

База данных событий ШАЛ

Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук (ИКФИА СО РАН)

Автор: Сабуров Артем Владимирович

Оглавление

Введение.....	3
1. Структурная схема базы данных событий ШАЛ.....	4
2. Список таблиц.....	7
2.1 Таблица array_configuration.....	7
2.2 Таблица showers.....	8
2.3 Таблица weather.....	8
2.4 Таблица arrival_direction.....	9
2.5 Таблица stations.....	9
2.6 Таблица master.....	10
2.6.1 Кодовые признаки участия или сбоя при определении оси ливня для мастерных станций.....	10
2.6.2 кодовые признаки участия или сбоя при реконструкции направления первичной частицы для мастерных станций.....	11
2.7 Таблица center.....	11
2.7.1 Кодовые признаки центральных станций.....	11
2.8 Таблица serenkov.....	11
2.8.1 Кодовые признаки черенковских детекторов.....	12
2.9 Таблица greisen_linsley.....	12
2.10 Таблица celestial_coordinates.....	12
3. Примеры выборки из базы данных.....	13
3.1 Выборка событий с заданными параметрами.....	13
3.2 Просмотр параметров атмосферы за сезон.....	14
3.3 Представление широкого атмосферного ливня в базе данных.....	17
3.4 Выборка событий по астрономическим координатам и энергии.....	21
Список литературы.....	24

Введение

По сложившейся терминологии первичное космическое излучение с энергией E_0 выше $\sim 10^{14}$ эВ называется космическими лучами сверхвысоких энергий (КЛСВЭ). Выделение этой области в отдельное направление в основном связано со специфической методикой исследований, основанной на регистрации и изучении свойств образующихся при таких энергиях широких атмосферных ливней (ШАЛ). За счет ядерных и электромагнитных взаимодействий уже в верхних слоях атмосферы начинается и развивается вглубь лавинообразный процесс образования мощного потока вторичных элементарных частиц и коррелированного с ним электромагнитного излучения. В глубине атмосферы такие потоки, которые и называются широкими атмосферными ливнями, достигают больших поперечных размеров. Для самых больших энергий вблизи поверхности земли наблюдается 10^{10} и более заряженных частиц, падающих практически одновременно на площадь в несколько квадратных километров. Метод ШАЛ на сегодня один из основных и светосильных в области $10^{14} - 10^{15}$ эВ, а при $E_0 > 10^{17}$ эВ из-за очень низкой интенсивности является единственно возможным способом исследования первичного излучения [1].

Якутская комплексная установка ШАЛ [2-4] представляет собой стационарный научно-исследовательский полигон ИКФИА СО РАН. Она была создана как комплексный детектор широких атмосферных ливней и ведет систематическую регистрацию потока космических лучей с энергией выше 10^{17} эВ. Основу Якутской установки составляют отдельные станции наблюдения (см. Рис.1), в которых установлено по 2 сцинтилляционных счетчика площадью 2 м^2 каждый и приемник черенковского излучения на основе одного или нескольких ФЭУ-49. Одновременное срабатывание обоих детекторов заряженных частиц является локальным триггером для обработки информации на станции.

Отбор ливневых событий производится при одновременном срабатывании трех соседних станций. Большая часть станций расположена так, что они образуют сетку из правильных треугольников со стороной 1000 м. Набор таких треугольников покрывающий полную площадь установки составляет т.н. триггер-1000, эффективно отбирающий события начиная с энергии $(2-3) \times 10^{18}$ эВ. Остальные станции расположены на расстоянии 500 м от центральной, вместе с которой образуют триггер-500 с порогом менее 10^{17} эВ.

В центральном круге радиусом 250 м сцинтилляционные и черенковские детекторы объединены в отдельную независимую установку, отбирающую события с энергиями $10^{15} - 10^{16}$ эВ по совпадениям сигналов от 3 соседних детекторов черенковского света. Таким образом, центральные детекторы Якутской установки составляют независимую малую уста-

новку, в которой ливни отбираются по потоку черенковского излучения, а с помощью сцинтилляционных детекторов возможно измерение потока заряженных частиц.

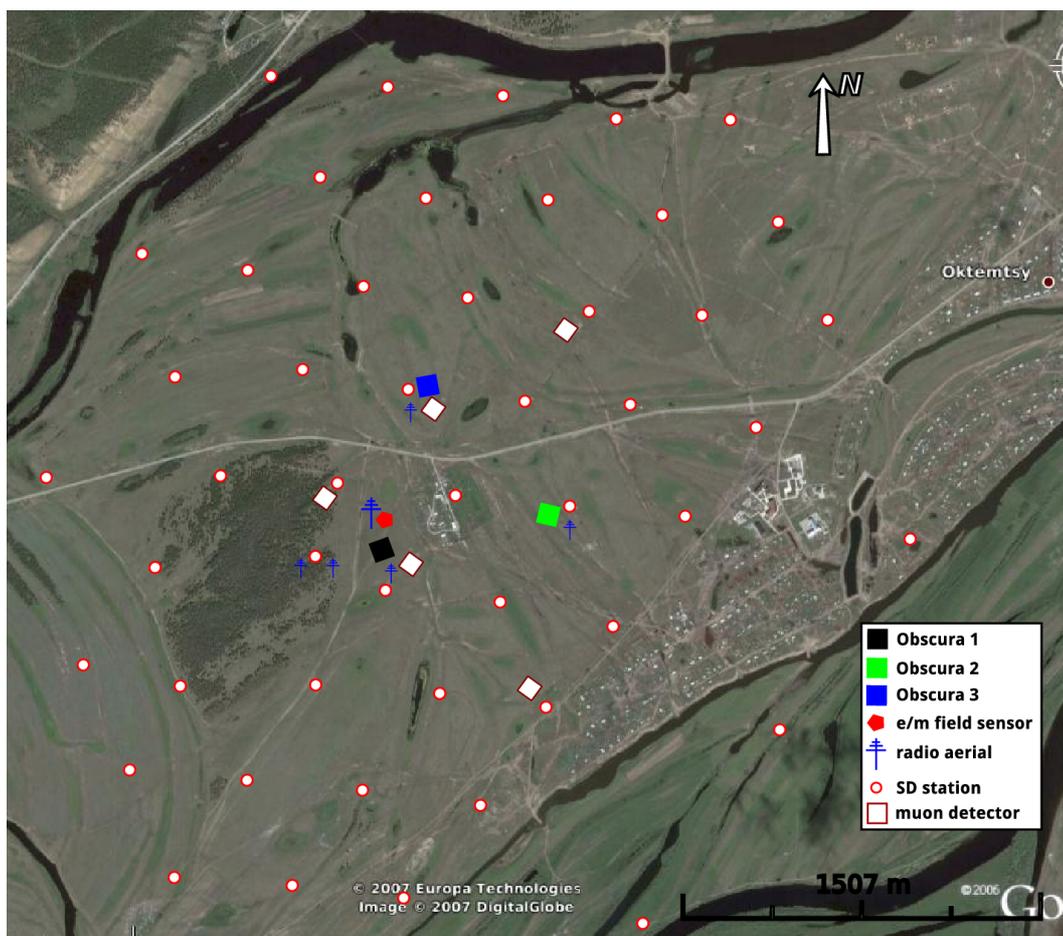


Рис.1: План Якутской установки ШАЛ. Красными кружками обозначены сцинтилляционные станции наблюдения, красными квадратами - мюонные детекторы. Также показаны новые инструменты, недавно введенные в строй: трековые детекторы черенковского излучения на основе камеры-обскуры и антенны для регистрации радиоизлучения ШАЛ.

В центральном круге радиусом 1 км установлено 5 подземных пунктов (энергетический порог 1 ГэВ), регистрирующих мюонную компоненту ШАЛ. Кроме того, в последние годы в состав установки вошли трековые детекторы черенковского света на основе камеры-обскуры, были начаты работы по регистрации радиоизлучения ШАЛ.

