генерироваться активный сигнал: для каждого идентификатора из списка `IDs` функция возвращает идентификаторы его “соседей” (`neighbours`) – пикселей (включая трековый), расположенных вокруг данного на расстоянии, не большем, чем `rings` “колец”.
`IDs_track[1,Ntr]` – список трековых пикселей.
`rings` – количество “колец” (по умолчанию `rings = 1`).
`IDs_nbr[1,Nnbr]` – список сигнальных пикселей.
- `function IDs = xy2id(Rs, PX_NBR)`
`function RCs = id2xy(IDs, PX_NBR)`
`function IDs = px2id(PXs, PX_NBR)`
`function PXs = id2px(IDs, PX_NBR)`
 Утилиты, осуществляющие прямые и обратные преобразования из идентификатора в координаты либо в системе ху-координат фотоприемника (с началом координат в центре фотоприемника), либо в рх-систему модуль-канал.
`PX_NBR[1,2]=[MD_NBR, CH_NBR]` – компоновка матрицы пикселей: первое число соответствует количеству модулей, второе – количеству каналов в нем (по умолчанию `PX_NBR = [16, 16]`).
`IDs[1,Nid]` – список идентификаторов пикселей (нумерация начинается с 1).
`PXs[2,Nid]` – список номеров модулей (первая строка) и каналов (вторая строка).
`RCs[N,2]` – список координат центров пикселей в СК фотоприемника.
- `function PlotPM(IDs, PX_NBR)`
`function PlotTrack(Theta, rings, PX_NBR)`
 Функции, осуществляющие прорисовку карты пикселей и выделение пикселей из списка `IDs`, а также отображение на ней трека `Theta`-события.
`IDs` – трековые и соседние с ними пиксели (выделены на карте).

`PX_NBR[1,2]=[MD_NBR, CH_NBR]` – компоновка матрицы пикселей: первое число соответствует количеству модулей, второе – количеству каналов в нем (по умолчанию `PX_NBR = [16, 16]`).
`rings` – количество “колец” (по умолчанию `rings = 1`).

- `function I = LightCurve(Theta, Nt)`
`function I = BiGauss(T, Ip, Tp, FDHM, alpha)`
Функция, формирующая кривую свечения – зависимость интенсивности свечения от времени, и ее утилита, осуществляющая параметризацию кривой.
`Nt` – количество суб-тактов в такте (эквидистантное разбиение).
`I [Nt*DURATION, 1]` – значения интенсивности кривой свечения в соответствующие суб-такты (`DURATION=256` – длительность временной развертки в тактах).
`T [Nt*DURATION, 1]` – моменты времени, соответствующие каждому суб-такту.
Параметры Би-Гауссовой кривой свечения:
`Ip` – максимальное значение интенсивности (максимум кривой свечения).
`Tp` – положение максимума во времени.
`FDHM` – full duration at half maximum.
`alpha` – асимметричность кривой свечения.
- `function Rs = PSF_gauss(Rs_centre, sigma, Nrays)`
Формирование гауссового изображения с заданным положением центроида и “сигма” (от англ. PSF – point spread function).
`Rs_centre [1,2]` – координаты центра пятна изображения (центроида).
`sigma[1,2]=[sigmaX, sigmaY]` – сигма-параметры гауссовой PSF.
`Nrays` – количество набрасываемых фотонов.
`Rs [Nrays,2]` – ху-координаты точек пятна изображения.
- `function sigma = diam2sigma (d, p)`
`function d = sigma2diam(sigma, p)`

Утилиты, осуществляющие преобразование из энергетического диаметра изображения в сигма-параметр двумерной гауссовой PSF и обратно.

`d` – диаметр кружка изображения с заданной долей энергии.

`p` – соответствующая доля энергии в кружке.

`sigma[1,2]` – сигма-параметр изотропной двумерной гауссовой PSF.

- `function EEs = EE(Rs, IDs)`

Определение доли энергии в квадратном пикселе (от англ. *Ensquared Energy*).

`Rs[Nrays, 2]` – координаты точек изображения (результат функции `PSF_gauss()`).

`IDs[1,Nid]` – список идентификаторов пикселей.

`EEs[1,Nid]` – доли энергии в соответствующих пикселях.

