

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В.Н. КАРАЗІНА

(повне найменування вищого навчального закладу)

ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

(назва факультету)

КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ ФІЗИКИ ТА ФІЗИКИ ПЛАЗМИ

(повна назва кафедри)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту (роботи)

БАКАЛАВРА

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему

укр. Аналіз еволюції експериментальних даних порогового параметру чипів детектору "Внутрішня Трекова Система" міжнародного експерименту ALICE

англ. ALICE ITS detector threshold scan parameter study.

Виконав(ла): студент 4 курсу навчання

за ОПП бакалавр

напрям підготовки 105 Прикладна фізика та наноматеріали

Широкопетлев Ф.О.

(прізвище та ініціали)

(особистий підпис)

Керівник доц. Серeda І.М.

(прізвище та ініціали)

(особистий підпис)

Керівник ст.н.с. Трубніков В.С.

(прізвище та ініціали)

(особистий підпис)

Рецензент д.ф.-м.н Зиков О.

(прізвище та ініціали)

(особистий підпис)

АНОТАЦІЯ

В даній роботі розглянуто середнє порогове значення активації для стейву – параметр контролю якості детектору «Внутрішня трекова система» експерименту ALICE. Докладно розібрана структура детектору, будова ALPIDE чіпу та принцип його роботи. Розроблено нове програмне забезпечення для візуалізації часової тенденції порогового значення. Побудовані та проаналізовані графіки часової залежності порогового значення.

Виявлено ефект впливу випромінювання на порогове значення ALPIDE чіпу. Зроблені гіпотези поведінки часової тенденції під дією різних доз радіації. Зроблені висновки, що порогове значення має різну поведінку для різних шарів, проте в залежності від радіаційного випромінювання може переходити до різних етапів та станів.

ABSTRACT

In this paper, the average threshold value for the stave is considered - the quality control parameter of the detector ITS of the ALICE experiment. The structure of the detector, the structure of the ALPIDE chip and the principle of its operation are analyzed in detail. New software has been developed to visualize the time trend of the threshold value. Graphs of time dependence of threshold value are constructed and analyzed.

The effect of radiation load on the threshold value of the ALPIDE chip is revealed. Hypotheses of the behavior of the temporal tendency under the influence of different doses of radiation are made. It is concluded that the threshold value has different behavior for different layers, but depending on the radiation can go to different stages and states. It is concluded that the threshold value has different behavior for different layers, but depending on the radiation load can go to different stages and states.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ФІЗИЧНІ ЗАСАДИ РОБОТИ ALPIDE СЕНСОРІВ	5
РОЗДІЛ 2. БУДОВА ВНУТРІШНЬОЇ ТРЕКОВОЇ СИСТЕМИ	9
РОЗДІЛ 3. ОПИС ПАРАМЕТРУ СЕРЕДНЬОГО ПОРОГОВОГО ЗНАЧЕННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ	13
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	16
4.1 Опис вхідних даних	16
4.2 Алгоритм аналізу	17
4.3 Реалізація алгоритму	17
РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАНИХ	22
5.1. Графіки, отримані для запуску Pb+Pb:	22
5.2. Дані отриманні в період p+p, за квітень 2024 року.	25
5.3. Шум середнього порогового значення.	26
ВИСНОВКИ	28
ДЖЕРЕЛА	30
ДОДАТКИ	32

ВСТУП

ALICE (A Large Ion Collider Experiment) – експеримент присвячений вивченню зіткнень важких іонів з використанням пучків Великого адронного колайдера (LHC, БАК) в CERN. Експеримент був розроблений для вивчення фізики сильно взаємодіючих речовин при надзвичайно високих температурах і баріонних густинах, при яких він проходить перехід до стану кварк-глюонної плазми. [1]

Одним з основних детекторів в експерименті ALICE є внутрішня трекова система (ITS, BTC), яка призначена для відстеження початкової точки взаємодії і реконструкції треків частинок. BTC складається з семи концентричних шарів кремнієвих сенсорів за новітньою технологією MAPS ALPIDE.

У 2019-2020 роках машина БАК була модернізована. Це так зване, друге тривале припинення роботи, після якого заплановані два тривалі періоди збору даних Run 3 та Run 4. В продовж всіх цих періодів ALICE спрямована на вимірювання властивостей кварк-глюонної плазми використовуючи область малих поперечних імпульсів створених частинок (p_T), адрони з відкритим важким ароматом, світлові векторні мезони та маломасивні ді-лептони [2]. Оскільки ці канали мають дуже невелике співвідношення сигнал-фон, необхідна велика статистика з неспрацьованим запуском. ALICE зчитувала події minimum bias в режимі безперервного зчитування. Потрібно було суттєве покращення координат точки первинної взаємодії та ефективної реєстрації треків з малим поперечним імпульсом, що вимагає значних оновлень субдетекторів ALICE. Іншою мотивацією для оновлення ALICE є очікуване збільшення світності у 100 разів у Run 3 та Run 4. Був виконаний перехід з BTC 1 до BTC 2, та BTC 2 успішно функціонує і на даний час.

РОЗДІЛ 1. ФІЗИЧНІ ЗАСАДИ РОБОТИ ALPIDE СЕНСОРІВ

До кінця Run 2 ВТС, яка має вирішальне значення для реконструкції треків та первинної вершини взаємодії, складалася з двох шарів кремнієвих піксельних детекторів (SPD), двох шарів кремнієвих дрейфових детекторів (SDD) та двох шарів кремнієвих мікростріпових детекторів (SSD). Швидкість зчитування повного ITS була обмежена 1 кГц. Під час переходу, відмовились від мікростріпових, піксельних та дрейфових детекторів, та перейшли на новітні MAPS ALPIDE сенсори. Кількість шарів детектору збільшилась з 6 до 7 та шари були зміщені один відносно одного, для збільшення роздільної здатності.

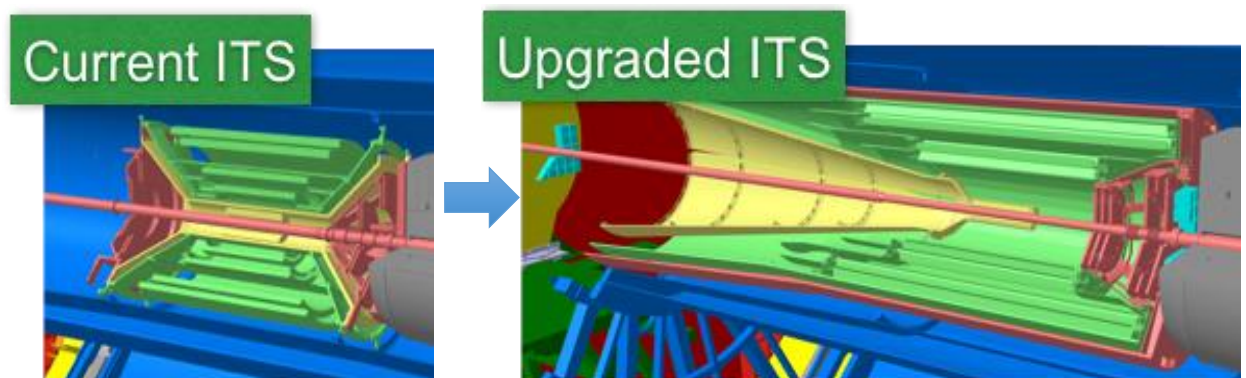


Рис. 1.1. Схема змін під час переходу від ВТС 1 до ВТС 2.

При оновленні ВТС в першу чергу вдалось досягти таких покращень:

- Просторова роздільна здатність: $\sim 5 \times 5 \text{ мкм}^2$ для всіх шарів, коли для ВТС 1 – $12 \times 100 \text{ мкм}^2$ для внутрішньої частини, $20 \times 830 \text{ мкм}^2$ для зовнішньої частини).
- Максимальна швидкість зчитування: $> 100 \text{ кГц}$ для зіткнення іонів свинцю та $> 1 \text{ МГц}$ для зіткнення протонів, в той самий час для ВТС 1 складала тільки 1 кГц.
- Ймовірність поглинання утвореної частинки X/X_0 на один шар (перші три шари): 0.35%, а в той самий час для ВТС 1 це значення було в три рази вище, 1.1%. [1]

Основною одиницею сучасного ITS є ALPIDE [3,4,5], що означає ALice Pixel DEtector. Датчик має розмір $1,5 \times 3$ см. Він розділений на 512 рядків і 1024 стовпців пікселів з кроком $29,24 \times 26,88$ мкм, що дає можливість досягти роздільної здатності краще ніж 5 мкм. ALPIDE є монолітним датчиком активних пікселів (MAPS), який заснований на 180 нм CMOS технології TowerJazz [3]. Ця технологія використовує до 6 металевих шарів, які в поєднанні з малим розміром структури дозволяють реалізувати цифрову схему CMOS високої щільності з низьким енергоспоживанням.

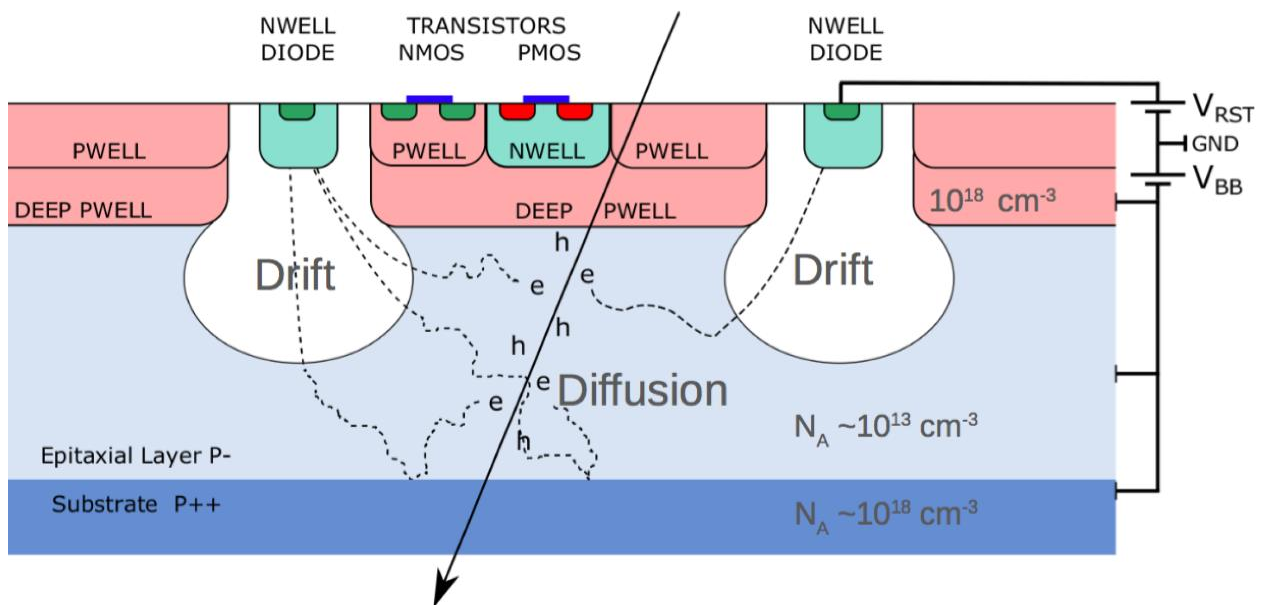


Рис. 1.2. Перетин пікселя ALPIDE. Заряджена частинка перетинає чутливий об'єм (епітаксійний шар з високою опором між підкладкою і шаром з CMOS транзисторами) і генерує вільні носії заряду, які дифундують по епітаксійному шару, поки не досягнуть області дрейфу, де вони збираються.[7]

Середня щільність потужності на поверхні датчика менше 40 мВт/см^2 [3]. З рисунку 1.2, можна побачити іншу важливу особливість – реалізація високоомного ($> 1 \text{ кОм}$) епітаксiального шару і глибокого p-well. Шар глибокого p-well запобігає збору носіїв заряду n-well транзисторів pmos, таким чином як pmos, так і nmos транзистори можуть бути реалізовані в активній області пікселів. Товщина епітаксiального шару 25 мкм. Об'єм виснаження може

бути збільшений шляхом застосування помірної напруги зворотного зміщення до підкладки. Це також знижує ємність збирального діода і призводить до більш високої ефективності збору [5].

