

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 524.1,004.942,004.6

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ОБРАБОТКИ СОБЫТИЙ НА ЯКУТСКОЙ УСТАНОВКЕ ШАЛ

© 2026 г. К. Г. Лебедев^а, *, А. А. Иванов^а, С. В. Матаркин^а, И. С. Петров^а

^аИнститут космифизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, 677027 Россия

*E-mail: LKG47@mail.ru

Поступила в редакцию 21.07.2025 г.

После доработки 21.07.2025 г.

Принята к публикации 29.07.2025 г.

В декабре 2024 г. на Якутской установке широких атмосферных ливней (ЯУ) была введена в эксплуатацию модернизированная система регистрации и обработки данных, а также развернута дополнительная сетка детекторов с шагом 250 м, охватывающая центральную часть установки площадью 0.16 км². В статье представлено описание модернизированного программного комплекса обработки событий и приведены первые результаты его работы. В рамках работы создана единая серверная база данных, объединяющая разнородные данные, накопленные за все время работы установки с 1973 г. Обновлено алгоритмы обработки событий и проведен анализ точности восстановления параметров ливней на основе Монте-Карло моделирования. Получены первые физические результаты по данным новой системы сбора и обработки данных.

Ключевые слова: структура хранения данных ШАЛ, методы реконструкции параметров ШАЛ, точность реконструкции параметров ШАЛ

DOI: 10.56304/S2079562926010227

ВВЕДЕНИЕ

Якутская установка широких атмосферных ливней (ЯУ) является наиболее продолжительным экспериментом по изучению космических лучей сверхвысоких энергий с помощью метода широких атмосферных ливней (ШАЛ). За время работы, начиная с 1973 г. по настоящее время, на установке было проведено 3 крупных модернизации систем сбора, хранения и обработки данных. Первая модернизация была выполнена в связи с переходом системы сбора данных на стандарт КАМАК, а хранения — с ЭВМ НАИРИ и перфолент на ЭВМ СМ4 и магнитные ленты (EASv2). Вторая модернизация осуществлена при переходе на ЭВМ PCx86 и магнитные жесткие диски (EASv3).

В данной статье представлено описание последней модернизации (EASv4), связанной с переходом на систему сбора данных на основе ПЛИС, а также реализацией следующих ключевых улучшений системы хранения данных:

- возможность почти неограниченного расширения числа каналов и типов детекторов,
- каждый детектор станции — независим,
- автоматизация всего процесса обработки первичных данных,

- объединение предыдущих форматов данных в единую базу, включая формат модельных Монте-Карло данных.

При создании предыдущих форматов хранения данных одной из первостепенных задач ставилась оптимизация занимаемых объемов памяти, по этой причине переменные в структурах создавались с множественными значениями, а при последующих небольших модернизациях, связанных с включением дополнительных детекторов, номерам детекторов придавалась функция разделения на типы, все это приводило к значительному усложнению декодирования исходных данных, делая их практически недоступными для интерпретации третьими лицами. Объединение предыдущих форматов в единый формат позволит исключить эту проблему.

План модернизации системы обработки и хранения данных представлен на рис. 1, блоки, обозначенные сплошным контуром, будут описаны в данной статье.

В первом разделе описываются структуры передачи и хранения данных. Второй раздел посвящен алгоритмам реконструкции параметров ШАЛ. Последний третий раздел содержит первые результаты работы модернизированной системы.

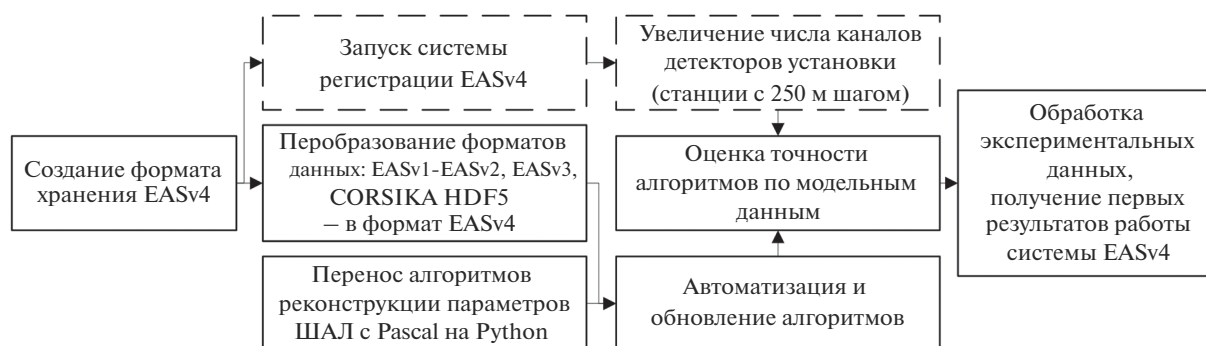


Рис. 1. Блок-схема плана модернизации системы обработки и хранения данных.