1. Структурная схема базы данных событий ШАЛ

База данных (БД) событий ШАЛ предназначена для хранения, обновления и предоставления данных по событиям широких атмосферных ливней (далее — событие), вызываемых космическими лучами сверхвысоких энергий, зарегистрированных Якутской комплексной установкой ШАЛ. Она обеспечивает стандартизованный, оперативный и цен-

трализованный доступ к экспериментальным данным ЯКУ ШАЛ.

Данная БД реализована на основе СУБД Postgresql [5]. Структурно, она представляет собой несколько таблиц, сгруппированных в соответствии со спецификой эксперимента (см. Рис.2). Так как атмосферный ливень представлен в показаниях множества детекторных станций наблюдения для различных типов элементарных частиц (электромагнитной, заряженной, мюонной компонент ШАЛ, а также детекторов Черенковского излучения), распределенных по площади $\sim 11 \text{ км}^2$, показания этих станций отражены в соответствующих таблицах (таблицы *master*, *center* и *cerenkov*). Сами показания в этих таблицах хранятся в массивах, длина которых равна полному числу станций установки на момент регистрации. В случае отсутствия показаний (станция не сработала), соответствующие элементы этих массивов заполняются отрицательными числами (-1.0). Для геометрической реконструкции (определения оси ливня, т.е. нахождения точки пересечения траектории первичной частицы, вызвавшей ШАЛ, с плоскостью установки) и дальнейшего анализа необходимо знать координаты каждой станции наблюдения. Эти координаты (равно как и другая информация о станциях) хранятся в таблице *array_configuration* в виде массивов, длина которых равна полному числу станций установки на момент регистрации события.

Каждый элемент массивов в колонках таблицы *array_configuration* соответствует элементам массивов в колонках таблиц *master*, *center* и *cerenkov*. Таким образом, номер элемента массива является номером станции, что позволяет обращаться к данными конкретной станции непосредственно с помощью языка запросов SQL¹, например для мониторинга аппаратных сбоев станции в течение рассматриваемого периода. Связь показаний станций в событии с конфигурацией установки осуществляется через колонку *conf_id* (первичный ключ в таблице *array_configuration*, внешний ключ в таблице *stations*).

Каждому событию в БД назначен уникальный идентификатор (*id*), генерируемый на основе мирового даты-времени регистрации события (колонка *ut* в таблице *showers*). Этот идентификатор является первичным ключом в таблице *showers* и других таблицах (см. Рис.2) и, в то же время, в других таблицах он является внешним ключом, ссылающимся на колонку *id* в таблице *showers*, обеспечивая таким образом целостность данных.

Далее приводится подробное описание таблиц БД и их полей.

¹ Точнее, расширения стандарта языка SQL, используемого в СУБД Postgresql, позволяющего обращаться к элементам массива.

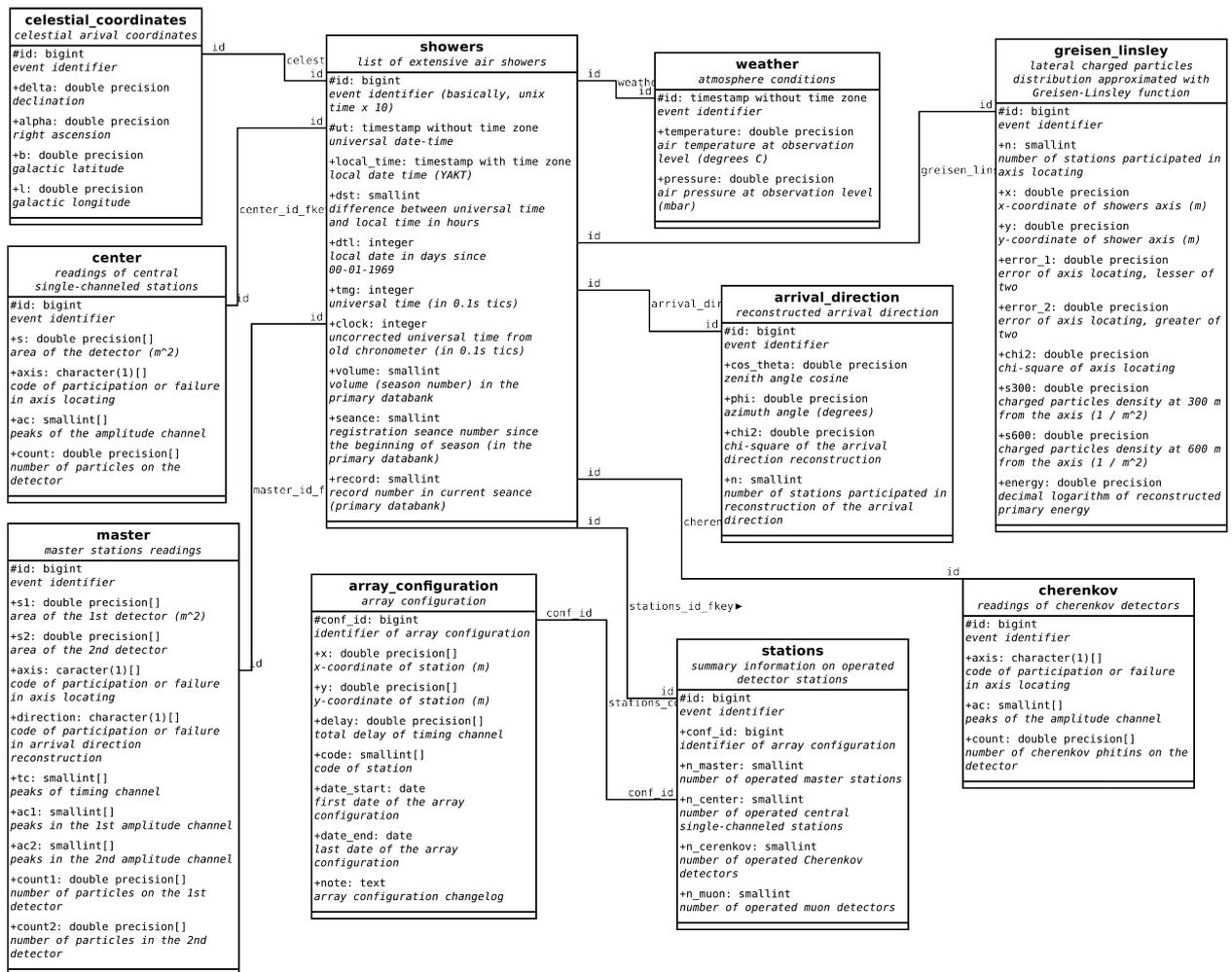


Рис.2: Структурная схема базы данных событий ШАЛ. Показаны таблицы базы данных с полями и комментариями. Ломаными линиями показаны соединения таблиц через внешние ключи, обеспечивающие целостность данных.

2. Список таблиц

2.1 Таблица *array_configuration*

Таблица *array_configuration* содержит описание конфигурации установки в разные периоды работы.