- `function SGNs = SimuSignal(IDs, Rs_track, LC, sigma, Nrays)`

`function SGNs = SimuSignal(IDs, Theta, Nt, sigma, Nrays)`

Генерация сигнала в пикселях из заданного списка. Вторая функция вызывает первую, предварительно сформировав массивы `Rs_track` и `LC` (вызывая соответственно `FindTrackPixels()` и `LightCurve()`).

`IDs[1, Nid]` – список идентификаторов пикселей, в которых будет генерироваться сигнал.

`Rs_track[N, 1]` – координаты центра изображения ($N = \text{DURATION} * N_t$, где N_t – количество суб-тактов в такте, используемое для построения трека и кривой свечения).

`LC[N, 1]` – кривая свечения в соответствующие суб-такты.

`sigma[1,2]` – сигма-параметр двумерной гауссовой PSF.

`Nrays` – количество набрасываемых фотонов.

`SGNs[DURATION, Nid]` – список сигналов (цифровых кодов в каждый такт).

- `function Events_bg = AddBG(Events0, BL, bg_type, NOISE, bg_seed)`

Генерация фонового сигнала.

`Events0[DURATION, ID_NBR, Nev]` – список активных сигналов для

N_{ev} событий. BL – среднее значение фонового сигнала.

`bg_type = 'gauss'` или `'poiss'` – тип шума.

$NOISE$ – стандартное отклонение фонового сигнала.

`bg_seed` – засеянное число для генератора случайных чисел (по умолчанию `bg_seed = 0`).

`Events_bg[DURATION, IDs_NBR, N_{ev}]` – массив фоновых сигналов по каждому из событий.

- `function Event = GenEvent(IDs, SGNs, Event_bg)`

Формирование события.

`IDs[1, Nid]` – список пикселей с активным сигналом.

`SGNs[DURATION, Nid]` – список активных сигналов, соответствующих `IDs`.

`Event_bg[DURATION, 256]` – список фоновых сигналов для всех 256 пикселей.

`Event[DURATION, 256]` – список 256 сигналов (значений цифрового сигнала во все такты).

- `function PlotSignals(SGNs, tau)`

Отображение сигналов из списка.

`SGNs[DURATION, Nid]` – список необходимых для отображения сигналов.

`tau` – длительность интервала дискретизации (если в мкс, то `tau=0.8`), если второй аргумент не указан, то временная шкала выводится в тактах).

A.2 Выделение события (распознавание образа)

- `function [BLs, NOISEs] = EstBG(SGNs, k_range)`

Оценка фона по заданному интервалу тактов.

`SGNs[DURATION, Nid]` – список сигналов, для которых производится оценка.

`k_range[2, Nid]` – список начальных и конечных тактов интерва-

ла оценки (если `k_range` имеет размер `[2,1]`, то интервал для всех сигналов одинаковый).

`BLs [1,Nid]` — список оценок базового уровня.

`NOISEs [1,Nid]` — список оценок шума.

- `function [SGNs_G, Gauss_pars] = FitGauss(SGNs, pars_start, pars_range, option)`

Аппроксимация сигнала функцией «Гаусс».

`SGNs [DURATION,Nid]` — список сигналов, для которых будет производиться аппроксимация (предварительно у сигналов необходимо вычесть шум).

`pars_start [1,3]` — начальные значения параметров аппроксимации.

`pars_range [2,3]` — область допустимых значений параметров аппроксимации (минимальное и максимальное значения).

`option` — опция `'plot'` строит графики исходных сигналов от времени и их аппроксимации (по умолчанию `option = ''`).

`SGNs_G [DURATION,Nid]` — список аппроксимированных сигналов.

`Gauss_pars [3,Nid]` — список параметров гауссовой аппроксимации (амплитуда, положение максимума и длительность на полуамплитуде) для каждого из сигналов списка.

- `function SGNs_smooth = MovingAverage(SGNs, M)`

Фильтрация сигналов из списка по скользящему среднему.

`SGNs [DURATION,Nid]` — список сигналов.

`M` — параметр усреднения (длительность в тактах).

`SGNs_smooth [DURATION,Nid]` — список отфильтрованных (сглаженных) сигналов.