1. СТРУКТУРЫ ПЕРЕДАЧИ И ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ

От вспышек в сцинтилляторе при прохождении ионизирующих частиц, рожденных в каскадах ШАЛ, формируется на выходе ФЭУ импульс, который интегрируется в усилителе и преобразуется в прямоугольный сигнал с длительностью логарифмически пропорциональной числу вспышек. Длительность импульса стробируется и сохраняется в буфер с последующей передачей в центр сбора данных. Для определения пропорциональности измеренного значения к числу вспышек и соответственно числу частиц, периодически в автоматическом режиме на каждом детекторе выполняется калибровка по естественному фоновому излучению — выполняется привязка длительности импульса к уровню одного эквивалентного вертикального мюона (VEM). Калибровочные данные сохраняются в центре сбора данных. Длительности импульсов детекторов и калибровочные уровни мы называем первичными данными. Вторичными данными мы называем результат преобразования сигналов детекторов в число частиц, пришедших на детектор.

Вторичные данные EASv1 и EASv2 были объединены во время первой модернизации в 1986 г. Объединенный формат файловой базы данных EASv1-EASv2 состоит из файлов данных: индексного (dbind*.eas), основного (dbeas*.eas) и файла конфигурации (coordn.map).

Структура файловой базы данных (БД) EASv1-EASv2 (рис. 2) рассчитана на компактность данных и скорость считывания в ущерб возможности расширения типов и явности назначения переменных. Так, байт флагов состояний “ncb” имеет функцию определения типа детектора и одновременно номера детектора в мюонном пункте, номер станции используется вместе с “ncb” для определения типа детектора.

Вторичные данные EASv3 состоят из групп файлов (*.mas, *.one, *.prm) и общего файла конфигурации установки, формата EASv1-EASv2 (coordn.map).

При переходе на версию EASv3 была применена структура хранения, представленная на рис. 3. Файлы с показаниями детекторов были разделены на файлы для станций, формирующих мастер сигнал для триггера (сцинтилляционные наземные) и файлы одиночных каналов детекторов (черенковские, мюонные, сцинтилляционные). Исключен неоднозначный код “ncb”. Формат конфигурационного файла “coordn.map” сохранен. В конфигурационном файле по номерам описываются типы станций, их задержки и координаты, каждая запись имеет метку начала и конца действия конфигурации, т.е. каждая запись формирует слепок конфигурации на период времени. Формат coordn.map файла имеет жесткое ограничение на число станций равное 128. При формировании программного комплекса обработки событий в большей части кода игнорировался тип детектора, определяемый в конфигурационном файле, и использовалась идентификация типа по номерам, что впоследствии усложнило ревизию и повторную обработку архивных данных.

Разработанная структура новой объединяющей БД EASv4 основывается аналогично “coordn.map” на принципе “слепок” конфигурации, но не имеет ограничения на число каналов. Разделение на типы детекторов выполнено отдельной таблицей и не привязано к номерам детекторов и станций. БД строится на основе СУБД PostgreSQL (PSQL) [1] и имеет две “схемы”, одна — “control” предназначена для хранения таблиц конфигураций, калибровочных данных, другая — “events” для хранения таблиц с первичными данными и таблиц с данными обработки (рис. 4).

Таблицы схемы “events” разделены на уровни: первичный и вторичный 1, 2, 3 (разделены на рисун-