колонка	тип	ограничение	описание
<code>conf_id</code>	<code>bigint</code>	PRIMARY KEY	идентификатор периода с соответствующей конфигурацией установки
<code>x</code>	<code>double precision[]</code>		координаты <i>x</i> детекторов установки (м)
<code>y</code>	<code>double precision[]</code>		координаты <i>y</i> детекторов установки (м)
<code>delay</code>	<code>double precision[]</code>		полная задержка временного канала (ед. 100 нс)
<code>code</code>	<code>smallint[]</code>		кодировый признак станции
<code>date_start</code>	<code>date</code>		начало периода действия конфигурации
<code>date_end</code>	<code>date</code>		окончание периода действия конфигурации
<code>note</code>	<code>text</code>		описание изменений в конфигурации

Кодовые признаки станций:

- 1 - мастерная станция с начальным вариантом электроники станции наблюдения (ЭСН): 2 счетчика суммируются на входе одного преобразователя и имеют один амплитудный канал. В такой конфигурации работали станции ШАЛ-13 некоторый период (2-6 до 1985 г.);
- 2 - мастерная станция со стандартным вариантом ЭСН с 2 счетчиками и 2 амплитудными каналами. В данное время все мастерные станции первой очереди;
- 3 - мастерная станция, в которой установлен 1 счетчик в режиме с пониженной фоновой загрузкой. Имеет более высокий порог срабатывания, чем два первых. По этому варианту работали 6 станций с 1979 г. по 1985 г. (36-41);
- 4 - станция сгущения с 1 счетчиком;
- 5 - станция сгущения с 2 счетчиками;
- 6 - отдельный канал (секция) мюонного детектора, площадь от 2.25 м² до 6.75 м² в зависимости от номера секции и времени регистрации;
- 7 - детектор суперсгущения площадью 0.25 м²;
- 8 - отсутствует, либо демонтирована;
- 11 - связан с ливнями 74-77 гг., которые записаны в банк с перфолент, на которых записаны отобранные ливни по жесткому критерию и выводились плотности на м², а не

показания в числе частиц на всю площадь;

12 мастерная станция второй очереди аналогичная 2, но ЭСН может иметь до 12 каналов информации.

2.2 Таблица *showers*

Таблица *showers* содержит список зарегистрированных событий ШАЛ.

КОЛОНКА	ТИП	ОГРАНИЧЕНИЕ	ОПИСАНИЕ
id	bigint	PRIMARY KEY	идентификатор зарегистрированного события ШАЛ
ut	timestamp without time zone	UNIQUE NOT NULL	мировое время
local_time	timestamp with time zone		местное время
dst	smallint		разница между мировым и местным временем в часах
dtl	integer		местная дата в днях, прошедших с 31.12.1968
tmg	integer		мировое время (ед. 0.1 с)
clock	integer		неисправленное мировое время по показаниям старого хронометра (ед. 0.1 с)
volume	integer		номер тома (сезона регистрации) в первичном банке данных
seance	smallint		номер сеанса регистрации с начала сезона в первичном банке данных
record	smallint		номер записи в текущем сеансе в первичном банке данных

2.3 Таблица *weather*

Таблица *weather* содержит информацию об атмосферных условиях (температура, давление) для каждого зарегистрированного события, оказывающих влияние на развитие атмосферного ливня.

КОЛОНКА	ТИП	ОГРАНИЧЕНИЕ	ОПИСАНИЕ
id	bigint	PRIMARY KEY, FOREIGN KEY REFERENCES showers(id) ON UPDATE CASCADE ON DELETE CASCADE	идентификатор зарегистрированного события ШАЛ
temperature	double precision		температура (°C)

<code>pressure</code>	<code>double precision</code>		давление (мбар)
-----------------------	-------------------------------	--	-----------------

2.4 Таблица *arrival_direction*

Таблица *arrival_direction* содержит реконструированные направления первичных частиц КЛСВЭ, инициировавших ШАЛ.

колонка	тип	ограничение	описание
<code>id</code>	<code>bigint</code>	PRIMARY KEY, FOREIGN KEY REFERENCES <code>showers(id) ON</code> <code>UPDATE CASCADE</code> <code>ON DELETE</code> <code>CASCADE</code>	идентификатор зарегистрированного события ШАЛ
<code>cos_theta</code>	<code>double precision</code>		косинус зенитного угла
<code>phi</code>	<code>double precision</code>		азимутальный угол (град)
<code>chi2</code>	<code>double precision</code>		Хи-квадрат полученного направления прихода первичной частицы
<code>n_stations</code>	<code>smallint</code>		число станций, принимавших участие в определении направления прихода первичной частицы

2.5 Таблица *stations*

Таблицы *stations* содержит список и описание сработавших при регистрации события детекторных станций. Через внешний ключ `conf_id` осуществляется связь с конфигурацией установки на момент регистрации события.

колонка	тип	ограничение	описание
<code>id</code>	<code>bigint</code>	PRIMARY KEY, FOREIGN KEY REFERENCES <code>showers(id) ON</code> <code>UPDATE CASCADE ON</code> <code>DELETE CASCADE</code>	идентификатор зарегистрированного события ШАЛ
<code>conf_id</code>	<code>bigint</code>	FOREIGN KEY REFERENCES <code>array_configuration</code> <code>(conf_id) ON UPDATE</code> <code>CASCADE ON DELETE</code> <code>CASCADE</code>	идентификатор периода с соответствующей конфигурацией установки
<code>n_master</code>	<code>smallint</code>		число сработавших мастерных станций
<code>n_center</code>	<code>smallint</code>		число сработавших одноканальных станций центрального сгущения
<code>n_cerenkov</code>	<code>smallint</code>		число сработавших детекторов

			черенковского света
n_muon	smallint		число сработавших мюонных детекторов

2.6 Таблица master

Таблица **master** содержит показания мастерных станций (т.е. сцинтилляционных детекторных станций, участвующих в отборе событий).

колонка	тип	ограничение	описание
id	bigint	PRIMARY KEY, FOREIGN KEY REFERENCES showers(id) ON UPDATE CASCADE ON DELETE CASCADE	идентификатор зарегистрированного события ШАЛ
s1	double []		площадь первого детектора (м ²)
s2	double		площадь второго детектора (м ²)
axis	character (1) []		кодировый признак участия или сбоя при определении оси ливня
direction	character (1) []		кодировый признак участия или сбоя при реконструкции направления первичной частицы
tc	smallint []		аппаратные показания временного канала
ac1	smallint []		аппаратные показания первого амплитудного канала
ac1	smallint []		аппаратные показания второго амплитудного канала
count1	double precision []		число частиц на всю площадь первого детектора
count2	double precision []		число частиц на всю площадь второго детектора

2.6.1 Кодовые признаки участия или сбоя при определении оси ливня для мастерных станций

'0' - не участвовала;

'+' - участвовала, плотность частиц определена по обоим детекторам;

'1' - участвовала, плотность частиц определена по первому детектору;

'2' - участвовала, плотность частиц определена по второму детектору;

'D' - из списка для определения удалил оператор.

2.6.2 кодовые признаки участия или сбоя при реконструкции направления первичной частицы для мастерных станций

'0' - не участвовала;

'+' - участвовала;

'E' - сбой временного канала, определила программа;

'D' - из списка для определения удалил оператор.

2.7 Таблица center

Таблица **center** содержит показания одноканальных станций центрального сгущения, не участвующих в отборе событий.

колонка	тип	ограничение	описание
id	bigint	PRIMARY KEY, FOREIGN KEY REFERENCES showers(id) ON UPDATE CASCADE ON DELETE CASCADE	идентификатор зарегистрированного события ШАЛ
s	double precision[]		площадь детектора (м ²)
axis	character(1) []		кодовый признак участия или сбоя при определении оси
ac	smallint[]		аппаратные показания амплитудного канала
count	double precision[]		число частиц на всю площадь детектора

2.7.1 Кодовые признаки центральных станций

'0' - не участвовала;

'+' - участвовала;

'D' - из списка для определения удалил оператор.

2.8 Таблица cerenkov

Таблица **cerenkov** содержит показания детекторов черенковского света.

колонка	тип	ограничение	описание
id	bigint	PRIMARY KEY, FOREIGN KEY REFERENCES showers(id) ON UPDATE CASCADE ON DELETE CASCADE	идентификатор зарегистрированного события ШАЛ
axis	character(1) []		кодовый признак участия или сбоя при определении оси
ac	smallint[]		аппаратные показания амплитудного канала

count	double precision[]		плотность фотонов
-------	-----------------------	--	-------------------

2.8.1 Кодовые признаки черенковских детекторов

- '0' - не участвовал;
- '+' - участвовал;
- 'D' - из списка для определения удалил оператор.