Таблиця 1.1. Вимоги до датчика Inner та Outer Barrel BTC 2 і досягнуті характеристики ALPIDE. [7]

	Inner Barrel	Outer Barrel	ALPIDE відповідність
Товщина [мкм]	50	100	OK
Просторова роздільна здатність [мкм]	5	10	~5
Розмір чіпу [мм]	15 × 30	15 × 30	OK
Питома потужність [мВт/см ²]	<300	<100	<40
Роздільна здатність часу події [мкс]	<30	<30	~2
Ефективність детектування [%]	>99	>99	OK
Частота помилкових влучень [подія ⁻¹ ·піксель ⁻¹]	<10 ⁻⁶	<10 ⁻⁶	<10 ⁻¹⁰
NIEL радіаційна стійкість [1MeV _{eq} ·см ⁻²]	1.7 × 10 ¹³	3 × 10 ¹⁰	OK
TID радіаційна стійкість [крад]	2700	100	OK

Кожен піксель ALPIDE містить чутливу, гнучку електроніку, та також з інтерфейсом. Електроніка керує збором заряду, посиленням сигналу та розділенням, а також записує двійкову інформацію про попадання в буфер подій. На периферії чіпу розташовано кілька 8-розрядних ЦАП (цифро-

аналогових перетворювачів), які регулюють напругу та струм у вхідних схемах пікселів. Найбільш релевантними ЦАП для роботи є напруга V_{CASN} і струм I_{THR} , які контролюють пороговий заряд[4].

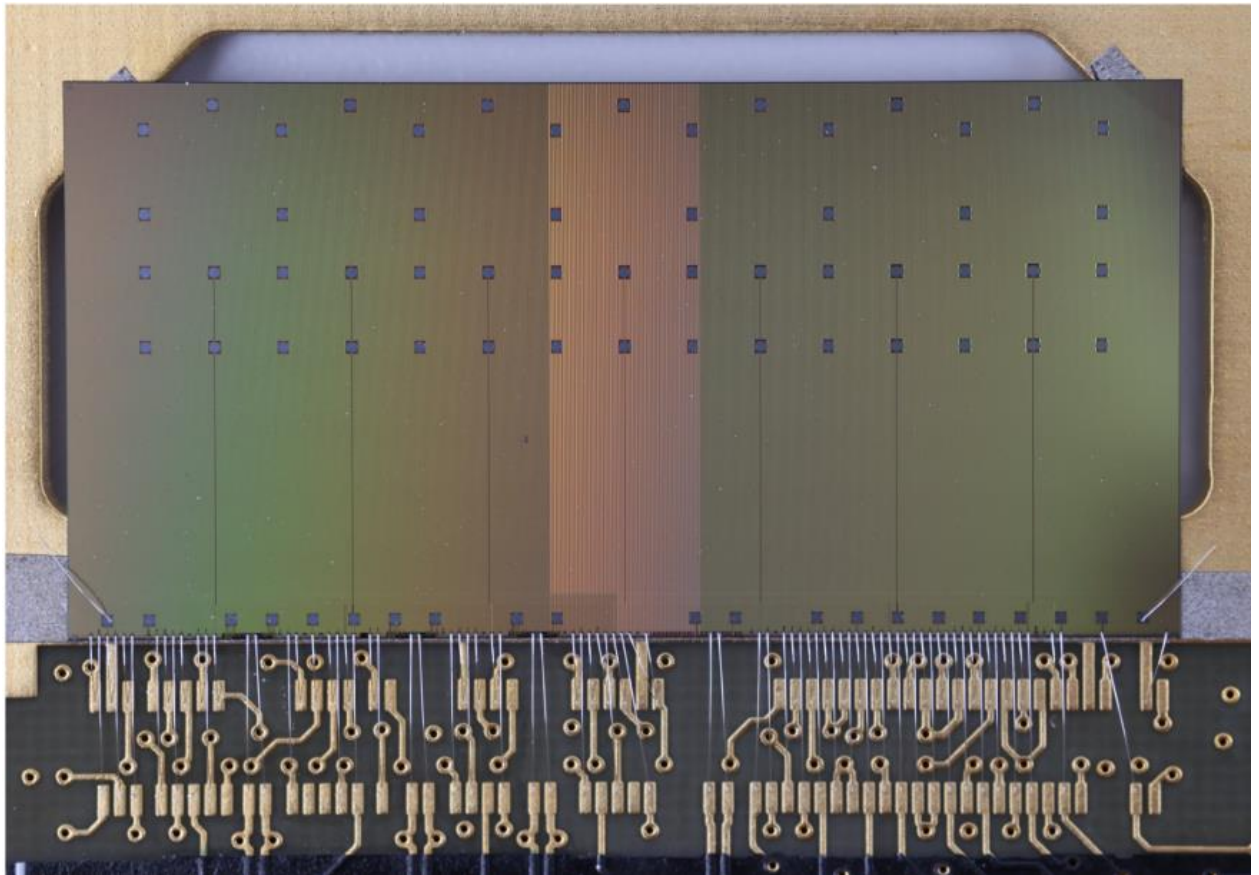


Рис. 1.3. Фотографія чіпу ALPIDE під час тестів. [7]

У таблиці 1 наведено необхідні параметри ALPIDE зі звіту про технічний проект [7] і досягнуту продуктивність. З таблиці видно, що продуктивність датчика задовольняє всі вимоги до Inner та Outer Barrel. Після Run 3 і 4 очікувана загальна іонізуюча доза (TID), накопичена мікросхемою у Inner Barrel, становитиме 270 крад, а неіонізуюча втрата енергії (NIEL) становитиме $1,3 \times 10^{12} \text{ 1MeV}_{\text{eq}} \cdot \text{cm}^{-2}$, проте тести чіпу ALPIDE під радіаційним навантаженням, що в 10 разів перевищує необхідні, показали задовільні результати.

РОЗДІЛ 2. БУДОВА ВНУТРІШНЬОЇ ТРЕКОВОЇ СИСТЕМИ

ВТС один з 15 субдетекторів у експерименті ALICE, найближчий до області взаємодії пучків. При обробці даних на кожному окремому детекторі, можна отримати кінцеву, спільну картину треків частинок. Під час оновлення ВТС були покращені інші детектори.

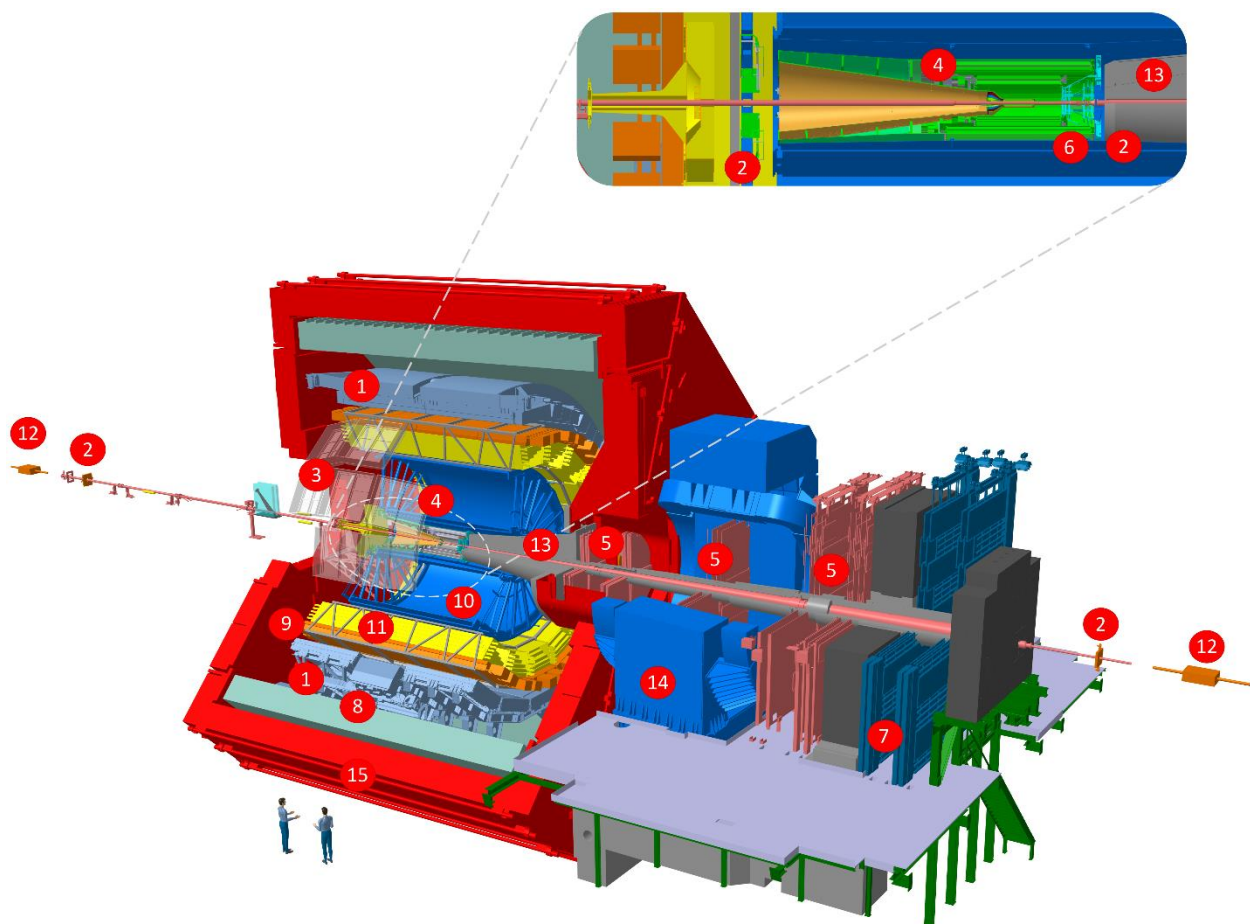


Рис. 2.1. Схема будови ALICE, де 1- ElectroMagnetic Calorimeter (EMCal), 2 - Fast Interaction Trigger (FIT), 3 - High Momentum Particle Identification Detector (HMPID), 4 - BTC, 5 - Muon Tracking Chambers (MCH), 6 - Muon Forward Tracker (MFT), 7 - Muon Identifier (MID), 8 - Photon Spectrometer (PHOS), 9 - Time-of-Flight detector (TOF), 10 - Time Projection Chamber (TPC), 11 - Transition Radiation Detector (TRD), 12 - Zero-Degree Calorimeters (ZDC), 13 – Absorber, 14 - Dipole Magnet, 15 - L3 Magnet. [8]

Експериментальна установка складається з центрального стовбура, що міститься в соленоїдному магніті ($B = 0,5 \text{ T}$) і передньої мюонної системи з

дипольним магнітом, рисунок 2.1. Система центрального стовбура детектора призначена для ефективного відстеження в середовищі високої щільності зіткнень важких іонів, що охоплює поперечні моменти від ~ 100 MeV/c до ~ 100 GeV/c з відмінним можливістю ідентифікації адронів та мюонів.