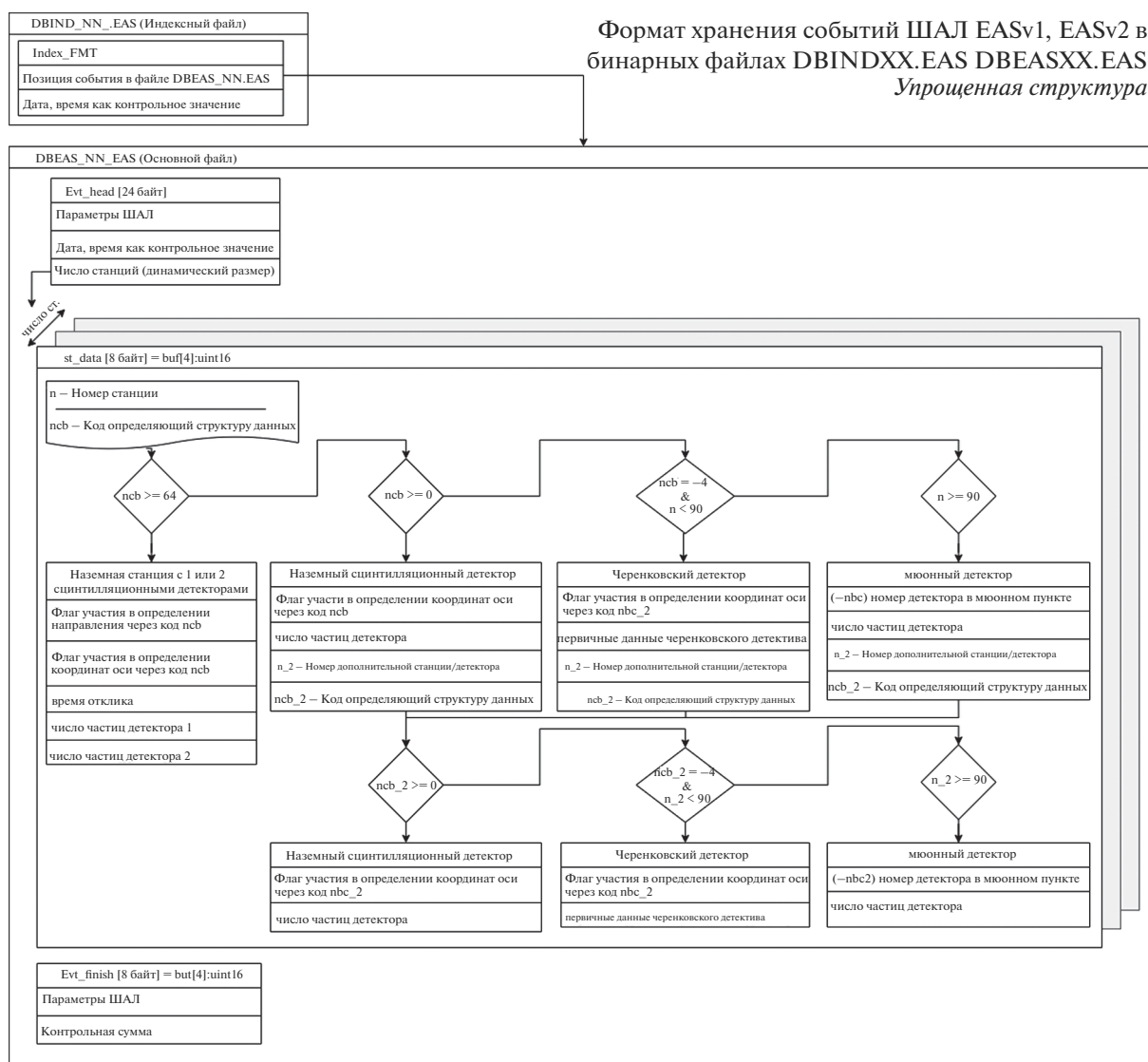


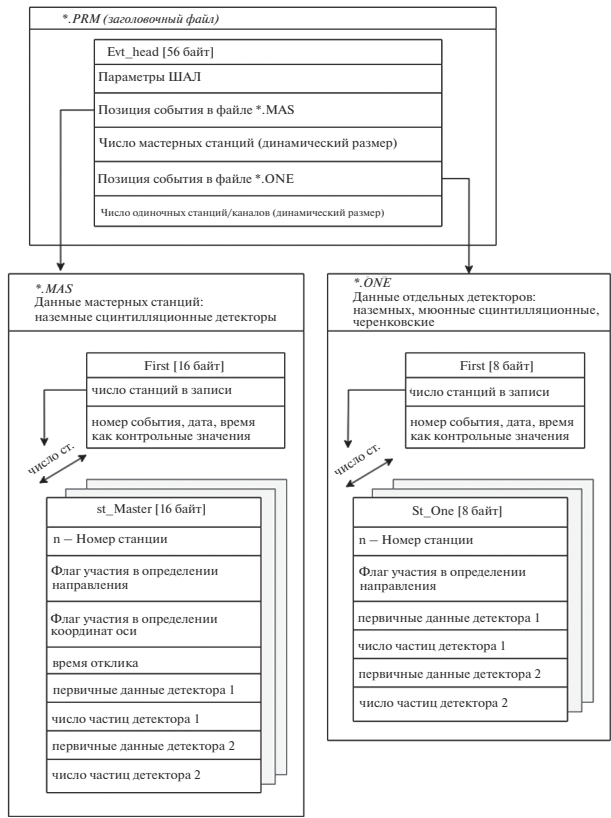
Рис. 2. Структура файловой базы данных EASv1-EASv2.

ке пунктиром). Вторичные соответствуют этапам обработки данных: преобразованию первичных данных детекторов в физические величины, определению направления оси ливня, определению координат оси ливня. При работе программы регистрации EASv4 осуществляется вставка данных в уровень первичных данных, а при импорте файловых баз данных EASv1-EASv2, EASv3, CORSIKA HDF5 [2] вставка осуществляется в первый уровень вторичных данных посредством скриптов, написанных на Python, которые были включены в состав комплекса программ обработки EASv4. Взаимодействие программ с БД реализовано с помощью встроенных в PSQL “триггеров”, “функций” и

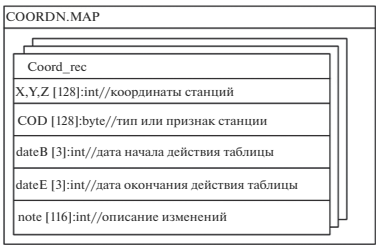
“notify” таким образом, чтобы по выполнению обработки на одном уровне — т.е. записи результата в БД, база данных отправляла сообщение — “notify” для ожидающей (“подписанной”) программы обработки следующего уровня. Разграничение между модельными, экспериментальными и импортированными данными и осуществляется с помощью применения отрицательных номеров событий и отрицательных номеров конфигураций. Для событий модернизированной ЯУ номера отсчитываются от 1 и выше, для импортируемых из EASv1-EASv2, EASv3 выделены номера от -1 до -2124000000, остальные для модельных данных (тип для номера события: bigint $\sim \pm 9 \cdot 10^{18}$). Такое