2.9 Таблица *greisen_linsley*

Таблица **greisen_linsley** содержит результаты геометрической реконструкции зарегистрированных ливней (координаты оси ливня на плоскости установки) и их классификационные параметры (плотность заряженных частиц на расстояниях 300 м и 600 м, первичная энергия), определенные при фитировании функции пространственного распределения заряженных частиц в аппроксимации Грейзена-Линсли.

колонка	тип	ограничение	описание
id	bigint	PRIMARY KEY, FOREIGN KEY REFERENCES showers(id) ON UPDATE CASCADE ON DELETE CASCADE	идентификатор зарегистрированного события ШАЛ
n	smallint		число станций, принимавших участие в определении оси
x	double precision		координата x оси ливня (м)
y	double precision		координата y оси ливня (м)
error_1	double precision		ошибка лоцирования оси, меньшая из двух
error_2	double precision		ошибка лоцирования оси, меньшая из двух
chi2	double precision		Хи-квадрат определения оси
s300	double precision		плотность заряженных частиц на расстоянии 300 м от оси (м ⁻²)
s600	double precision		плотность заряженных частиц на расстоянии 600 м от оси (м ⁻²)
energy	double precision		десятичный логарифм первичной энергии (в эВ), оцененный калориметрическим методом

2.10 Таблица *celestial_coordinates*

Таблица **celestial_coordinates** содержит реконструированные направления

прихода первичных частиц на небесной сфере.

колонка	тип	ограничение	описание
id	bigint	PRIMARY KEY, FOREIGN KEY REFERENCES showers(id) ON UPDATE CASCADE ON DELETE CASCADE	идентификатор зарегистрированного события ШАЛ
delta	double precision		склонение
alpha	double precision		прямое восхождение
b	double precision		галактическая широта
l	double precision		галактическая долгота

3. Примеры выборки из базы данных

3.1 Выборка событий с заданными параметрами

Задача:

Выбрать из базы данных мировое время регистрации, косинус зенитного угла направления прихода, координаты оси, плотность заряженных частиц на расстояниях 300 и 600 м, первичную энергию, число сработавших мастерных и центральных станций ливней с энергией не менее 3.16×10^{18} эВ, с косинусом зенитного угла направления прихода не менее 0.95 (угол не более $\sim 18.2^\circ$), осью, удаленной не более 950 м от центра установки и числом сработавших мастерных станций не менее 10.

Запрос:

```
SELECT showers.ut, arrival_direction.cos_theta,
       greisen_linsley.x, greisen_linsley.y,
       greisen_linsley.s300, greisen_linsley.s600,
       greisen_linsley.energy,
       stations.n_master, stations.n_center
FROM showers, arrival_direction, greisen_linsley, stations
WHERE arrival_direction.id=showers.id AND
       greisen_linsley.id=showers.id AND
       stations.id=showers.id AND
       greisen_linsley.energy>=18.5 AND
       arrival_direction.cos_theta>=0.95 AND
       stations.n_master>=10 AND
       (SELECT SQRT(greisen_linsley.x^2+greisen_linsley.y^2))<=950;
```

Результат выполненного запроса:

ut	cos_theta	x	y	s300	s600	energy	n_master	n_center
1995-12-25 20:49:32	0.96	227	812	63.55	6.78	18.52	15	7
1996-11-03 02:05:07.4	0.95	-375	-576	65.87	7.14	18.54	14	8
1997-12-17 17:08:41.8	0.95	793	-181	55.42	5.93	18.50	14	4
1997-12-20 00:12:53.5	0.95	117	71	61.04	6.52	18.55	15	5
1998-01-03 06:41:37.8	0.95	59	160	71.11	7.61	18.58	23	9
1998-02-02 11:09:56.1	0.97	404	528	64.48	6.81	18.51	12	7
.
2007-12-22 00:29:26	0.99	-498	774	77.55	7.88	18.59	16	5
2008-01-20 22:23:49	0.98	-543	632	70.31	7.28	18.55	17	7
2008-02-11 20:56:01	0.99	-390	554	99.65	9.10	18.70	19	8
2008-03-03 05:15:58	0.98	387	324	86.20	9.02	18.60	16	9

(34 rows)

3.2 Просмотр параметров атмосферы за сезон

Характеристики развития ядерного и электромагнитного каскада определяются, в том числе, плотностью среды, в которой оно происходит. Такой средой является атмосфера, поэтому для описания ее влияния на развитие ШАЛ используется т.н. Мольеровский радиус (r_m), характеризующий рассеяние электронов в воздухе. Мольеровский радиус определяется через температуру и давление:

$$r_m = 75 \cdot \left(\frac{T}{273} \right) \cdot \left(\frac{1000}{p} \right) \text{ (м)},$$

где T - температура по шкале Кельвина, p - давление в миллибарнах.

Зная температуру и давление, можно посмотреть, как меняются атмосферные условия в течение одного сезона наблюдения.

Задача:

Просмотреть сезонный ход температуры, давления и Мольеровского радиуса в течение сезона наблюдений 2007-2008 гг.

Запрос:

```
SELECT showers.ut, weather.temperature, weather.pressure
FROM showers, weather
ЦПУКУ weather.id = showers.id AND
      showers.ut > '2007-08-01' AND
      showers.ut < '2008-07-01';
```

Результат выполненного запроса:

ut	temperature	pressure
2007-09-09 23:49:26	6	998
2007-09-10 00:56:41	7	999
2007-09-10 01:34:23	8	999
2007-09-10 02:53:53	7	999

```

2007-09-10 03:33:23 |      8 |    999
. . .
2008-06-23 00:59:40 |     24 |    992
2008-06-23 01:23:51 |     24 |    992
2008-06-23 01:25:51 |     24 |    992
2008-06-23 01:33:15 |     24 |    992
(131410 rows)

```

Имея таблицу с данными, можно графически отобразить сезонные колебания атмосферных параметров (см. Рис.3, Рис.4), а зная выражение для получения Мольеровского радиуса, можно изобразить и его (см. Рис.5).

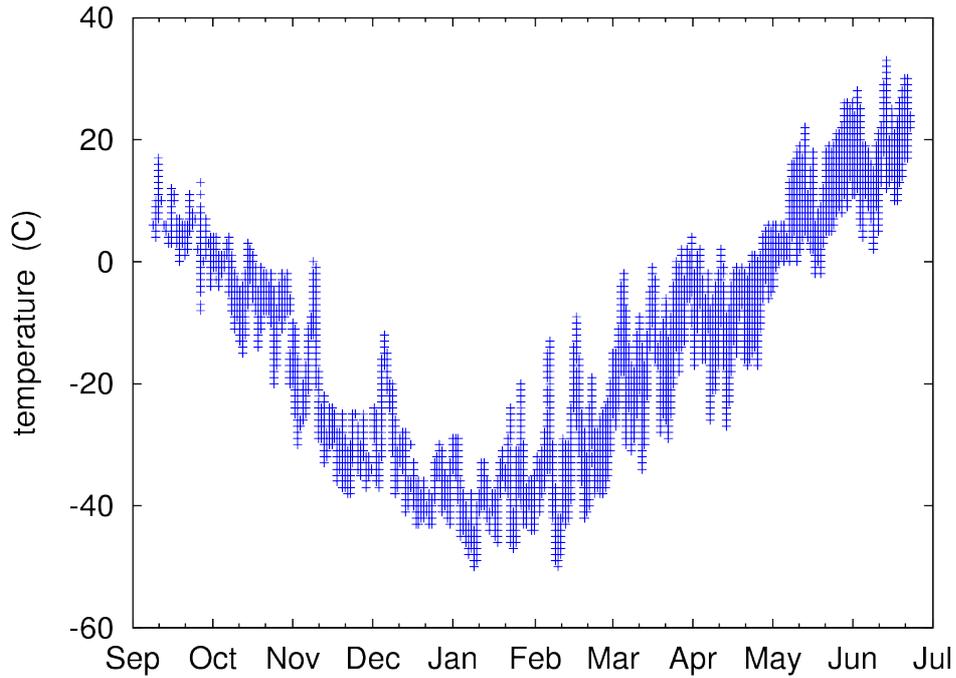


Рис.3: Сезонные изменения температуры воздуха в течение регистрационного сезона 2007-2008.