- `function INDs_sel = FindHitPixels(SGNs, THRESHOLDs)`

Отбор сработавших пикселей по порогу.

`SGNs [DURATION,Nid]` — список сигналов (предварительно из сигнала

лов нужно вычесть шум).

`THRESHOLDS [1,Nid]` или `THRESHOLDS [1]` -- список пороговых значений (во втором случае – все пороги считаются одинаковыми).

`INDs_sel [1,Nsel]` – индексы отобранных пикселей.

- `function Thrs_hit = FindThrs_hit(Event, Nshit)`

Определение порога по заданному числу сработавших пикселей.

`Event [DURATION, IDs_NBR]` – список сигналов во всех 256 пикселях (событие).

`Nshit [1,Nh]` – заданные числа хитованных пикселей.

`Thrs_hit [1,Nh]` – соответствующие им пороги.

- `function SGN_sum = IntegralSignal(SGNs, BLs)`

Формирование интегрального сигнала по сигналам из списка.

`SGNs [DURATION, Nid]` – список сигналов.

`BLs [1, Nid]` – список их базовых уровней (по умолчанию `BLs` заполняется нулями).

`SGN_sum [DURATION, 1]` – интегральный сигнал.

- `function k_act = FindActWidthG(SGNs, THRESHOLDS, pars_start, pars_range, option)`

Определение окна активности - моментов времени, когда аппроксимированный гауссом сигнал `SGNs_G` превышает пороговое значение в первый раз – `k_act [1, :]` и в последний – `k_act [2, :]`.

`SGNs [DURATION, Nid]` – список сигналов (предварительно из сигналов нужно вычесть шум).

`THRESHOLDS [1, Nid]` – список пороговых значений.

`pars_start [1, 3]` – начальные значения параметров аппроксимации (амплитуда, положение максимума и длительность на полуамплитуде).

`pars_range [2, 3]` – область допустимых значений параметров аппроксимации.

`option` – опция, определяющая пороги: `THRESHOLDS` при `option='absolute'`
и
`maxSGNs*THRESHOLDS` при `option='relative'` (по умолчанию).
`k_act[2,Nid]` – окна активности.

А.3 Реконструкция события

- `function [U, RT] = RecoDir_LTA(IDs, SGNs, k_act, n)`
Реконструкция направления прихода методом LTA.
`IDs[1,Nid]` – идентификаторы отобранных пикселей.
`SGNs[DURATION,Nid]` – сигналы в отобранных пикселях.
`k_act[2,Nid]` – окна активности.
`n` – степень веса.
`U[1,2]` – компоненты скорости.
`RT[1,3] = [X_mean, Y_mean, T_mean]` – оценки координат и момента времени пика.

В Приложение. Базы данных модельных событий

Здесь приводится список баз данных модельных событий, использованных при выполнении дипломной работы. Представлено описание основных скриптов (драйверов) в виде m-файлов.

В.1 Базы данных параметрических событий

Во всех БД параметрических событий, если не сказано особо, точка максимума равномерно распределена в квадрате $[0.5, 1.0]_x \times [0.5, 1.0]_y$ и зафиксированы параметры: $T_p = 120$, $FDHM = 70$, $I_p = 100$, $\alpha = 1.0$.

Для получения данных БД вызывался макрос `Simulation.m`. Размер изображения d_{70} и число событий N_{ev} задаются в качестве аргументов, а параметры Theta корректируются внутри функции.

Пример вызова с $d_{70} = 1.5$ и $N_{ev} = 1000$:

```
[Events0, Thetas, AZs0, ZNs0] = Simulation(1.5, 1000);
```

В.1.1 Базы данных с фиксированным зенитным углом

БД, состоящие из 100 событий, которые используются для получения быстрых результатов (нет необходимости в большой статистике).

BD100_d15_Az30_Zn60: $\phi = 30^\circ$, $\theta = 60^\circ$.

BD100_d15_AzUnif_Zn30: $\phi \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta = 30^\circ$.

BD100_d15_AzUnif_Zn60: $\phi \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta = 60^\circ$.

BD100_d15_Az25to35_Zn60: $\phi \sim \text{Unif}[25^\circ, 35^\circ]$, $\theta = 60^\circ$.

БД из 1000 событий с фиксированными значениями зенитного и азимутального углов.