Формат хранения событий ШАЛ EASv3, в бинарных файлах *.PRM, *.MAS, *.ONE

Упрощенная структура



Файл конфигурации установки совместный с EASv1–EASv2 и EASv3



Идентификация детекторов в программном комплексе EASv3

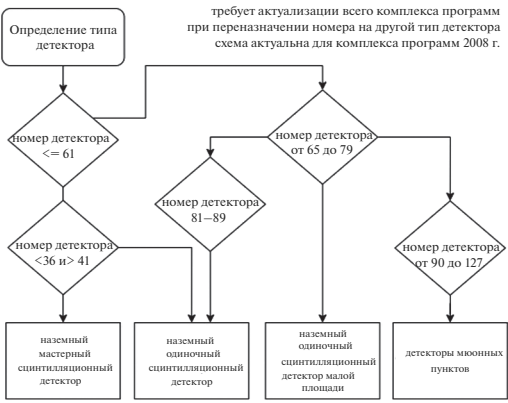


Рис. 3. Структура файловой БД EASv3.

разделение позволяет выполнять обработку без дополнительных манипуляций.

2. АЛГОРИТМЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ПАРАМЕТРОВ ШАЛ

Разработанный и применяемый с 1973 г. алгоритм реконструкции ШАЛ [3] при предыдущих модернизациях не менялся. Алгоритм состоит из двух этапов — определения направления оси ШАЛ и определения координат оси, в ходе которого определяется функция пространственного распределения (ФПР) ШАЛ.

При определении направления оси ШАЛ сперва выполняется фильтрация показаний станций — отбрасываются с плотностью меньше 2 м^{-2} , если таких станций менее 5, понижается порог до плотности 1 м^{-2} , если и в этом случае станций меньше 3, то порог отключается. Станции, прошедшие фильтр, помечаются флагом участия. Да-

лее, используя модель плоского фронта, методом наименьших квадратов выполняется поиск единичного вектора оси ливня, пересекающего начало координат установки. Модель плоского фронта задается уравнением $t_i = nR_i + T_0$ где t_i , R_i — время срабатывания и координата i -й станции, T_0 — момент прохождения фронта через начало координат. Если в результате минимизации χ^2 превышает в три раза число степеней свободы, программа передает управление оператору для возможности исключения сбойных станций и переобработки события, в случае невозможности найти решение, событие классифицируется как проблемное либо ложное.

Определение координат оси ШАЛ начинается с фильтрации по плотности — в отбор попадают станции с плотностью в диапазоне $1.5\text{--}500\text{ м}^{-2}$, если станций менее трех, порог понижается до 0.2 м^{-2} , после чего вычисляется средневзвешенное значение координат сработавших станций, где вес соответствует зарегистрированной плотности, затем,