У радіальному напрямку ВТС супроводжується Камерою проекції часу (TPC, КПЧ), що простягається від 0,85 м до 2,5 м в радіусі довжиною 5 м. З багатошаровими камерами часової проекції, використовуваними в ALICE 1, іонний зворотний потік в область дрейфу повинен був бути пригнічений активним затисканням, що, в свою чергу, обмежувало швидкість зчитування приблизно до 700 Гц для зіткнень Pb-Pb. Це обмеження знімається в оновленому TPC шляхом використання відлікових камер на основі плівки Gas Electron Multiplier (GEM), які зменшують зворотний потік іонів і призводять до просторового заряду в КПЧ до рівня, який можна виправити під час роботи детектора з частотою взаємодії Pb-Pb до 50 кГц.

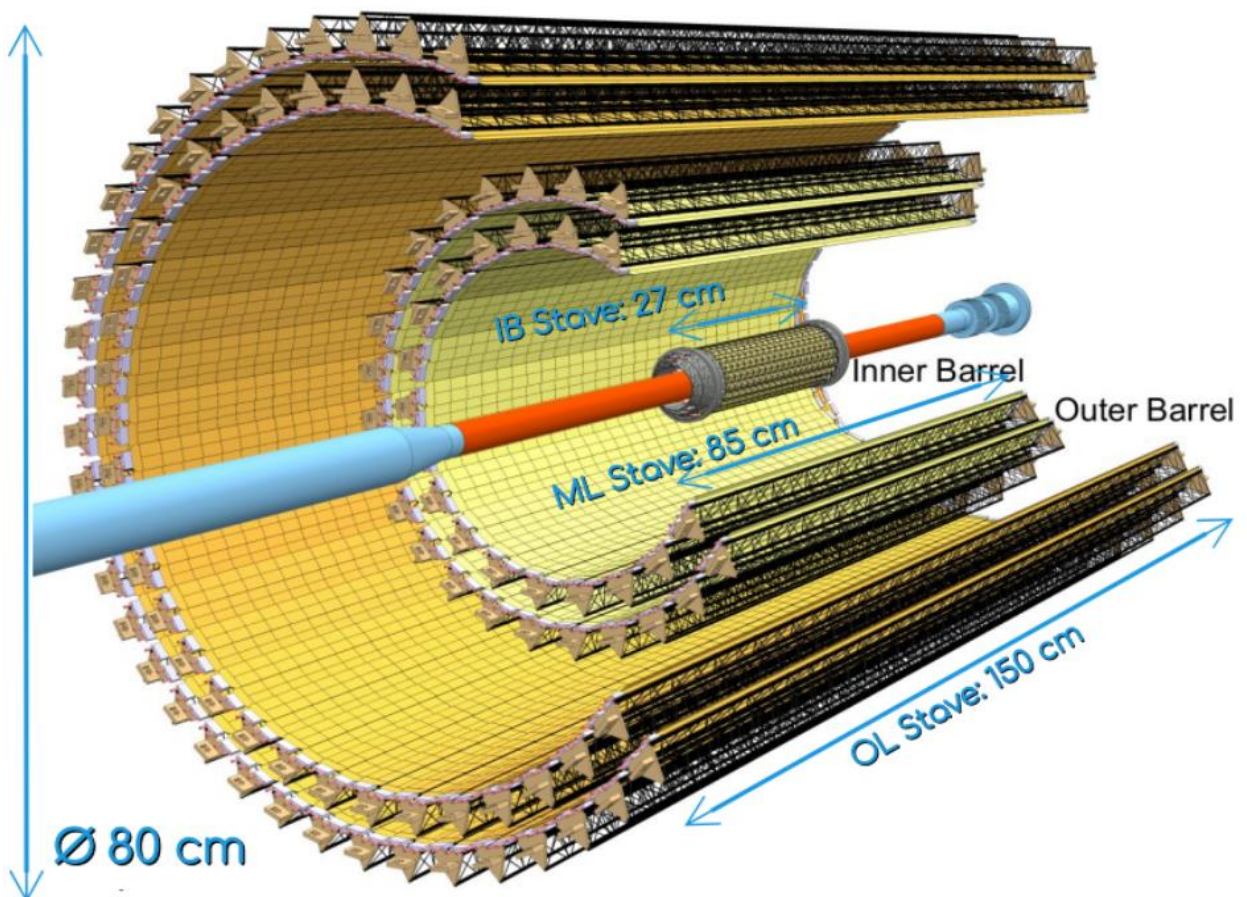


Рис. 2.2. Схематичне зображення ВТС [1]

ВТС має форму циліндру, діаметр основи якого 80 см, а найбільший шар має довжину 1,5 м. Загальна площа поверхні активних сенсорів – 10 м². Розміщає 24 тисячі чипів та $12,5 * 10^9$ пікселів.

Рисунок 2.2. Зображує схематичну структуру ВТС, в тому числі є рівні: Inner Barrel (IB) – шари 0, 1, 2; рівень Outer Barrel який включає ML – шари 3, 4 та OL – шари 5, 6.

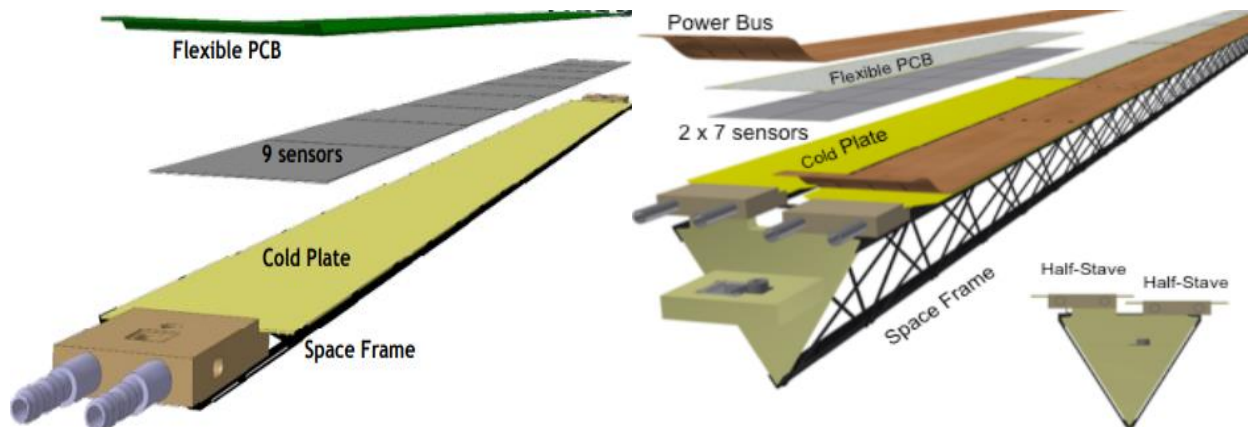


Рис. 2.3. структура планки, ліве зображення - планка для рівня IB, праве зображення - для ML, OL. [1]

Таблиця 2.1 Інформація про стейви на різних шарах

Levels	Layers	number of staves	number of chips
IB	L0	12	9
IB	L1	16	9
IB	L2	20	9
ML	L3 Top/ Bottom	12	112
ML	L4 Top/ Bottom	15	112
OL	L5 Top/ Bottom	21	196
OL	L6 Top/ Bottom	24	196

Кожен шар будується з певної кількості стейвів (стрічок), які в свою чергу складаються з чипів (рисунок 2.3). Будова стейвів відрізняється для IB та

ОВ, оскільки під час створення ІВ була основна ціль, використати як можна менше матеріалу, для покращення зчитування даних на ОВ.

Для забезпечення якості даних під час збору та початкових процесів реконструкції, ALICE Collaboration використовує систему контролю якості (QC). Крім того, QC надає результати оцінки калібрування, а також спеціальні пробіги, проведені підсистемами ALICE для вивчення їх апаратних компонентів.

РОЗДІЛ 3. ОПИС ПАРАМЕТРУ СЕРЕДНЬОГО ПОРОГОВОГО ЗНАЧЕННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Після початку роботи ВАК, ВТС виконує калібрування для вимірювання середнього порогового заряду та оцінки поточного стану детектора. Середнє порогове значення для кожного стейва є одним з головних параметрів контролю якості детектора ВТС. Середнє порогове значення – це заряд, який потрібно ввести в піксель, щоб активувати його. Це значення є середнім серед всіх пікселів в одному чипі. В свою чергу, середнє порогове значення для стейву – усереднене по всім чіпам на стейві. У випадку датчиків ALPIDE поріг заряду залежить головним чином від двох ЦАП: I_{THR} , який визначає форму імпульсу, і V_{CASN} , який регулює базову напругу.

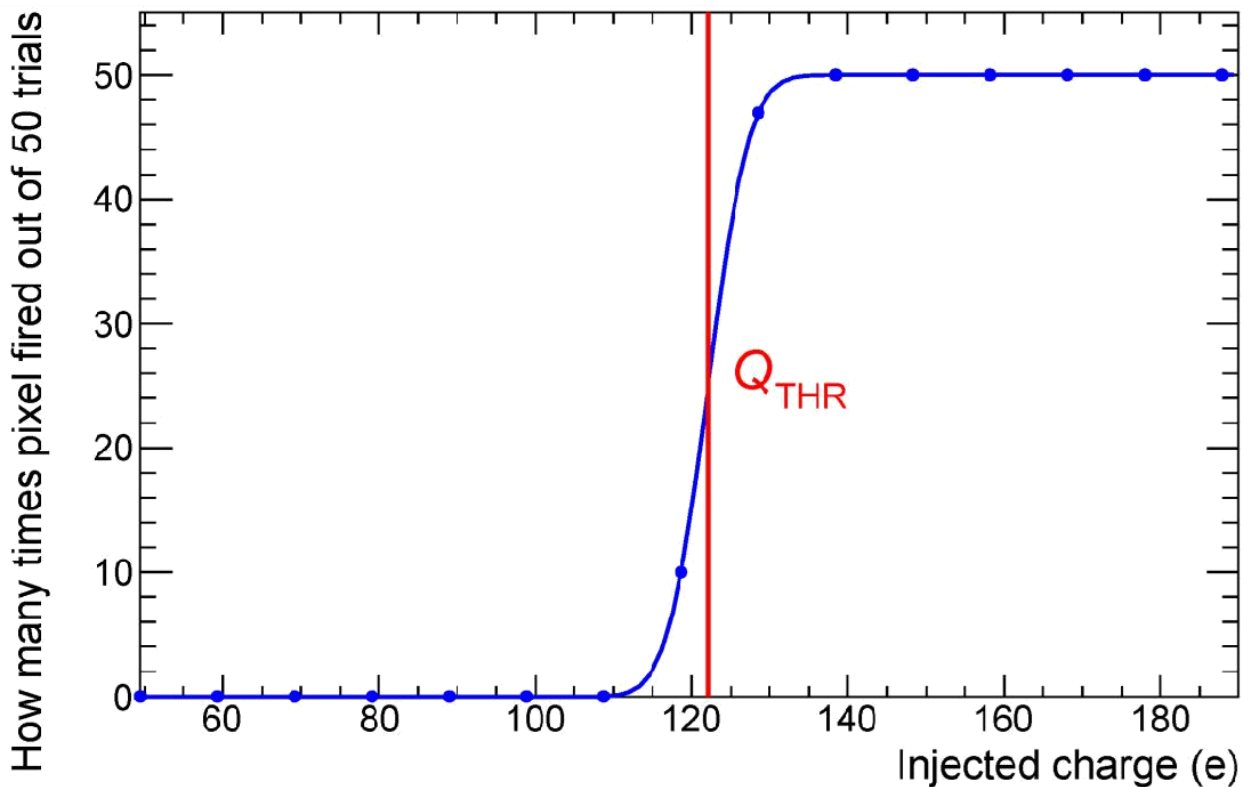


Рис. 3.1. Ймовірність реєстрації заряду в пікселі ALPIDE. Дані апроксимовані S-кривою. [2]