BD1000_d15_Az30_Zn60: $\phi = 30^\circ$, $\theta = 60^\circ$.

В.1.2 Базы данных с выделенным направлением

БД с равномерным распределением как азимутального, так и зенитного угла в 10-градусных бинах. Эти БД используются для изучения точности реконструкции в зависимости от азимутального угла.

BD500_d15_AzM5toP5_Zn55to65: $\phi \sim \text{Unif}[-5^\circ, 5^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[55^\circ, 65^\circ]$.

BD500_d15_Az10to20_Zn55to65: $\phi \sim \text{Unif}[10^\circ, 20^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[55^\circ, 65^\circ]$.

BD500_d15_Az25to35_Zn55to65: $\phi \sim \text{Unif}[25^\circ, 35^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[55^\circ, 65^\circ]$.

BD500_d15_Az40to50_Zn55to65: $\phi \sim \text{Unif}[40^\circ, 50^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[55^\circ, 65^\circ]$.

В.1.3 БД с равномерным распределением по азимуту

БД, в которых азимутальный угол распределен равномерно в области всех возможных значений угла (от -180° до 180°), а зенитный выбирается равномерно из 10-градусных бинов. В качестве центров бинов выбраны следующие значения зенитного угла: 75° , 60° , 45° , 30° , 15° . Эти БД используются для изучения точности реконструкции в зависимости от зенитного угла.

Размер изображения: $d_{70} = 1.5$

BD1000_d15_AzUnif_Zn70to80: $\phi \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[70^\circ, 80^\circ]$.

BD1000_d15_AzUnif_Zn55to65: $\phi \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[55^\circ, 65^\circ]$.

BD1000_d15_AzUnif_Zn40to50: $\phi \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[40^\circ, 50^\circ]$.

BD1000_d15_AzUnif_Zn25to35: $\phi \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[25^\circ, 35^\circ]$.

BD1000_d15_AzUnif_Zn10to20: $\phi \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[10^\circ, 20^\circ]$.

Размер изображения: $d_{70} = 1.0$

BD500_d10_AzUnif_Zn70to80: $\phi \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[70^\circ, 80^\circ]$.

BD500_d10_AzUnif_Zn55to65: $\phi \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[55^\circ, 65^\circ]$.

BD500_d10_AzUnif_Zn40to50: $\phi \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[40^\circ, 50^\circ]$.

BD500_d10_AzUnif_Zn25to35: $\phi \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[25^\circ, 35^\circ]$.

BD500_d10_AzUnif_Zn10to20: $\phi \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[10^\circ, 20^\circ]$.

Размер изображения: $d_{70} = 2.0$

BD500_d20_AzUnif_Zn70to80: $\phi \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[70^\circ, 80^\circ]$.

BD500_d20_AzUnif_Zn55to65: $\phi \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[55^\circ, 65^\circ]$.

BD500_d20_AzUnif_Zn40to50: $\phi \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[40^\circ, 50^\circ]$.

BD500_d20_AzUnif_Zn25to35: $\phi \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[25^\circ, 35^\circ]$.

BD500_d20_AzUnif_Zn10to20: $\phi \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[10^\circ, 20^\circ]$.

Реперная БД:

BD1000_d15_AzUnif_Zn55to65: $\phi \sim \text{Unif}[-180^\circ, 180^\circ]$, $\theta \sim \text{Unif}[55^\circ, 65^\circ]$,
 $d_{70} = 1.0$, $\alpha = 1.0$.

В.2 Базы данных AssymmetricGauss

БД событий с асимметричной кривой свечения. Используются для изучения точности реконструкции в зависимости от коэффициента асимметрии α .

BD500_d15_a05_Az25to35_Zn55to65: $\alpha = 0.5$.

BD500_d15_a2_Az25to35_Zn55to65: $\alpha = 2.0$.

В.3 Базы данных ESAF

БД модельных событий, сгенерированная с помощью пакета программ ESAF.

BD1000-esaf_Az40to60_Zn35to55: $E_0 \approx 1000$ ЭэВ, $\phi_0 \sim \text{Unif}[40^\circ, 60^\circ]$,
 $\theta_0 \sim \text{Unif}[35^\circ, 55^\circ]$.