Формат хранения событий ШАЛ EASv4 в PSQL

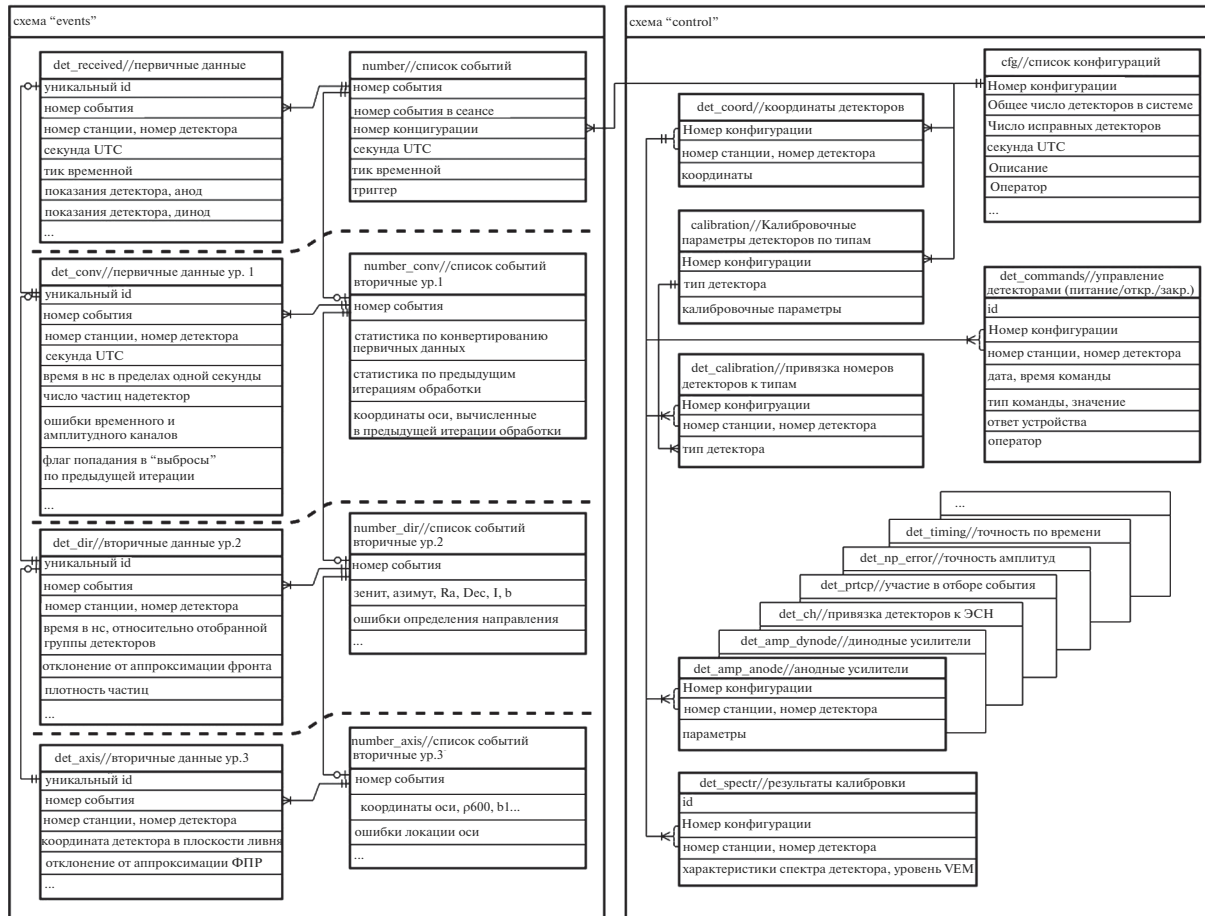


Рис. 4. Структура реляционной БД EASv4. [Ra, Dec], [l, b] — экваториальные и галактические координаты направления прихода первичной частицы ШАЛ, r600 — плотность на расстоянии 600 м в плоскости ливня, b1 — классификационный параметр функции пространственного распределения (ФПР), VEM — эквивалент вертикального мюона.

используя найденные направления оси ШАЛ, выполняется переход в систему координат ливня с центром в средневзвешенном значении координат. Для аппроксимации зависимости плотностей ρ , измеренных детекторами, от расстояния до оси r в системе координат ливня, используется упрощенная ФПР Грейзена—Линсли $\rho(r) = U_m/r(r + r_0)^{b1}$ [4], где r_0 — Мольеровский радиус (вычисляется по показаниям температуры и давления), U_m — коэффициент нормировки. Путем градиентного спуска по координатам при фиксированном параметре $b1$ ищется минимум χ^2 , после чего вычисляется параметр $r600$ (плотность частиц на расстоянии 600 м от оси) и пересчет $b1(r600, \theta)$, далее начинается новая итерация градиентного спуска с уменьшенным шагом в два раза. Таким образом выполняются итерации до тех пор, пока компоненты градиента не станут пренебрежимо малы.

В EASv4 код процедуры обработки был переписан с Pascal на Python. В EASv4 применяется программный триггер с широким относительно среднего ШАЛ охватом по времени: ± 250 мкс, по этой причине в отобранных событиях в большом количестве присутствуют фоновые показания детекторов. Для их исключения перед определением направления оси ШАЛ применен фильтр поиска максимальной группы детекторов с близкорасположенными во времени показаниями детекторов в скользящем окне 30 мкс. Фильтр по измеренным плотностям с детекторов применяется итерациями в диапазоне $0-2 \text{ м}^{-2}$ с шагом 0.1 м^{-2} , по окончании выбирается решение с наименьшим χ^2/dof .

В процедуру определения координат оси включен поиск выбросов по критерию выхода за 3 сигмы от ожидаемого. При обнаружении одного или более выброса в таблицу с первичными данными де-