Приклад залежності ймовірності спрацьовування пікселя від введенного заряду показано на рисунку 3.1. Залежність має вигляд форми так званою S-кривої.

$$S(Q) = \frac{1}{2} 50 + 50 \times \operatorname{erf} \frac{(Q - Q_{THR})}{\sqrt{2}\sigma}$$

де Q – введений заряд і Q_{THR} – це порогове значення. Формула передбачає, що тимчасовий шум, який змазує порогове значення, має гаусівський характер. Приклад розподілу на рисунку 3.2.

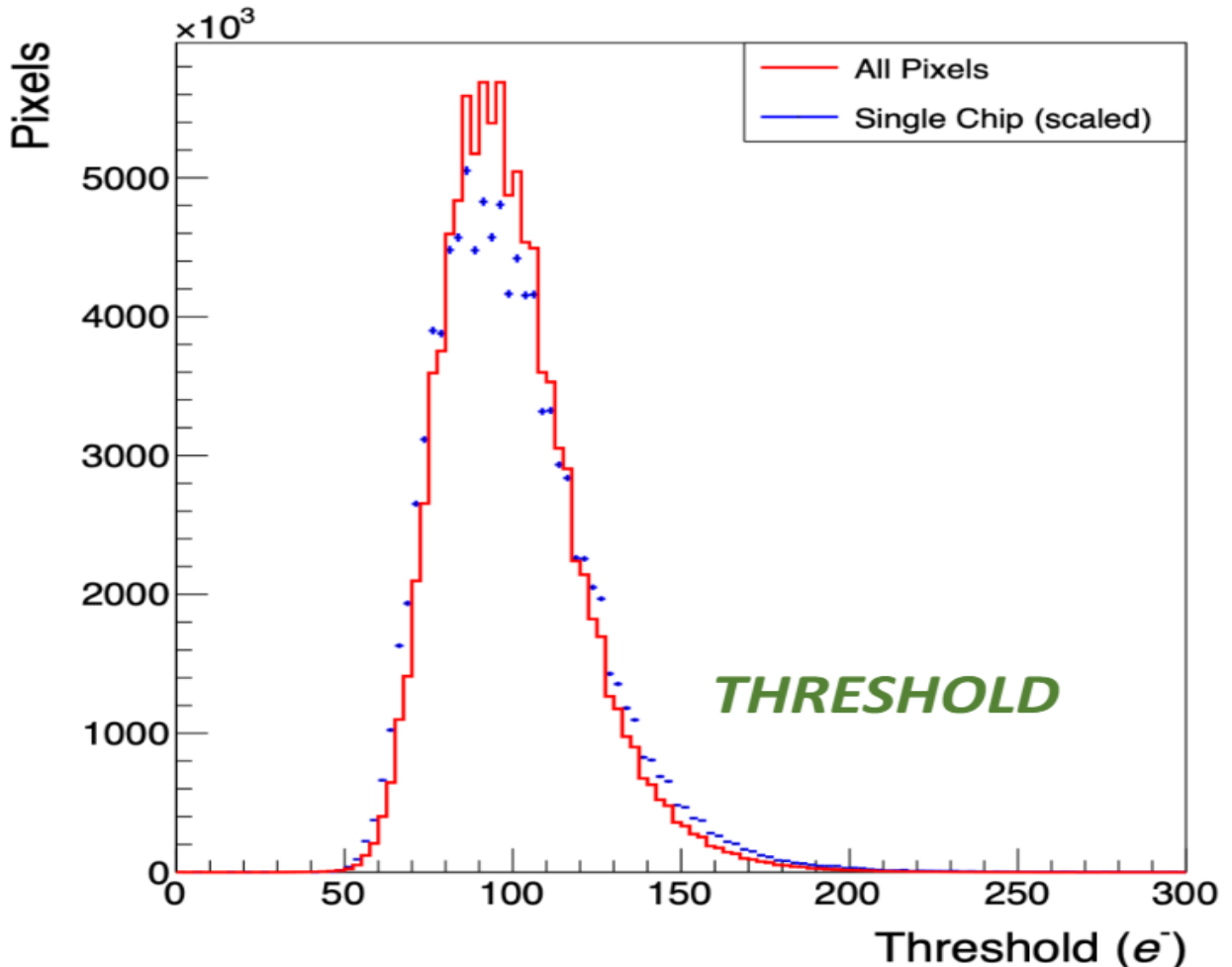


Рис. 3.2. Приклад залежності кількості увімкнених пікселів від поданого на них заряду [2]

При введенні заряду в чіп є ймовірність того, що частина пікселів буде активована. Ін'єкцією проводиться не для всіх пікселів, а тільки для 10% від загальної кількості у чипі.

Вводиться заряди в піксель крок за кроком. На кожному кроці заряд збільшується з 0 до 50 DAC зарядів (1 DAC = 10 e⁻). Для кожного кроку вимірюється 50 разів – чи перейшов піксель у активований стан, чи ні та

заносимо ці значення на вісь Y. В результаті ми маємо S-криву активації (рисунок 3.1). [10]

Детектор (дає лише необроблені дані у вигляді хітів) калібрування Workflow (аналізує дані детектора, виконує апроксимацію S-кривої, створює вектори з даними калібрування). Quality Control Workflow використовує вектори і створює 2D-гістограми та зберігає їх у ALICE DataBase.

Використовуючи ці дані, середнє порогове значення можна розрахувати для кожного чіпа. Ці значення потім заносяться у гістограми для всіх 7 шарів. У гістограмі вісь X – номер чіпу, вісь Y – номер стеву для певного шару, а кольорова вісь – середнє порогове значення для чіпу. Результат калібрування BTC публікується QC Workflow до ALICE Database у форматі CERN ROOT об'єктів. Пізніше ці дані можуть бути доступні для подальшого аналізу, наприклад створення залежності від часу, порогового значення.

Завдання полягало в отриманні середнього порогового значення для кожного стейву і побудови графіків як функції часу, тобто залежність від номера пробігу. Для цього Потрібно було завантажити гістограми з ALICE Database і перевести їх у графіки як функцію часу (номер пробігу). Рисунки повинні включати всі стейви для певного шару (таблиця. 2.1).

Для більш легкого читання графів, починаючи з 3-го шару, розділяємо їх на верхню і нижню частини. Створене програмне забезпечення повинно бути інтегроване в загальний скрипт оболонки Linux у QC аналіз фреймворк. Експериментальної обробки даних, яка включає в себе багато інших параметрів, таких як частота помилкових влучень якості реконструкції треку, параметри кластеризації, тощо.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

4.1 Опис вхідних даних

Приклад гістограми, яка служить вхідними даними для програмного забезпечення, показано на рисуюнок 4.1. Вхідні дані мають форму .root файлу і містить 2D - гістограми для IB, ML і OL. Кожна клітинка даної гістограми надає інформацію про пороговий заряд для одного конкретного чіпу.

Для отримання залежності від часу у програмне забезпечення потрібно заносити гістограми для кожного з пробігів у необхідній кількості. Це дозволяє створювати графіки, як для короткострокових періодів, і знайти залежності від поточних ефектів, так і для довгострокових періодів, наприклад, щоб побачити, як випромінювання впливає на стейви детектора.

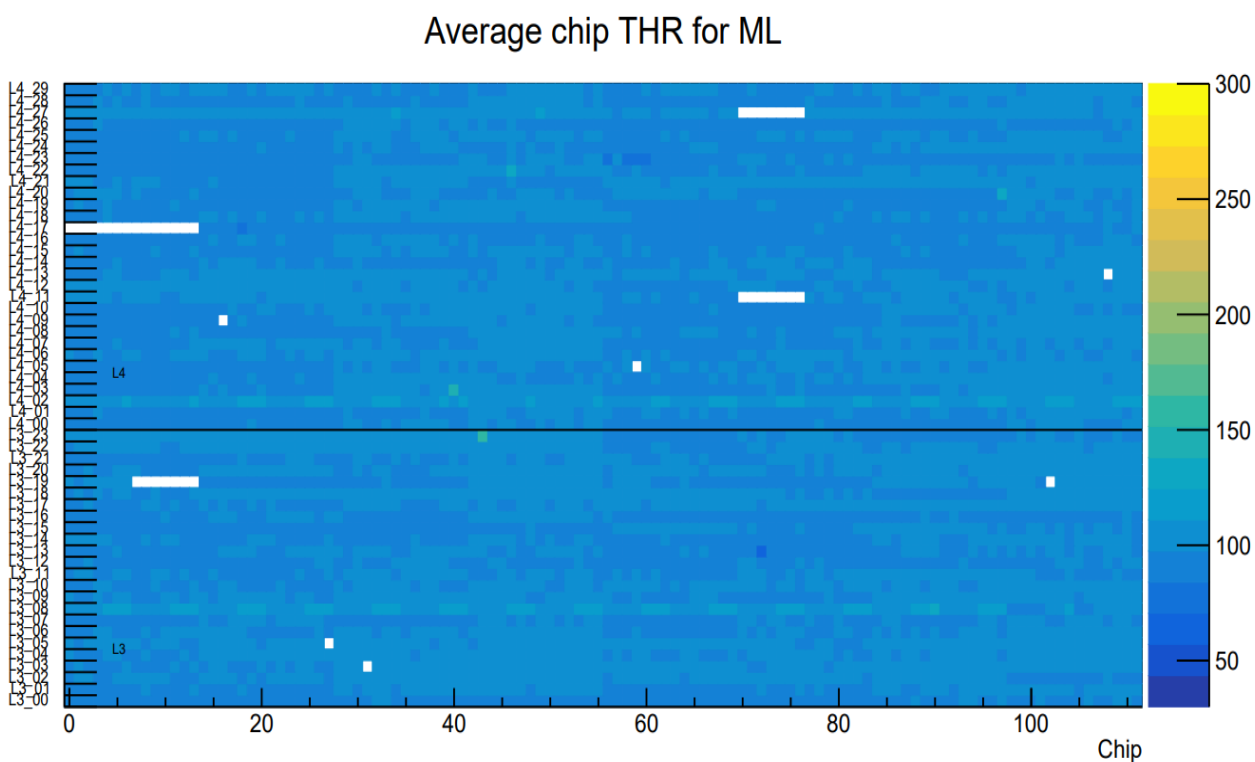


Рис. 4.1. Приклад гістограми середніх порогових значень для чіпів, для рівня ML (шари 3, 4). X-вісь – номер чіпу, вісь Y — це номер стейву у шарі, а вісь Z- порогове значення в одиницях DAC.[11]

4.2 Алгоритм аналізу

Алгоритм аналізу:

- Середнє порогове значення обчислюється для стейву, виключаючи чіпи з нульовими значеннями (чіпи, які взагалі не відправляли дані), кількість яких динамічно підраховується для кожного стейву і кожного пробігу окремо.