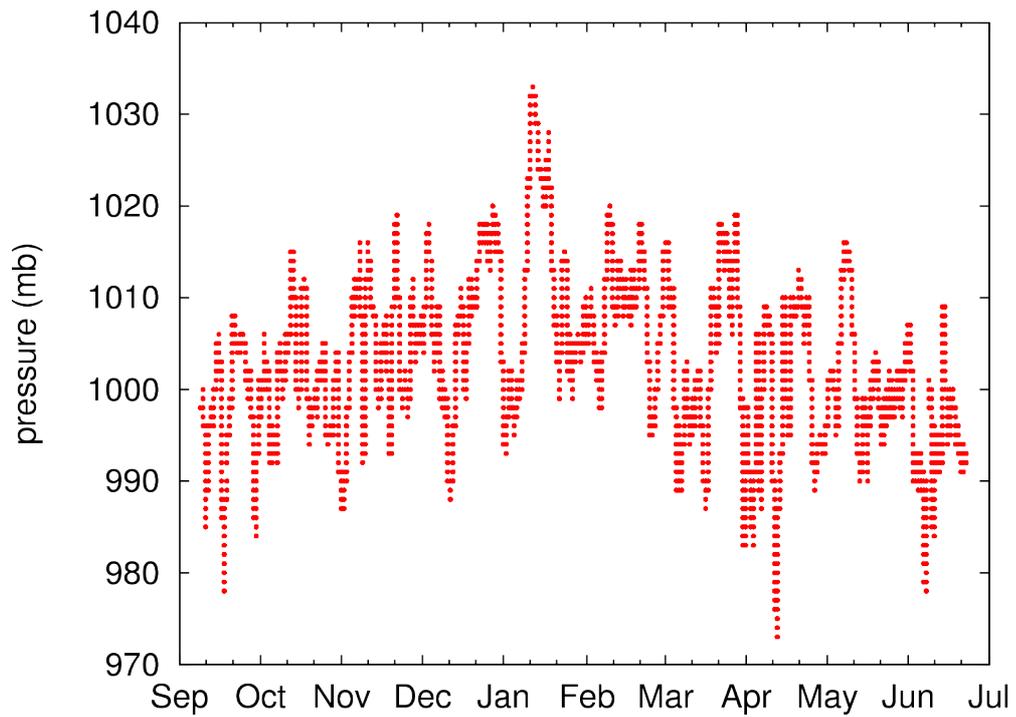


Рис.4: Сезонные изменения атмосферного давления в течение сезона 2007-2008.

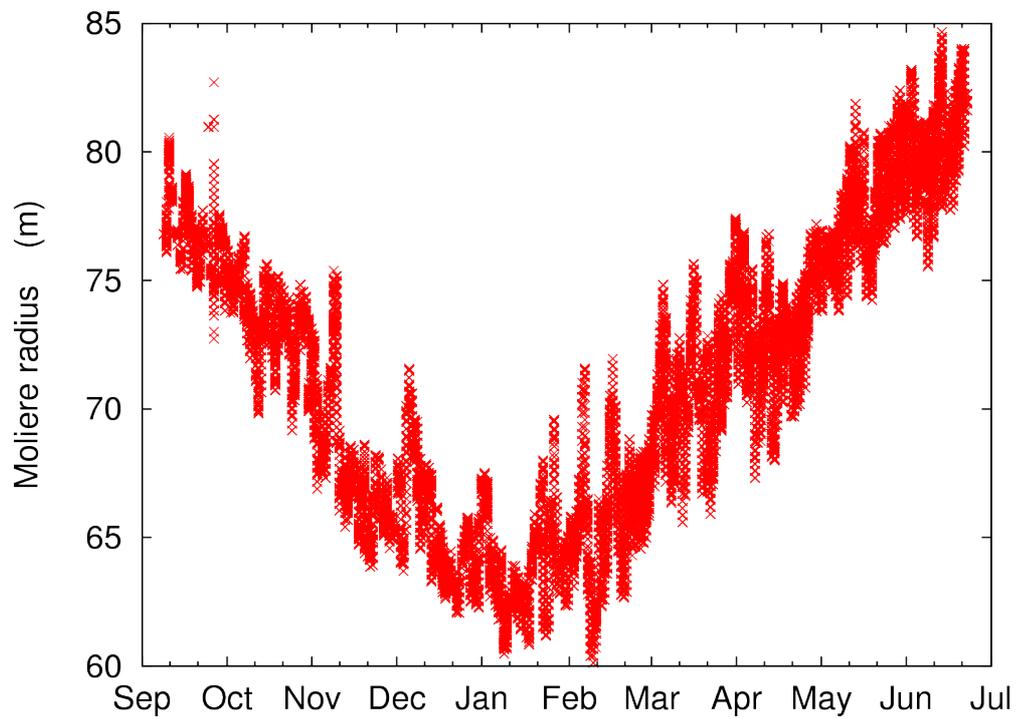


Рис.5: Изменение Молеровского радиуса в течение регистрационного сезона 2007-2008.

3.3 Представление широкого атмосферного ливня в базе данных

В разделе 3.1 мы рассмотрели выборку ливней сверхвысоких энергий ($\log E_0 \geq 18.5$). Среди них есть ливень с энергией выше 10^{19} эВ, с осью, определенной по 31 мастерной станции. Рассмотрим представление основных параметров этого ливня в базе данных, а также показания мастерных станций и станций центрального сгущения, измеряющих заряженную компоненту (по сути - отображение пространственного распределения заряженных частиц в этом ливне). Для этого необходимо выполнить запрос данных нескольких таблиц с соединением.

Задача:

Отобразить основную информацию о ливне с идентификатором **id=8558367095**: дату регистрации, параметры атмосферы, направление прихода первичной частицы, результаты геометрической реконструкции и полученные характеристические параметры - плотность частиц на расстоянии 300, 600 м от оси и оцененную первичную энергию. Отобразить пространственное распределение заряженных частиц и ее параметризацию, полученную в аппроксимации Грейзена-Линсли.

Запрос:

```
SELECT showers.ut, weather.temperature, weather.pressure,
    arrival_direction.cos_theta, arrival_direction.phi,
    arrival_direction.chi2 AS chi2_dir,
    arrival_direction.n AS n_dir,
    greisen_linsley.n AS n_ax,
    greisen_linsley.x, greisen_linsley.y,
    greisen_linsley.axis_error_1 AS e1_ax,
    greisen_linsley.axis_error_2 AS e2_ax,
    greisen_linsley.axis_chi2 AS chi2_ax,
    greisen_linsley.s300, greisen_linsley.s600,
    greisen_linsley.energy,
    stations.n_master, stations.n_center,
    master.s1, master.s2,
    master.axis AS m_code_ax,
    master.direction AS code_dir,
    master.count1,
    master.count2,
    center.s,
    center.axis AS c_code_ax,
    center.count,
    array_configuration.x,
```

```

array_configuration.y
FROM showers, weather, arrival_direction, greisen_linsley,
stations, master, center, array_configuration
WHERE stations.conf_id=array_configuration.conf_id AND
stations.id=showers.id AND weather.id=showers.id AND
arrival_direction.id=showers.id AND greisen_linsley.id=showers.id AND
master.id=showers.id AND center.id=showers.id AND
showers.id=8558367095;

```

Результаты выполненного запроса:

Поскольку результат запроса представляет собой большую таблицу, многие из колонок в которой содержат длинные массивы, для отображения результатов лучше воспользоваться каким-нибудь скриптом, например на языке Python, который с помощью драйвера СУБД Postgresql пошлет запрос в БД, получит результат, разберет его по колонкам и представит в удобном нам виде.