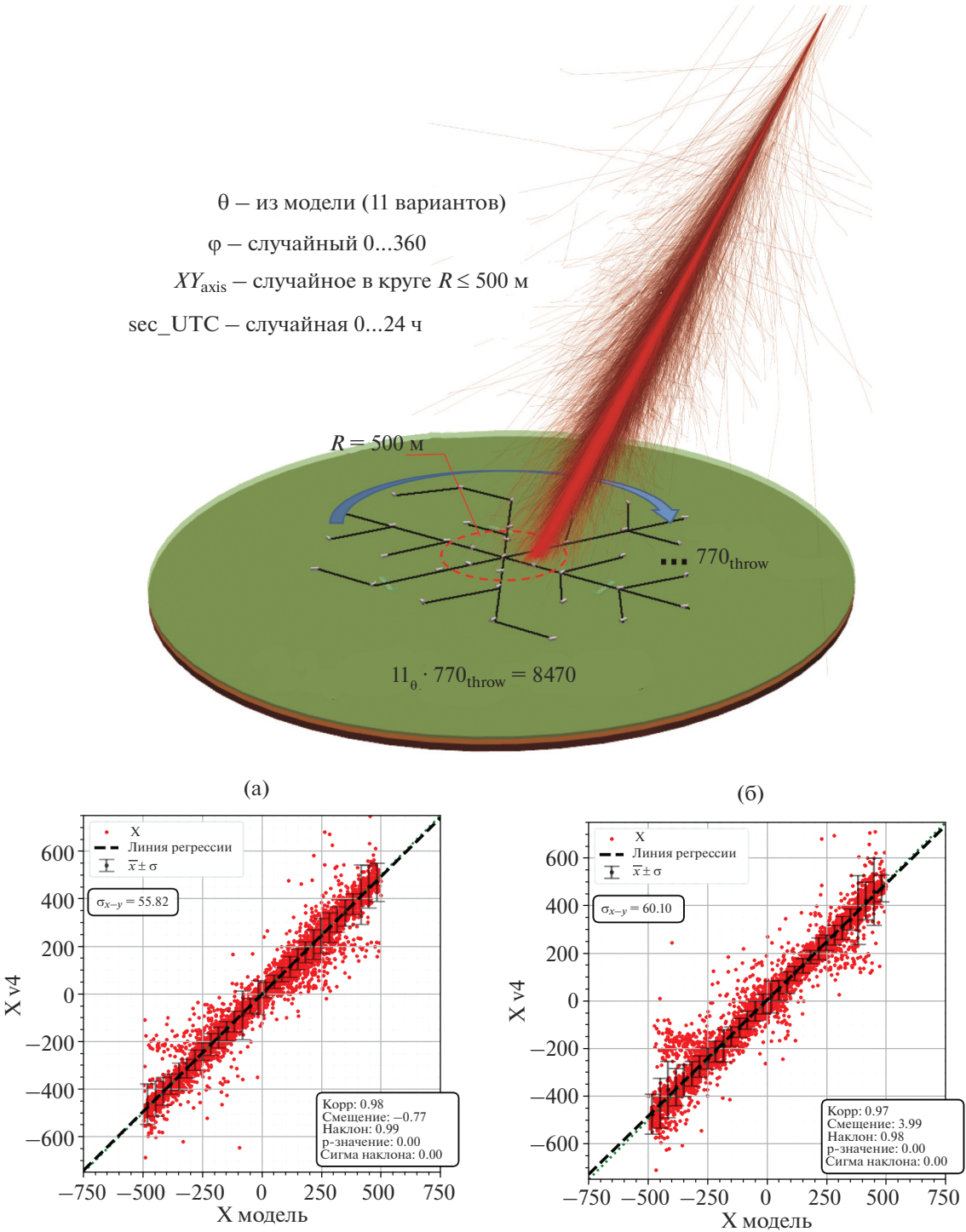


Рис. 5. Моделирование с применением конфигурации ЯУ: (а) схема процесса моделирования, (б) графики корреляции восстановленных координат оси ШАЛ с помощью программы обработки EASv4 с исходными модельными параметрами ливней.

текторов “det_converted” устанавливается метка наличия выброса, после чего результаты определения оси и направления удаляются, и обработка запускается заново.

Для проверки алгоритма реконструкции выполнено Монте–Карло моделирование с помощью ПО CORSIKA 7.7420 [2]//QGSJET-II-04 [5], FLUKA [6] без прореживания. В целях оптимиза-

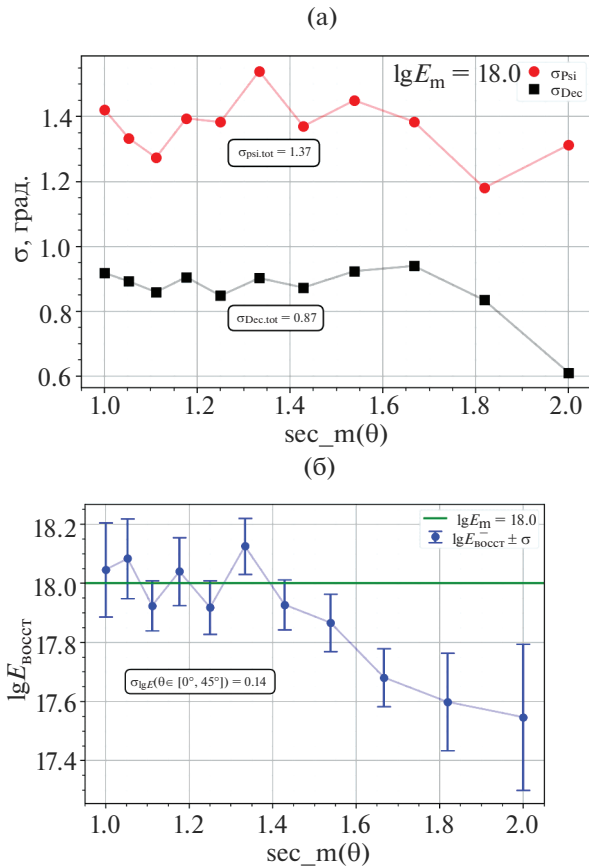


Рис. 6. (а) Точность реконструкции направления прихода первичной частицы ШАЛ в угловых расстояниях (σ_{Ψ}) и экваториальной координате Dec, в зависимости от секанса зенита. (б) Среднее значение восстановленной энергии ливня в зависимости от секанса зенита, точки — восстановленные средние значения, прямая — заданная в модели.

ции использования расчетов к каждому смоделированному ливню прикладывалась сетка детекторов установки (рис. 5) таким образом, чтобы положение оси ливня находилось случайно в области с радиусом 500 м от центра установки, а азимутальный угол имел случайное значения от 0° до 360° . Было разыграно 11 ливней с $\cos(\theta)$ от 1.00 до 0.50 с шагом 0.05, от протона с энергией 10^{18} эВ, каждый ливень применен к установке 770 раз, общее число событий 8470. Результаты приведены на графиках: рис. 5, рис. 6.

3. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

В декабре 2024 г. на ЯУ была введена в эксплуатацию модернизированная система регистрации и обработки данных. В качестве примера приведена обработка события №43739 с энергией 10^{19} эВ от

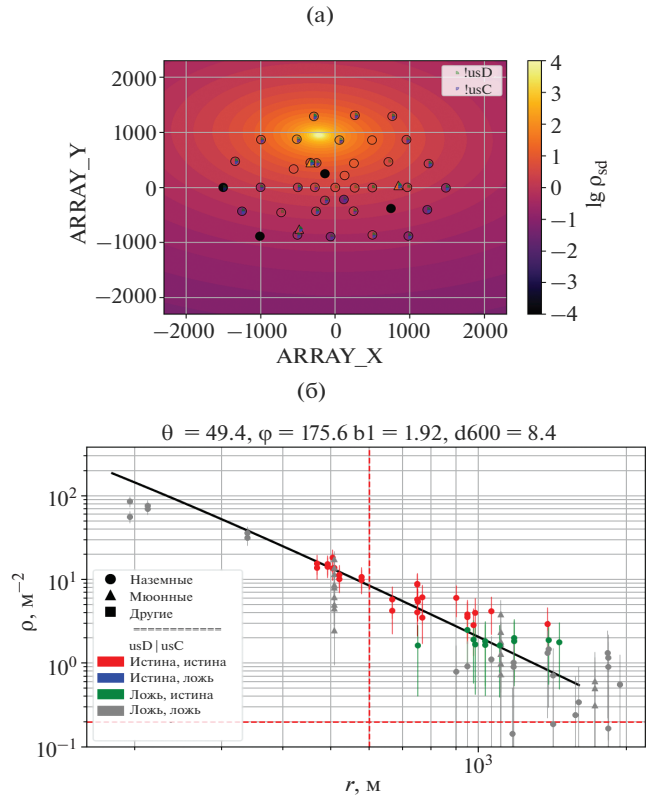


Рис. 7. Событие №43739: (а) цветовая карта распределения плотностей ШАЛ, (б) пространственное распределение частиц ШАЛ по показаниям детекторов установки. usD и usC — флаги использования показаний детектора в определении направления и координат оси, вертикальная пунктирная линия — 600 м от оси ШАЛ, горизонтальная пунктирная линия — порог плотности отбора детекторов.

23.02.2025, углами $\theta = 49.4 \pm 0.9^\circ$, $\phi = 175.6 \pm 1.2^\circ$ и представлена на рис. 7.

Вместе с запуском новой системы регистрации была развернута дополнительная сетка детекторов с шагом 250 м, охватывающая центральную часть установки площадью 0.16 км^2 . Получено распределение числа событий ШАЛ по энергии для сеток 250 и 500 м (рис. 8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На ЯУ была проведена модернизация программного комплекса обработки событий, включающая следующие ключевые улучшения:

- разработана серверная БД, объединяющая данные, накопленные за все время работы установки с 1973 г.,
- разработаны программы для импорта файловых баз данных EASv1-EASv2, EASv3, CORSIKA HDF5 в новую EASv4,