- Алгоритм має можливість виключити пробіги, які могли б надати проблемну інформацію або були записані для спеціальній конфігурації детектора.

- На основі отриманих даних ми створюємо графіки для кожного шару (для читабельності шари, починаючи з 3-го діляться на верхні і нижні). На графіках вісь X являє собою номер пробігу, вісь Y представляє середнє порогове значення, а легенда вказує на номер стейву і символ, який використовується для його представлення.

- Створюються графіки для чіпів, які не пройшли пробіг калібрування і провалили тест порогового значення. Надалі ми плануємо додати автоматичне повідомлення, якщо кількість таких чіпів перевищує 25%, для рівняв ML та OL. (додаток 13)

4.3 Реалізація алгоритму

Реалізація алгоритму розроблялась у фреймворку CERN ROOT на базі мови програмування C++.

Дані завантажуються класом getObject.cxx у програмному забезпеченні QCanalysis з ALICE Database. Він розроблений QC групою для отримання даних про параметри необхідних для контролю якості BTC. Скрипт було змінено для отримання даних з назвою у зручній формі, для більш легкого зчитування та обробки.

Було розроблено клас AnalyzeAllLayerThresholds.C, далі буде розглянуто принцип його роботи.

Розглянемо основні додаткові функції, які були розроблені для зручного аналізу даних:

```

std::pair <Double_t, Double_t> GetAvgThresholdsForStaveAndNumberOfFailedNChip(TH2F* h, Int_t stvNum, Int_t numChip) {
    std::pair <Double_t, Double_t> avgFailed;
    TH1D* hproj = h->ProjectionX("proj", stvNum, stvNum);
    Double_t sum = 0;
    Int_t cNumChip = numChip;
    Int_t failedNumChip = 0;
    for (int i = 1; i <= numChip; i++) {
        Double_t forChip = hproj->GetBinContent(i);
        if (forChip == 0) {
            cNumChip--;
            failedNumChip++;
        }
        sum += forChip;
    }
    Double_t avg = 0;
    if (cNumChip > 0) {
        avg = sum / cNumChip;
    }
    avgFailed.first = avg;
    avgFailed.second = failedNumChip;
    return avgFailed;
}

```

Дана функція знаходить середнє порогове значення на стейв та кількість порожніх чіпів шляхом проектування оригінальної тривимірної гістограми на вісь X.

```

set <string> GetRunNumbers(TFile* analyzefile)
{
    set <string> result;
    TList* listKeys = analyzefile->GetListOfKeys();
    for (TObject* key : *listKeys) {
        string fileName = key->GetName();
        string sRunNumber = fileName.substr(fileName.find("run") + 3, 6);
        result.insert(sRunNumber);
    }
    return result;
}

```

Завдяки цієї функції отримуємо номери запусків, які далі можна буде використовувати для відображення осі X.

```

vector <LayerParameters> init() {
    LayerParameters l0 = { "IB", 1, 12, 9, 1 };
    LayerParameters l1 = { "IB", 13, 28, 9, 13 };
    LayerParameters l2 = { "IB", 29, 48, 9, 29 };
    LayerParameters l3Top = { "ML", 1, 12, 112, 1 };
    LayerParameters l3Bottom = { "ML", 13, 24, 112, 1 };
    LayerParameters l4Top = { "ML", 25, 39, 112, 25 };
    LayerParameters l4Bottom = { "ML", 40, 54, 112, 25 };
    LayerParameters l5Top = { "OL", 1, 21, 196, 1 };
    LayerParameters l5Bottom = { "OL", 22, 42, 196, 1 };
    LayerParameters l6Top = { "OL", 43, 66, 196, 43 };
    LayerParameters l6Bottom = { "OL", 67, 90, 196, 43 };

    vector <LayerParameters> config = { l0, l1, l2, l3Top, l3Bottom, l4Top, l4Bottom, l5Top, l5Bottom, l6Top, l6Bottom };
    return config;
}

```

У даній частині можна побачити конфігурацію програми. Вона складається з назви шару, порядкового номеру першого та останнього стейву, кількості чипів на стейві та кількості стейвів для кожного шару ВТС. Пізніше ця конфігурація використовується для чіткого визначення шарів для коректності розрахунків.

Перейдемо до основної функції аналізу даних.

```
void AnalyzeAllLayerThresholds() {  
    vector <LayerParameters> config = init();  
  
    vector <Int_t> colorConfig = { kRed, kGreen, kBlue, kMagenta, kOrange };  
    vector <Int_t> styleConfig = { 24,25,26,30,28,32 };  
    string filepath;  
    cout << endl << "Please enter the full path to the file to analyze" << endl;  
    gSystem->Exec("ls ../Data/*all-layers* -Art | tail -n 500");  
    cin >> filepath;  
    string runNumberSuffix = filepath.substr(filepath.find("_run"), filepath.size() - filepath.find("_run") - 5);
```

Перед початком виконання розрахунків - пропонуємо користувачу вибрати файл, з каталогу для зберігання файлів у програмному забезпеченні QCAAnalysis за замовчуванням, дані якого будуть аналізуватись.

```
TFile* analyzefile = new TFile(filepath.c_str());  
set <string> allRunNumbers = GetRunNumbers(analyzefile);  
for (int numLayer = 0; numLayer <= 10; numLayer++) {  
    LayerParameters configToUse = config[numLayer];  
    TMultiGraph* avgLayerThreshold = new TMultiGraph();  
    TMultiGraph* failedChipsForLayer = new TMultiGraph();  
    TLegend* legend = new TLegend(1, 0.19, 0.9, 0.925);  
    TLegend* legendForChips = new TLegend(1, 0.19, 0.9, 0.925);  
    int colorPointer = 0;  
    int stylePointer = 0;  
    set <string> emptyRunNumbers = {};
```

Отримуємо номери запусків. Створюємо цикл, в якому проходимо по всім шарам (їх 11, через те, що починаючи з 3 розділяємо шар на верхню та нижню частину). Створюємо об'єкт класу TMultiGraph, який буде сполучати у собі графіки для кожного окремого стейву. Оскільки створюємо у циклі для усіх 11 шарів, то і отримаємо 11 графіків.

```
for (int currentStv = configToUse.nFirstStave; currentStv <= configToUse.nLastStave; currentStv++) {  
    TGraph* stvGraph = new TGraph();  
    TGraph* failedChips = new TGraph();  
    Double_t runSequenceNumber = 1;  
    for (auto runNumber : allRunNumbers) {
```

Створюємо ще цикл у якому проходимо по стейвам для всіх шарів, конфігурацію отримуємо з параметрів, про які було вказано вище. У цьому циклі створюємо об'єкт класу TGraph – графіки для кожного стейву, з яких будуть складатися TMultiGraph. Після чого входимо у новий цикл в якому проходимо по всім запускам, перелік, яких отримали вище.

```
TList* listKeys = analyzefile->GetListOfKeys();
for (TObject* key : *listKeys) {
    string fileName = key->GetName();
    if (fileName.find(configToUse.name) != string::npos && fileName.find(runNumber) != string::npos) {
        TH2F* h = (TH2F*)analyzefile->Get(key->GetName());
        if (h->Integral() == 0) {
            emptyRunNumbers.insert(runNumber);
            continue;
        }
        std::pair<Double_t, Double_t> avgFailed = GetAvgThresholdsForStaveAndNumberOfFailedNChip(h, currentStv, configToUse.nChipsPerStave);
        Double_t avgThrForStv = avgFailed.first;
        Int_t failedNumChip = avgFailed.second;
        if (avgThrForStv != 0) {
            stvGraph->AddPoint(runSequenceNumber, avgThrForStv);
        }
        failedChips->AddPoint(runSequenceNumber, failedNumChip);
        runSequenceNumber++;
    }
}
```

У циклі вичитуємо гістограми з файлу, який заносили та перевіряємо відсутність порожніх. Викликаємо функцію, яка повертає порогове значення та кількість порожніх чипів, та заносимо ці дані на графік для одного окремого стейву. На даному етапі отримали багато графіків лише для одного стейву. Закриваємо цикли до циклу, який проходив по конфігурації шарів ВТС.

```
stvGraph = AddStyle(stvGraph, colorConfig[colorPointer], styleConfig[stylePointer]);
failedChips = AddStyle(failedChips, colorConfig[colorPointer], styleConfig[stylePointer]);
int colorConfigSize = colorConfig.size() - 1;
if (colorPointer == colorConfigSize) {
    colorPointer = 0;
    stylePointer = stylePointer + 1;
}
else {
    colorPointer = colorPointer + 1;
}
legend->AddEntry(stvGraph, Form("Stv%d", currentStv - configToUse.nStavesForLayer), "p");
avgLayerThreshold->Add(stvGraph);
legendForChips->AddEntry(failedChips, Form("Stv%d", currentStv - configToUse.nStavesForLayer), "p");
failedChipsForLayer->Add(failedChips);
```

Задаємо стилі та додаємо легенду на графіки та об'єднуємо у один графік на якому будуть усі стейви для кожного шару.

Після закінчення розрахунків середнього порогового значення та кількості порожніх чипів дані зберігаються в двох форматах, pdf з усіма графіками разом, для зручного аналізу та у окремих png файлах для кожного конкретного графіку.