Основная информация о ливне:

```

date: 1997-02-13 21:25:09.5
t=-37 (C)  p= 999 (mb)  Rm=64.9001 (m)
theta=13.1438 (deg)  phi= 183.1525 (deg)  chi^2=27.00  determined by 14 stations
axis: ( 578, 801)  errors: (10.60, 11.60)  chi^2=38.90  determined by 31 stations
s300=6.168448e+02 (1/m^2)  s600=5.923397e+01 (1/m^2)  E0=2.8196*10^19 eV
stations:  master=31,  center=9

```

Показания мастерных станций:

n_st	s1	s2	code_ax	code_dir	count1	count2	x	y
1	2.0	2.0	+	+	3.147545e+01	2.156978e+01	0	0
2	2.0	2.0	+	+	6.472768e+01	3.464619e+01	498	-3
3	2.0	2.0	+	D	4.045104e+00	3.991671e+00	246	-430
4	2.0	2.0	+	+	8.499265e+00	3.402316e+00	-258	-432
5	2.0	2.0	+	+	3.363905e+00	6.409519e+00	-502	1
6	2.0	2.0	+	+	1.787224e+01	2.803813e+01	-250	445
7	2.0	2.0	+	E	2.880495e+02	2.206811e+02	251	437
8	2.0	2.0	+	+	2.407115e+01	3.591761e+01	968	2
12	2.0	2.0	+	+	1.804786e+01	1.203995e+01	-515	874
13	2.0	2.0	0	+	3.681611e+03	3.504891e+03	494	859
15	2.0	2.0	0	0	2.085062e+00	3.464268e+00	1532	-856
23	2.0	2.0	+	D	1.857105e+01	8.704573e+00	59	1719
24	2.0	2.0	+	+	2.572212e+01	8.028362e+00	994	1724
25	2.0	2.0	+	D	3.749128e+01	3.586965e+01	1502	858
36	2.0	2.0	+	D	4.936870e+02	7.025861e+02	714	464
37	2.0	2.0	+	+	2.044792e+01	2.986157e+00	748	-381
39	2.0	2.0	0	E	0.000000e+00	0.000000e+00	-725	-454

40		2.0		2.0		+		D		7.356020e+00		5.840868e+00		-558		334
41		2.0		2.0		+		+		2.020960e+02		3.281276e+02		56		859
42		2.0		2.0		+		D		5.901103e+01		6.981480e+01		1253		433
43		2.0		2.0		+		D		1.932813e+01		6.672747e+00		1485		-7
44		2.0		2.0		+		+		5.025434e+00		3.908818e+00		1236		-404
48		2.0		2.0		0		0		2.432537e+00		8.840715e-01		-1503		0
49		2.0		2.0		0		0		7.204083e-01		3.773407e+00		-1343		474
50		2.0		2.0		0		0		3.367633e+00		2.568317e+00		-996		867
51		2.0		2.0		+		D		1.726496e+01		1.964076e+01		-286		1288
52		2.0		2.0		0		E		0.000000e+00		1.874486e-01		264		1307
53		2.0		2.0		+		+		2.185423e+02		2.347210e+02		766		1291
54		2.0		2.0		+		D		5.714224e+02		6.110016e+02		956		866
55		2.0		2.0		+		+		1.387172e+01		1.188350e+01		1703		401
59		2.0		2.0		+		D		3.356627e+01		4.146922e+01		1246		1286

Показания одноканальных станций центрального сгущения:

n_st	s	code_ax	count	x	y					
81		2.0		+		3.391471e+01		98		-7
82		2.0		+		6.166207e+01		261		-7
83		2.0		+		9.757189e+00		116		-218
84		2.0		0		2.463255e+00		-55		-96
85		2.0		+		1.010118e+01		-138		-235
86		2.0		0		2.801441e+00		-273		2
87		2.0		+		3.575780e+01		-55		82
88		2.0		+		6.404415e+01		-138		249
89		2.0		+		7.094321e+01		126		217

Получив показания сработавших станций можно нарисовать план установки, отобразив на нем сработавшие станции (см. Рис.6).

Зная направление прихода первичной частицы, можно преобразовать координаты станций и полученной оси в плоскость ливня и, подсчитав плотность частиц на каждой станции, нарисовать пространственное распределение заряженной компоненты данного ливня (Рис.7). На том же рисунке показано полученное аналитическое описание пространственного распределения заряженной компоненты, полученное в аппроксимации Грейзена-Линсли [6]:

$$\rho(r) = N_{ch} \cdot \left(\frac{r}{r_M} \right)^{-1} \cdot \left(1 + \frac{r}{r_M} \right)^{1-\beta},$$

где N_{ch} - число, связанное с полным числом заряженных частиц в ливне, r_M - Мольеровский радиус, β - параметр, характеризующий крутизну спада плотности с расстоянием, вычисляемый как:

$$\beta(\theta, s_{600}) = 1.38 + 2.16 \cdot \cos \theta + 0.15 \cdot \log_{10} s_{600}.$$

Все классификационные параметры ливня (s_{600} , параметр крутизны) были найдены во время геометрической реконструкции, давшей координаты оси ливня. Первичная энергия E_0 была оценена калориметрическим методом по плотности на расстоянии 600 м s_{600} .