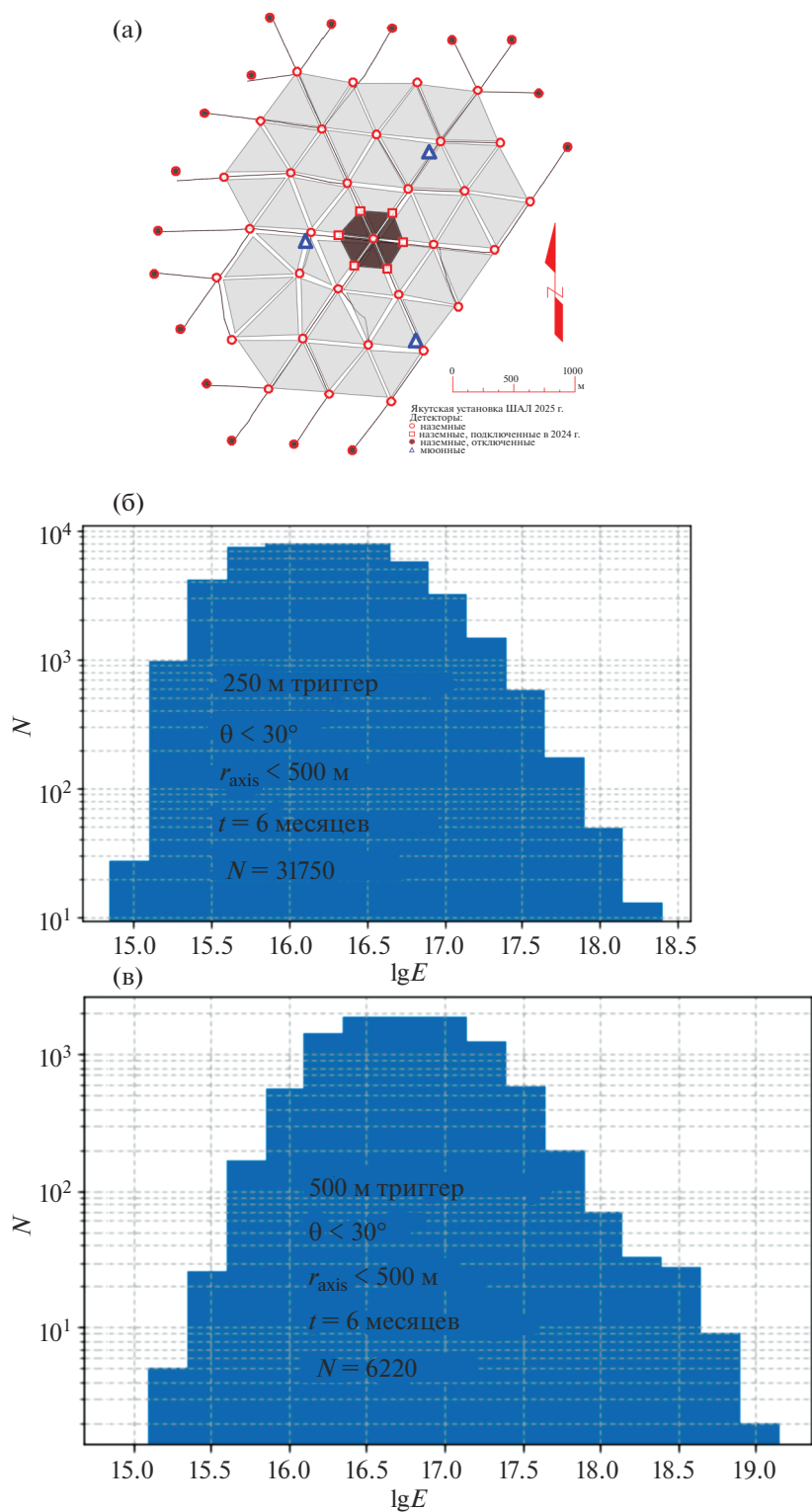


Рис. 8. Карта расположения детекторов, светло-серыми областями обозначены триггерные 500 м треугольники, темно-серыми 250 м треугольники (а). Распределение числа событий ШАЛ по энергии для сетки 250 м (б) и сетки 500 м (в), зарегистрированных, начиная с декабря 2024 г. по май 2025 г., с осью в пределах 500 м от центра установки, с зенитными углами менее 30° .

- обновлены алгоритмы реконструкции параметров ШАЛ,

- по результатам моделирования получены точности алгоритма реконструкции ШАЛ, угловая точность для $\lg E_0 = 18$ составила 1.4° (в угловых расстояниях), точность определения энергии в диапазоне зенита $0^\circ\text{--}45^\circ \approx 40\%$.

Получены первые предварительные результаты по данным новой системы сбора и обработки данных.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) № 24-22-20048, <https://rscf.ru/project/24-22-20048/>.

Авторы выражают благодарность Сабурову А.В., Глушкову А.В. и сотрудникам Обособленного структурного подразделения ИКФИА СО РАН Якутской комплексной установки ШАЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. The PostgreSQL Global Development Group. PostgreSQL 13.21 Documentation The PostgreSQL Global Development Group. 2020.
2. Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N., Schatz G., Thouw T. CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers. Report FZKA No. 6019. 1998. <https://www.iap.kit.edu/corsika/70.php>.
3. Алейникова Л.З. и др. Методика определения индивидуальных параметров ШАЛ и ее реализация на ЭВМ. Экспериментальные методы исследования космических лучей сверхвысоких энергий. 1974. Якутск: ИКФИА. С. 192.
4. Каганов Л.И. Пространственное распределение заряженных частиц в широких атмосферных ливнях с первичной энергией $E_0 \geq 10^{17}$ эВ. Космические лучи сверхвысоких энергий. 1979. Якутск: ИКФИА. С. 34–55.
5. Ostapchenko S. Monte Carlo Treatment of Hadronic Interactions in Enhanced Pomeron Scheme: QGSJET-II Model // Phys. Rev. D. 2011. V. 83 (1). P. 014018. <https://doi.org/10.1103/PHYSREVD.83.014018>
6. Ferrari A., Sala P.R., Fasso A., Ranft J. FLUKA: A Multi-Particle Transport Code. 2005. <https://doi.org/10.2172/877507>

Modernization of Database and Algorithms for Processing Events in the Yakutsk EAS Array

K. G. Lebedev^{1, *}, A. A. Ivanov¹, S. V. Matarkin¹, and I. S. Petrov¹

¹*Shafar Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, 677027 Russia*

**e-mail: LKG47@mail.ru*

Received July 21, 2025; revised July 21, 2025; accepted July 29, 2025

Abstract—In December 2024, an upgraded data recording and processing system was put into operation at the Yakutsk extensive air shower (EAS) array, and an additional detector grid with a step of 250 m was deployed, which covers the central part of the array with an area of 0.16 km². In this report we will describe the upgraded software package for event processing and present the first results of its operation. As part of this work, a unified server database was created, combining data with different formats accumulated over the entire period of operation of the array since 1973. Event processing algorithms were updated and an analysis of the accuracy of reconstructing shower parameters was carried out based on Monte Carlo modeling. The first scientific results obtained on the new data collection and processing system are presented.

Keywords: EAS data storage structure, methods for reconstructing EAS parameters, accuracy of reconstructing EAS parameters