Зберігаємо графіки та отримуємо:

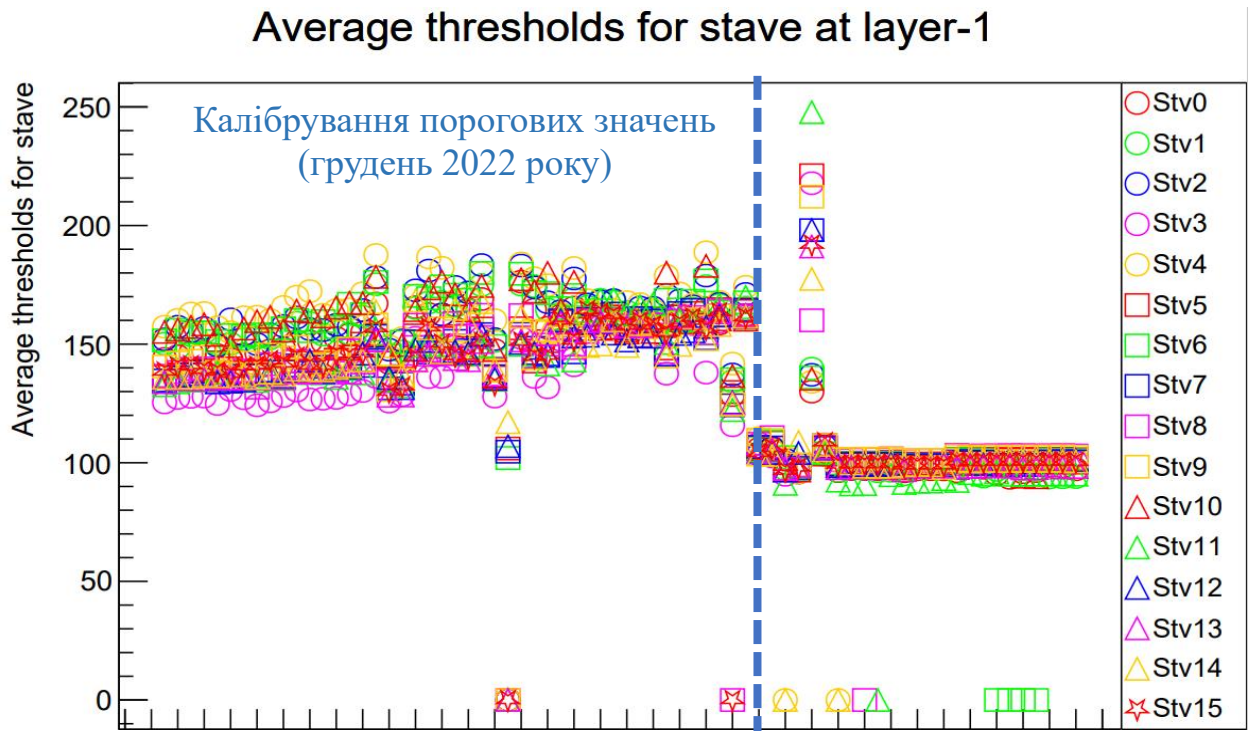


Рис. 4.2. Демонстраційний графік зміни порогового значення для шару 1 за один рік з 01.09.2022 – 05.10.2023. Синя лінія – калібрування, проведене у грудні 2022 року.

РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАНИХ

Зроблений мою аналіз середнього порогового значення як функції часу дозволив виявити конкретні залежності та тенденції.

У роботі приведені нижче приклади для різних шарів та різних періодів. Наприклад, періоди пробігів для зіткнень свинець-свинець (Pb + Pb) і протон-протон (p + p). Графіки показують тенденцію в поведінці порогового значення для стейвів в різних умовах та для різних об'єктів, взаємодіють (в першу чергу підвищеної радіації та у цілому це ймовірнісний процес тому можуть впливати багато інших факторів). Приклад графіків за травень 2024 року додатки 1-11.

5.1. Графіки, отримані для запуску Pb+Pb:

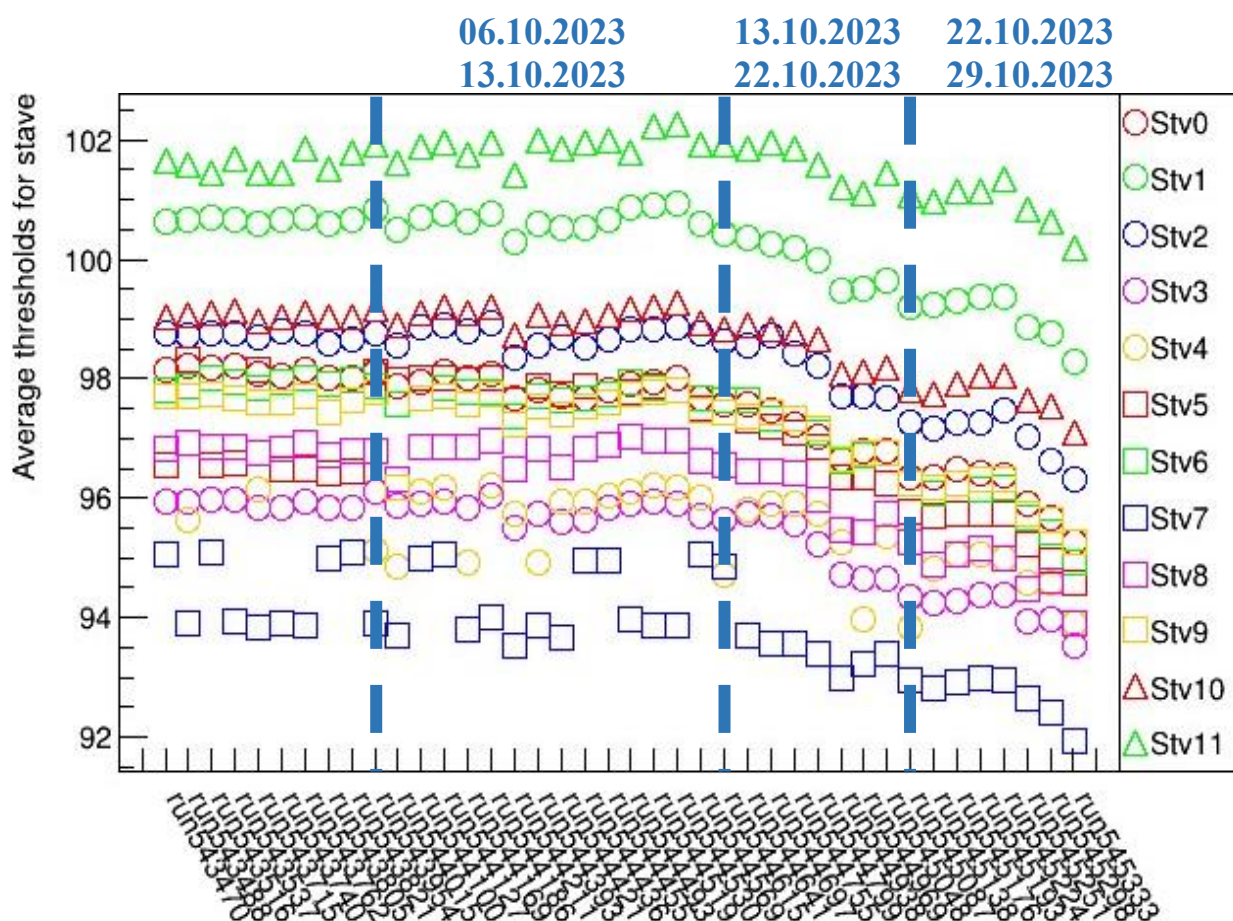


Рис.5.1. Приклад графіку для шару 0, побудований за період Pb+Pb прогонів.

Для шару 0 (рисунок 5.1) можна спостерігати тенденції для кожного окремого стейву і невеликі коливання цих значень. Також можна помітити падіння рівня за останній період $Pb+Pb$. Це найближчий шар до області взаємодії, тобто випромінювання впливає на нього більше, ніж на інші шари. З цього графіку, можна зробити висновок, що середнє порогове значення з часом зменшується при високих дозах випромінювання.

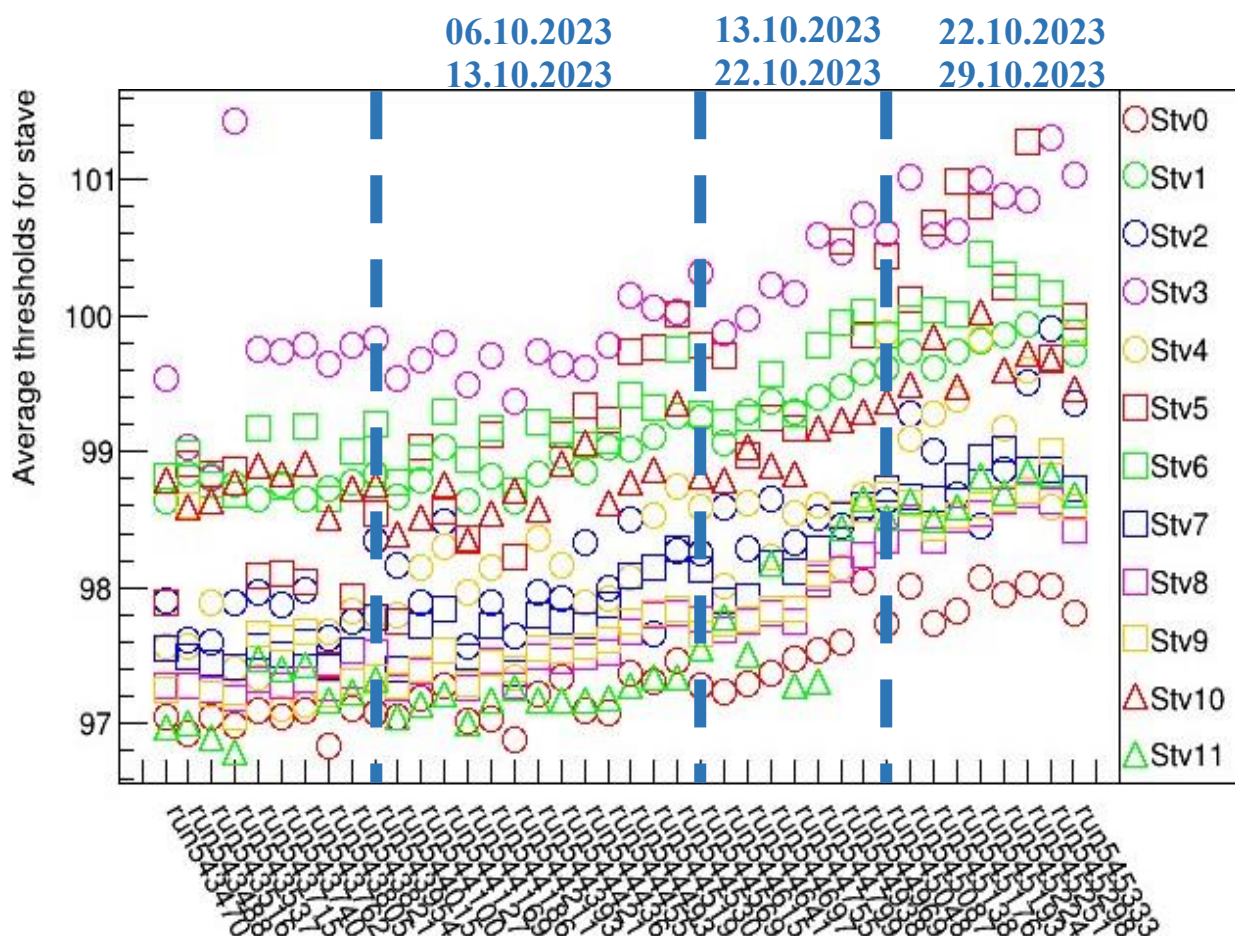


Рис.5.2. Приклад графіку для верхньої частини шару 3 за період $Pb+Pb$ прогонів.

Для верхньої частини шару 3 (рисунок 5.2) можна спостерігати збільшення середнього порогового значення з часом під впливом випромінювання. Однак в останній період (22.10.2023-29.10.2023) значення починають виходити на плато і темпи їх зростання знижуються. Можна побачити, що для шарів, які знаходяться далі від точки зіткнення, поведінка

параметра інша, значення збільшуються, але через певний проміжок часу вони виходять на плато.