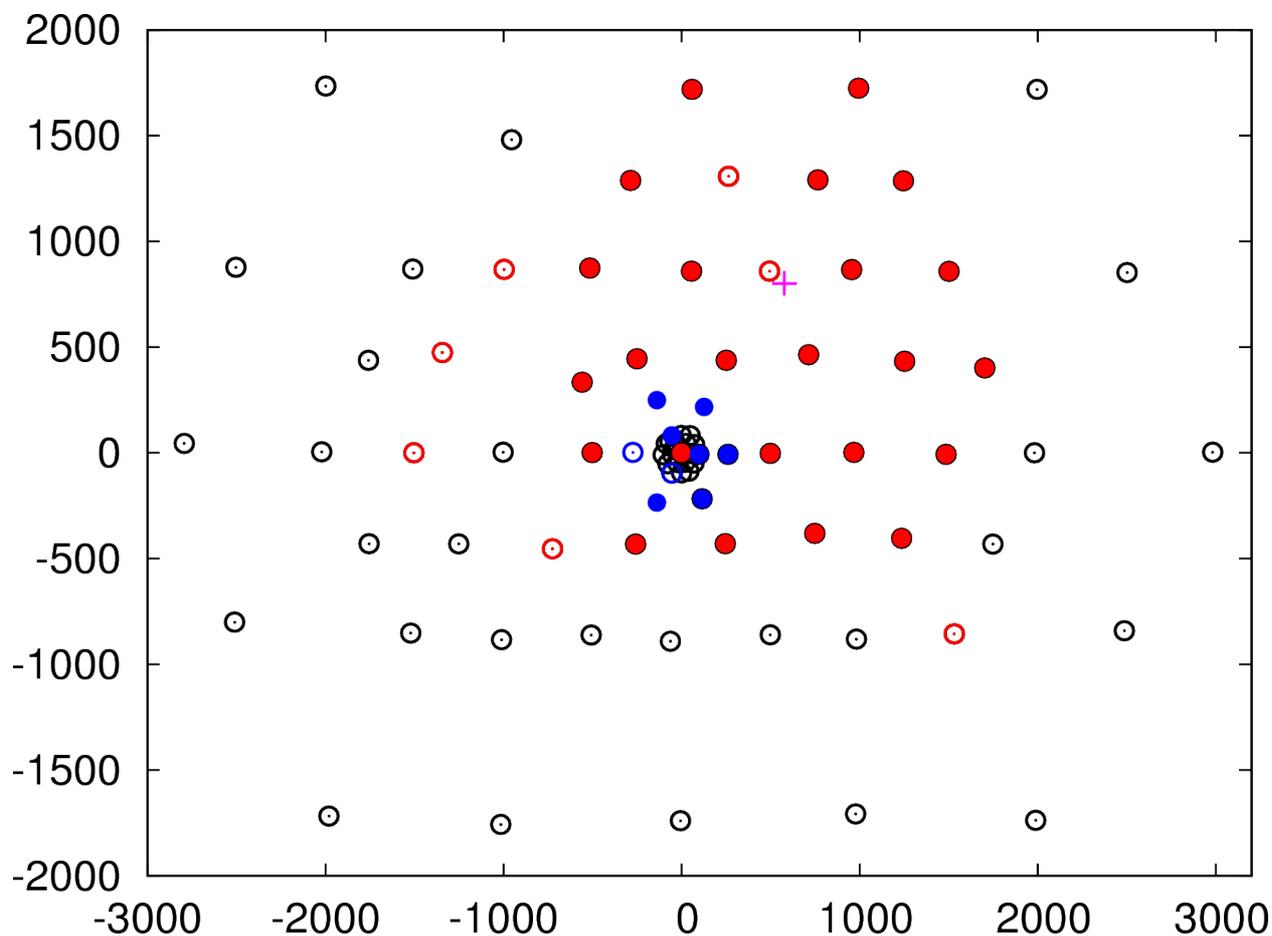


Рис.6. План установки, с отмеченными сработавшими детекторными станциями в событии 8558367095. По обеим осям отложены координаты (м). Черными кружками обозначены не сработавшие станции; красными кружками - сработавшие мастерные станции, синими - сработавшие одноканальные станции центрального сгущения. Закрашенные кружки представляют станции, принимавшие участие в поиске оси ливня, пустые - станции не принимавшие в ней участия. Фиолетовым крестиком обозначена найденная ось ливня.

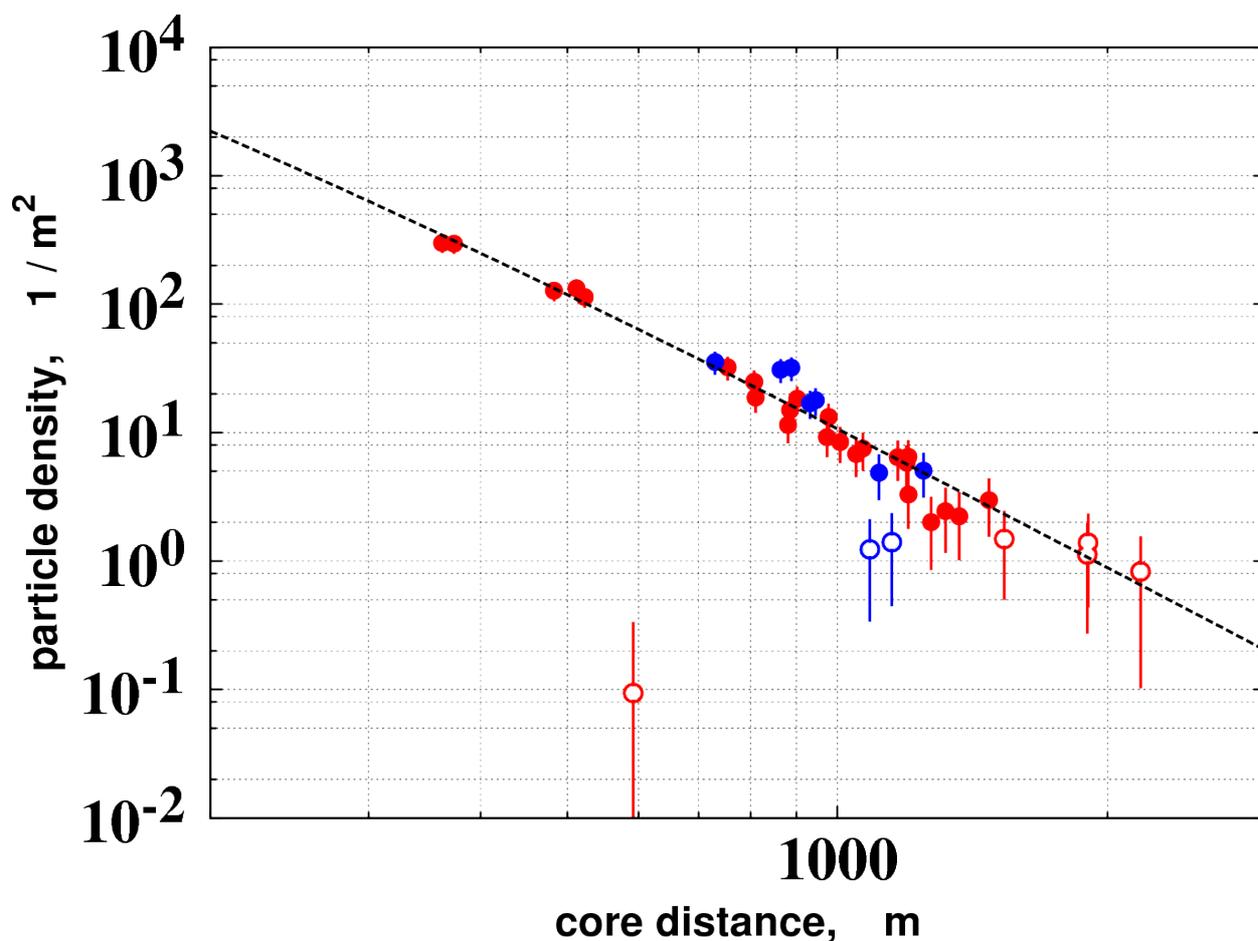


Рис.7. Пространственное распределение заряженных частиц в событии 8558367095. По оси x отложено расстояние от оси ливня, по оси y - плотность частиц. Красными кружками отмечены показания мастерских станций, синими - показания одноканальных станций центрального сгущения. Закрашенные кружки соответствуют станциям, принимавшим участие в поиске оси, пустые - не принимавшим участия. Штриховой линией показана функция пространственного распределения заряженных частиц в аппроксимации Грейзена-Линсли.

3.4 Выборка событий по астрономическим координатам и энергии

Важнейшей из задач экспериментов по регистрации КЛСВЭ является поиск астрофизических источников КЛ таких предельных энергий. В качестве примера приведем пример выборки событий с направления радиисточника Лебедь X-3. Лебедь X-3 - галактический астрофизический объект, который является источником фотонов с энергией от 10^{16} эВ [7]. Кроме того, в 1985 году был зарегистрирован повышенный поток мюонов, который был ассоциирован с этим источником, как по направлению, так и по периодичности вариаций

интенсивности (период 4.8 часа). Таким образом было установлено, что от данного источника приходят частицы, отличные от фотонов [8]. Так как этот объект находится на большом удалении от Земли (~30000 св. лет), эти частицы должны быть стабильными, нейтральными и иметь малую массу. Это обстоятельство можно использовать при отборе событий, зарегистрированных на установке ЯКУ ШАЛ, так как это позволяет расширить энергетический диапазон в сторону меньших энергий, порядка 10^{18} эВ (частицы не отклоняются в галактическом магнитном поле).

Задача:

Отобрать события (дату регистрации, энергию, и астрономические координаты) с энергией выше 10^{18} эВ, пришедшие с направления Лебедь X-3 (20ч 32м 25.50с по прямому восхождению, $40^{\circ}57' 27.70''$ по склонению).

Запрос:

Для поиска событий возьмем участок неба $\pm 5^{\circ}$ по склонению и $\pm 15^{\circ}$ по прямому восхождению. Преобразовав координаты источника в десятичные градусы, получим: склонение 40.9578, прямое восхождение 308.1125.

```
SELECT showers.ut, 10^greisen_linsley.energy AS energy,
       celestial_coordinates.delta, celestial_coordinates.alpha
FROM showers, greisen_linsley, celestial_coordinates
WHERE greisen_linsley.energy >= 18 AND
       celestial_coordinates.delta >= 35.9578 AND
       celestial_coordinates.delta <= 45.9578 AND
       celestial_coordinates.alpha >= 293.1125 AND
       celestial_coordinates.alpha <= 323.1125 AND
       celestial_coordinates.id = showers.id AND
       greisen_linsley.id = showers.id
ORDER BY greisen_linsley.energy;
```

Результат выполнения запроса:

ut	energy	delta	alpha
2001-03-16 20:58:38.9	1.00812840294547e+18	43.497298008	304.721162035
2001-03-19 22:22:02.4	1.00893381683804e+18	43.2962394507	295.706843029
1998-03-08 11:16:37.5	1.00930300597362e+18	44.1742232301	303.877006518
2004-11-24 09:06:19	1.01044154004175e+18	36.6641984068	300.117422825
2005-06-03 06:28:22	1.01446019027362e+18	43.1608725037	315.81535522
1998-04-29 20:14:38.5	1.02017294605124e+18	37.1945150171	304.402788575

```

2000-02-04 18:45:16.9 | 1.02138349731807e+18 | 42.3319504612 | 320.222831501
1996-11-17 04:27:43.4 | 1.0250607778007e+18 | 40.5926961434 | 318.185362697
1999-03-22 00:32:23   | 1.02570693647867e+18 | 40.5374076519 | 318.134849096
2004-10-02 07:57:46   | 1.02668851136972e+18 | 38.2845654648 | 298.711338095
2000-05-04 06:59:46.1 | 1.02868045976635e+18 | 40.3243819923 | 320.942296266
. . .
2006-04-16 16:15:21   | 5.1373648330139e+18 | 41.0617945853 | 303.171493545
2008-03-04 03:59:29   | 5.21520526051516e+18 | 44.2740561987 | 305.318701528
1996-03-26 10:26:03.1 | 5.99756988135521e+18 | 42.9064603422 | 306.986618972
2005-04-04 20:07:07   | 6.11920032386895e+18 | 40.2874333323 | 311.8413614
1998-02-26 01:23:24   | 6.37139321943585e+18 | 36.1554779599 | 297.654068452
2004-09-29 07:36:49   | 8.461739599935e+18  | 43.0332174331 | 302.288344204
2006-01-14 03:03:51   | 8.69026791187654e+18 | 41.5491934945 | 303.993577629
(227 rows)

```

Отметим, что с данного направления зарегистрировано лишь 227 событий с энергией выше 10^{18} эВ, причем в полученной выборке нет событий с энергией порядка 10^{19} эВ. Чтобы получить более полную картину, расширим энергетический диапазон вниз, до 10^{16} эВ и, сделав аналогичный запрос, построим распределение энергии событий ШАЛ от этого объекта (см. Рис. 8), по сути - ненормированный энергетический спектр. Также отметим, что в результате вошло уже 17978 событий.

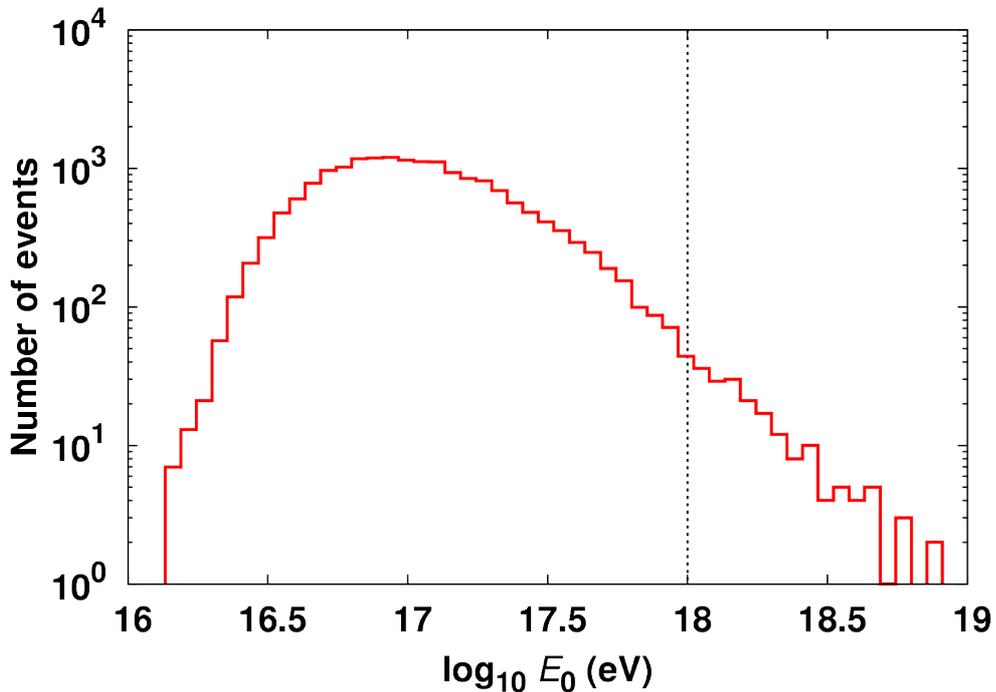


Рис.8. Распределение энергии от источника Лебедь X-3 по данным Якутской установки ШАЛ. Пунктирной линией обозначена область первоначальной выборки, с энергией выше 10^{18} эВ.

Рис.8 подтверждает, что первоначальный запрос (энергия от 10^{18} эВ) дал лишь "хвост" этого распределения (отмечено пунктирной линией).

Данный факт можно считать еще одним свидетельством в пользу гипотезы о том, что источниками КЛ предельных энергий (порядка 10^{19} эВ и выше) являются внегалактические объекты.

Список литературы

- [1] M. Nagano and A.A. Watson. Observations and implications of the ultrahigh-energy cosmic rays . Reviews of Modern Physics, Vol. 72, No. 3, July 2000 .
- [2] A.V. Glushkov, I.T. Makarov, M.I.Pravdin, I.E. Sleptsov, D.S. Gorbunov, G.I. Rubtsov, S.V. Troitsky. Constraints on the flux of primary cosmic-ray photons at energies $E > 10^{18}$ eV from Yakutsk muon data. Phys. Rev. D82:041101, 2010.
- [3] С.П. Кнуренко, А.А. Иванов, И.Е. Слепцов, А. Сабуров. Оценка энергии электронно-фотонной компоненты космических лучей по измерению черенковского света широких атмосферных ливней сверхвысоких энергий. Письма в ЖЭТФ. 2006, т. 83, 11, с. 563–567.
- [4] A.A. Ivanov, S.P. Knurenko, Z.E. Petrov, M.I. Pravdin, I.Ye. Sleptsov. Enhancement of the Yakutsk array by atmospheric Cherenkov telescopes to study cosmic rays above 10^{15} eV. Astrophys. Space Sci. Trans. 6 (2010) 53-57
- [5] <http://www.postgresql.org>
- [6] N.N. Efimov et al. Catalogue of HECR No. 2 World Data Centre-C2 for Cosmic Rays. 1988.
- [7] S.W. Forman, C. Jones, L. Cominsky et al. Astrophys. J. Suppl. Ser., 1978, v. 38, p. 357.
- [8] Б.А. Арбузов. Лебедь X-3 как источник свободных глюонов сверхвысоких энергий. Письма в ЖЭТФ. 1985, т. 42, 10, с. 430-432.