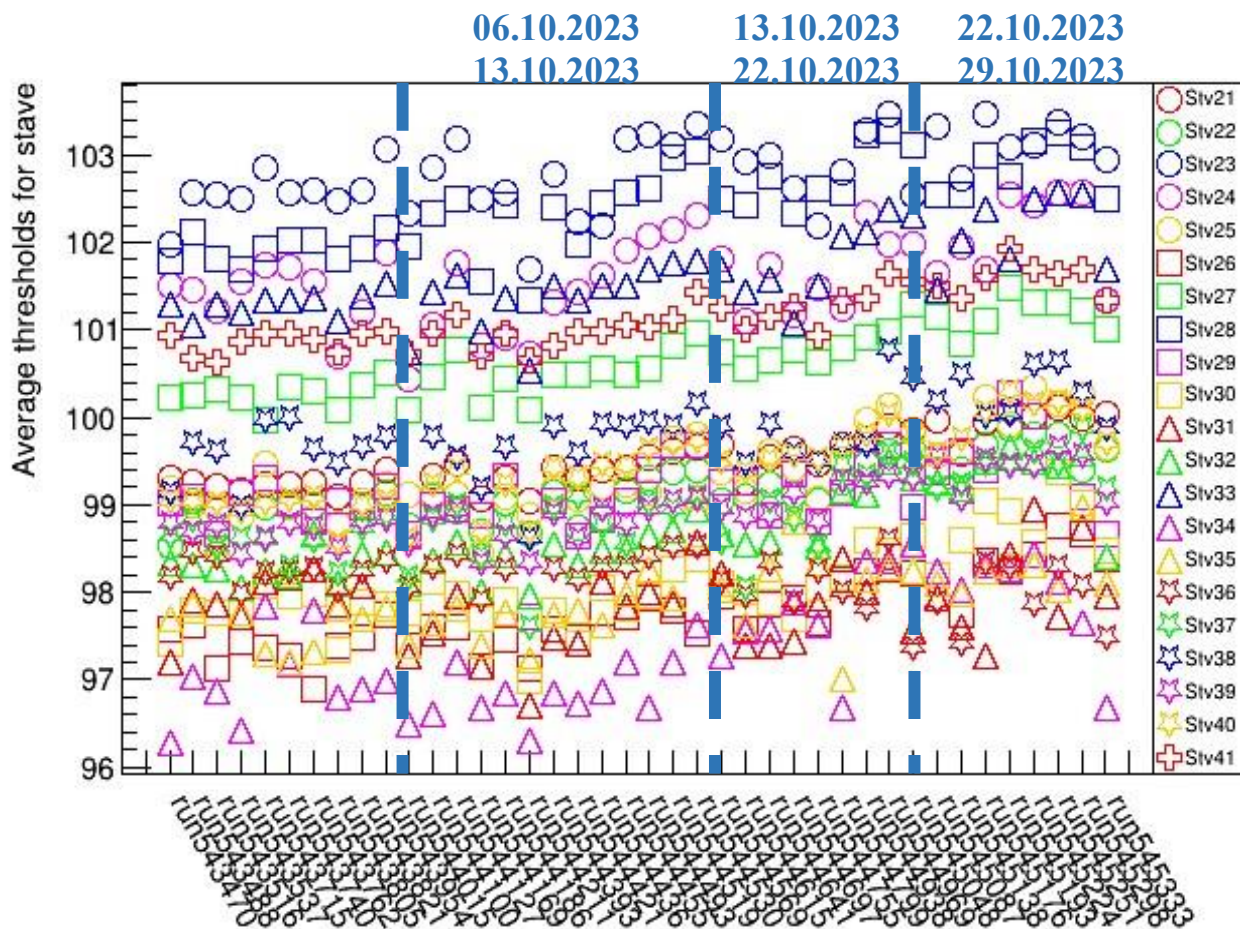


Рис.5.3. Приклад графіку для нижня частини шару 5 за період P_b+P_b прогонів.

З графіку для шару 5 (рисунок 5.3), можна побачити, що є невеликі коливання значення, проте чітко можна прослідкувати незначне зростання середнього порогового значення. Тобто, при ще менших дозах радіації ніж на шарі 3, значення зростає ще повільніше та прослідкувати вихід на плато не вдається.

Висновок з цих трьох графіків можна зробити такий, що при великих дозах радіації поведінка середнього порогового значення сильно залежить від відстані на якій розміщено шар та від доз радіації, які він отримує. Можна припустити: при умовах, які спостерігаються при P_b+P_b прогонах, значення

параметру повинне спочатку зростати, після чого виходити на плато, потім спадати. Така поведінка не спостерігається у шару 0, проте він отримує найбільші дози радіації, і може перейти одразу до спадання значення. Насправді, це дивовижний ефект дослідження якого будуть продовжуватись.

5.2. Дані отриманні в період $r+p$, за квітень 2024 року.

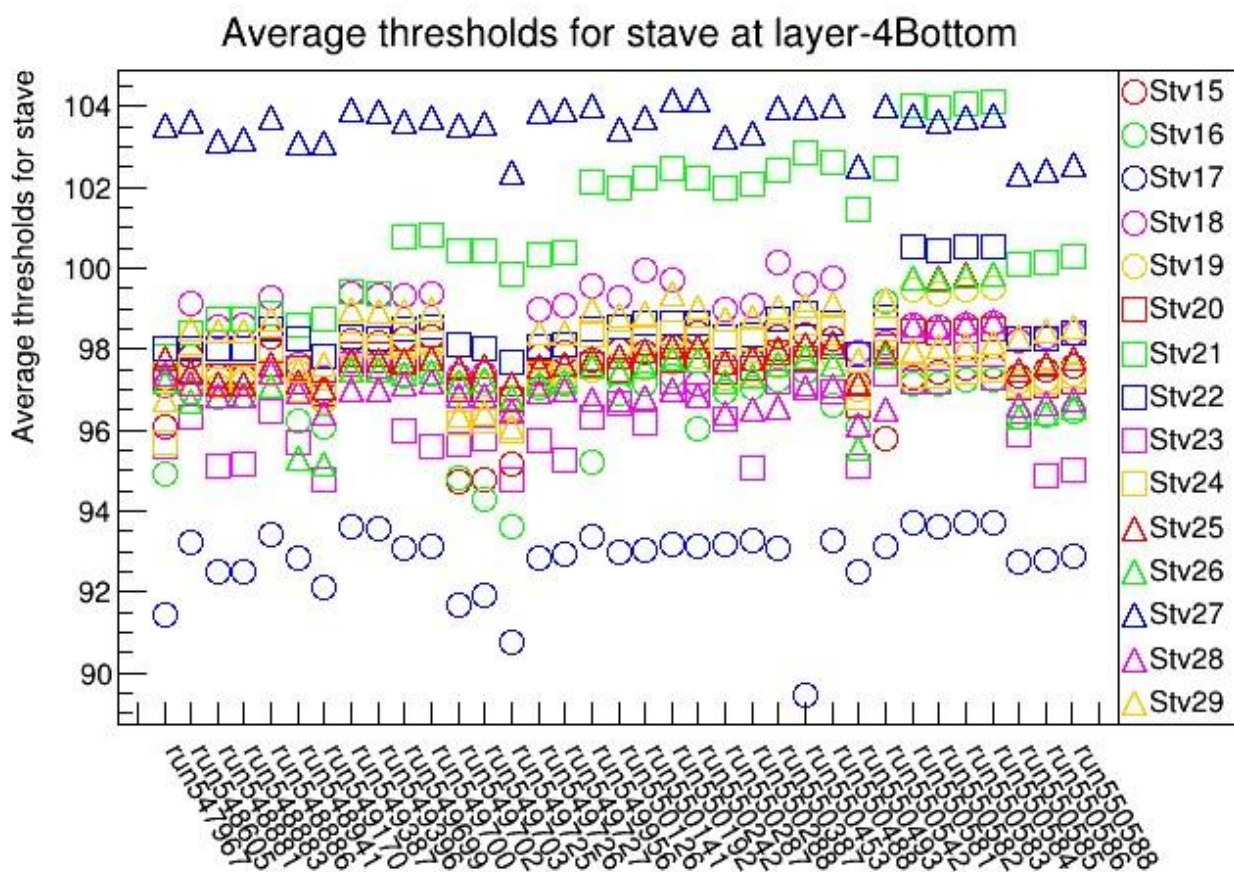


Рис.5.4. Приклад графіку для верхньої частини шару 4 за період $r+p$ прогонів.

На графіку (рисунок 5.4) можна побачити невеликі періодичні коливання середнього порогового значення. Загалом немає трендів зміни параметру, окрім стейву 21, у якого збільшується значення. Також для прогонів з 550581 по 550584 спостерігається підвищення рівню, для цих прогонів були зміненні параметри, тому і значення змінились.

Зміна трендів для $r+p$ прогонів не спостерігається на інших графіках. Значення приблизно стабільні.

5.3. Шум середнього порогового значення.

Шум середнього порогового значення для чіпу – це значення відхилення апроксимації від S-кривої (дивись рисунок 3.1), з обох боків від неї. Цей параметр показує похибки в середніх порогових значеннях. Розраховується так само, як і минулий параметр.

Це новий параметр аналізу, який було вирішено аналізувати у травні 2024 року, тому дані актуальні та нові. Графіки побудовані за один рік, аж до початок червня 2024 року (дивись додатки 13-21).

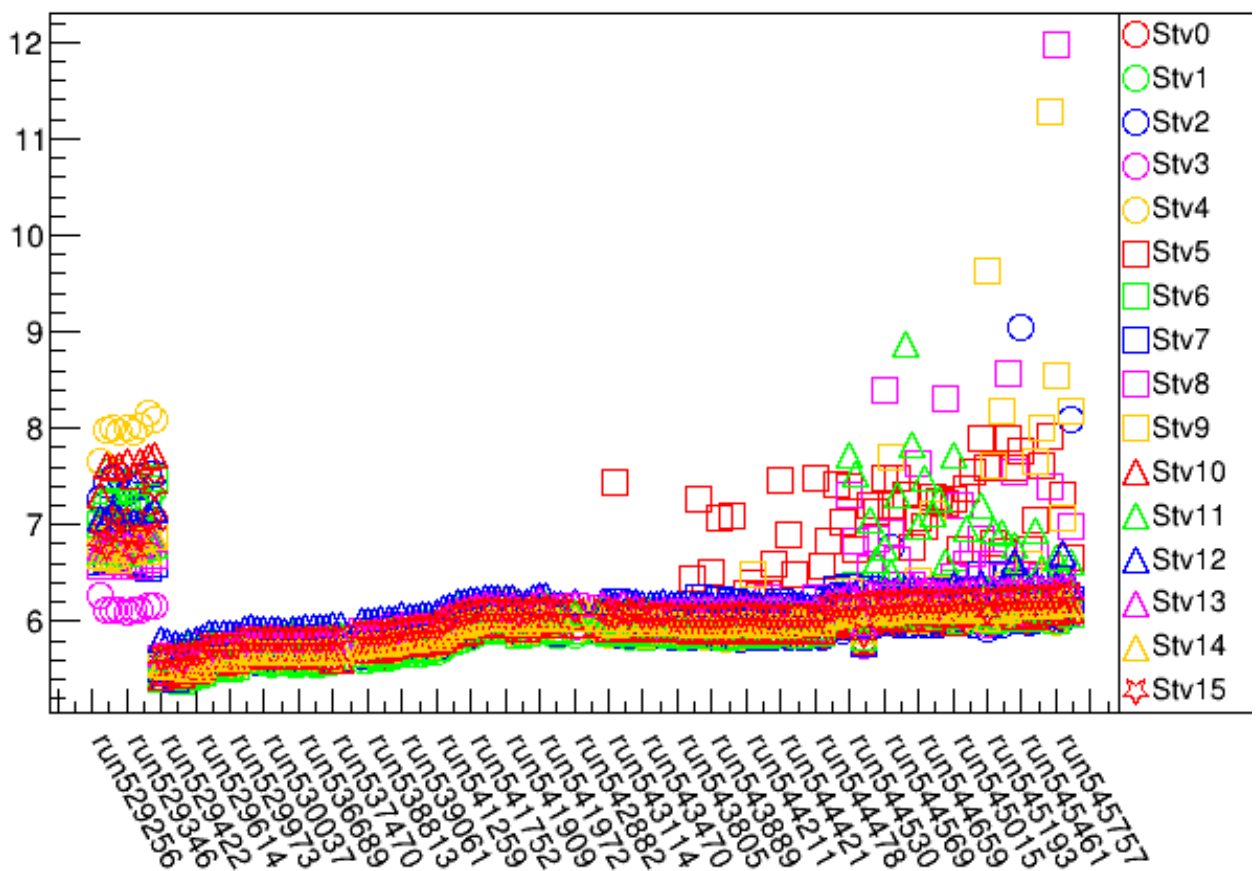


Рис.5.5. Приклад графіку шуму середнього порогового значення для шару 1.

У лівій частині графіків добре видно момент оптимізацію шуму, що призвело до його суттєвого зменшення.

З характеру поведінки кривої можна побачити, що у період Pb-Pb кривизна має більше значення, що може бути пояснена найбільшою щільністю треків (порядку, або більше 8000 треків на одну подію).

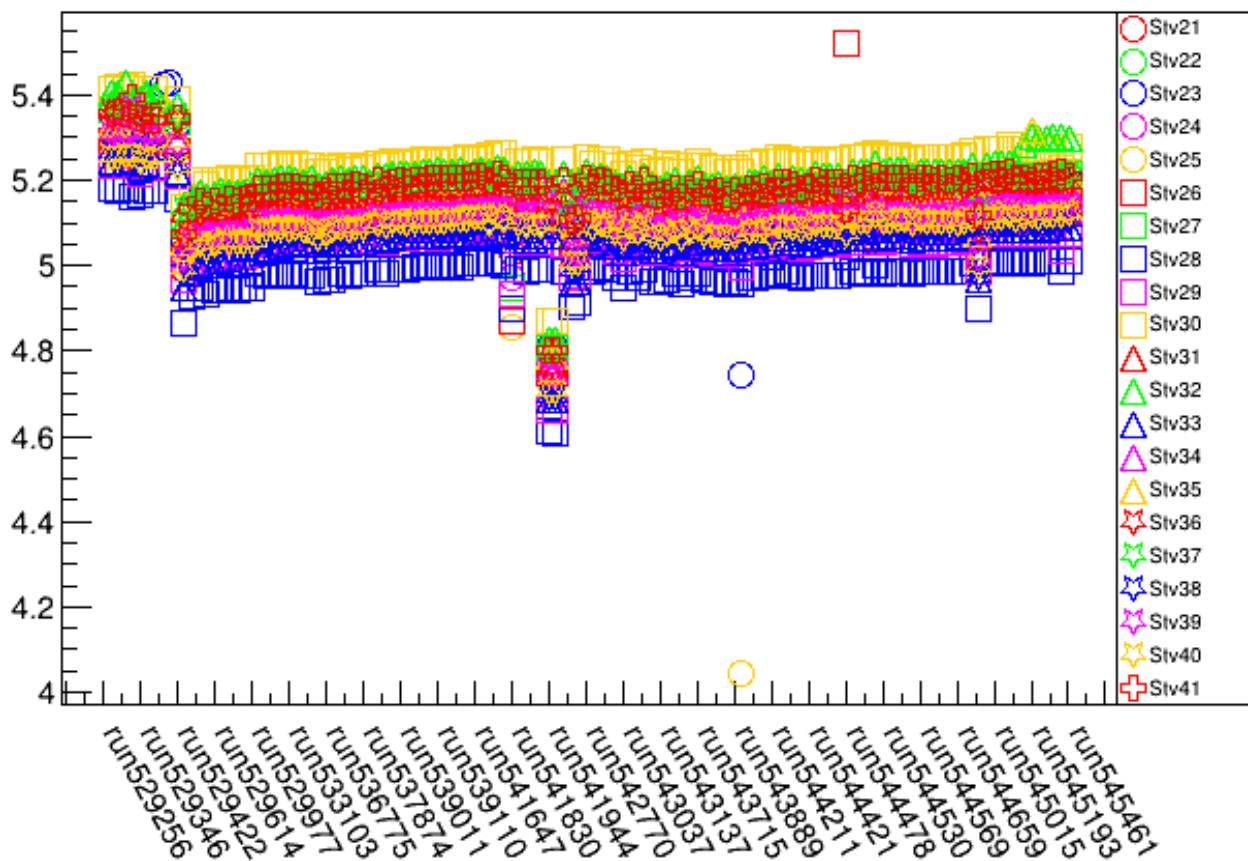


Рис.5.6. Приклад графіку шуму середнього порогового значення для нижньої частини шару 5.

Як видно тренд для рівнів ІВ та ОВ, цей ефект проявляється більше для внутрішніх шарів, в той час як на зовнішніх шарах значення шуму ближче до константи.

Збурення, які ми можемо спостерігати для ІВ у правій частині графіку, можуть з'являтися через те, що оптика пучків ВАК налаштована не ідеально та область взаємодії може іноді зміщуватись, що буде одразу приводити до перешкод на рівні ІВ. Ще одним можливим поясненням може бути не стабільність відповідної напруги та джерела живлення окремого стейву.

ВИСНОВКИ

У даній роботі ми сконцентрувалися на дослідженні еволюції параметру середнього порогового значення активації чіпів ALPIDE. У рамках роботи ALICE ITS QC групи, мною був розроблений алгоритм аналізу середнього порогового значення та його шуму, як функції часу. Цей алгоритм був успішно інтегрований у загальний Quality Control фреймворк, який забезпечує максимально ефективну та безперервну роботу детектору BTC, який у свою чергу є одним з найважливіших детекторів експерименту ALICE. Отримано нові результати за довгий період збору експериментальних даних на ВАК. Цей період є зокрема цікавим, тому що він включає в себе зіткнення як важких іонів свинцю, так і зіткнення протонів (при енергії зіткнення 13,6 TeV).

Отримані тренди для порогового значення та його шуму виявили декілька цікавих ефектів. Поведінка з часом порогового значення суттєво відрізняється для шарів IB та OV. Для внутрішнього шару значення спадає, у період Pb-Pb запусків. В свою чергу, для OV цей параметр зростає та виходить на плато, у той самий період запусків. Різний характер тренду можна пояснити різним радіаційним навантаженням. По оцінкам з симуляції та лабораторним тестам з радіаційної стійкості, радіаційне навантаження на шар 0 в 300 разів більше ніж на шар 6. Отримані тренди задовільняють нашому розумінню того як радіаційне навантаження впливає на ALPIDE сенсори.

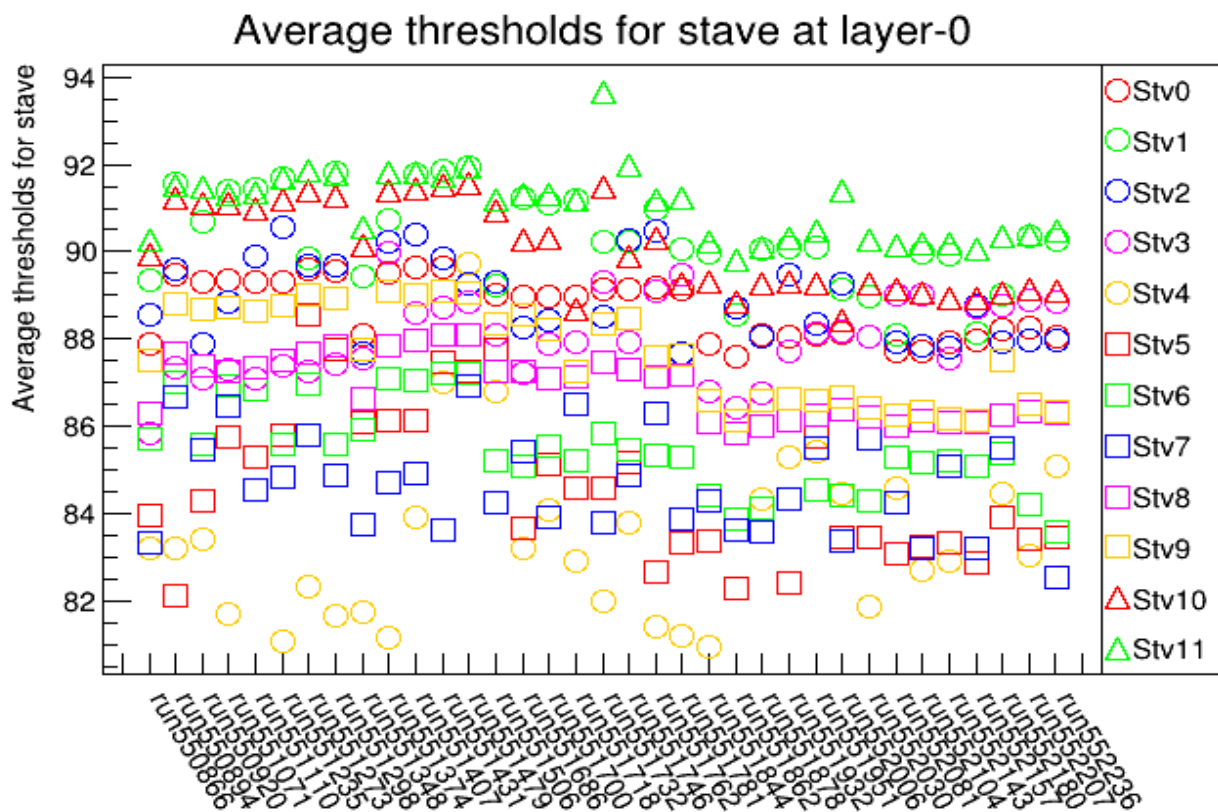
Мою були отримані тренди для шуму середнього порогового значення, які також мають цікаві особливості. Збільшення шуму у період збору даних Pb-Pb, можна пояснити дуже високою щільністю треків частинок. Цей ефект підтверджується тим, що він майже не спостерігається у зовнішніх шарах. Також виявлено значене відхилення цього параметру на рівні IB від «нормального» тренду, що може виявити неідеальність пучкової оптики або нестабільність джерела струму конкретних стейвів. Своєчасне виявлення цих ефектів є дуже важливим.

Аналіз усіх цих параметрів буде й надалі проводиться регулярно при отриманні нових даних з ВАК. У подальшому планується створити алгоритми для аналізу додаткових параметрів контролю якості ВТС, що в цілому буде слугувати оптимізації загальної роботи всього експерименту.

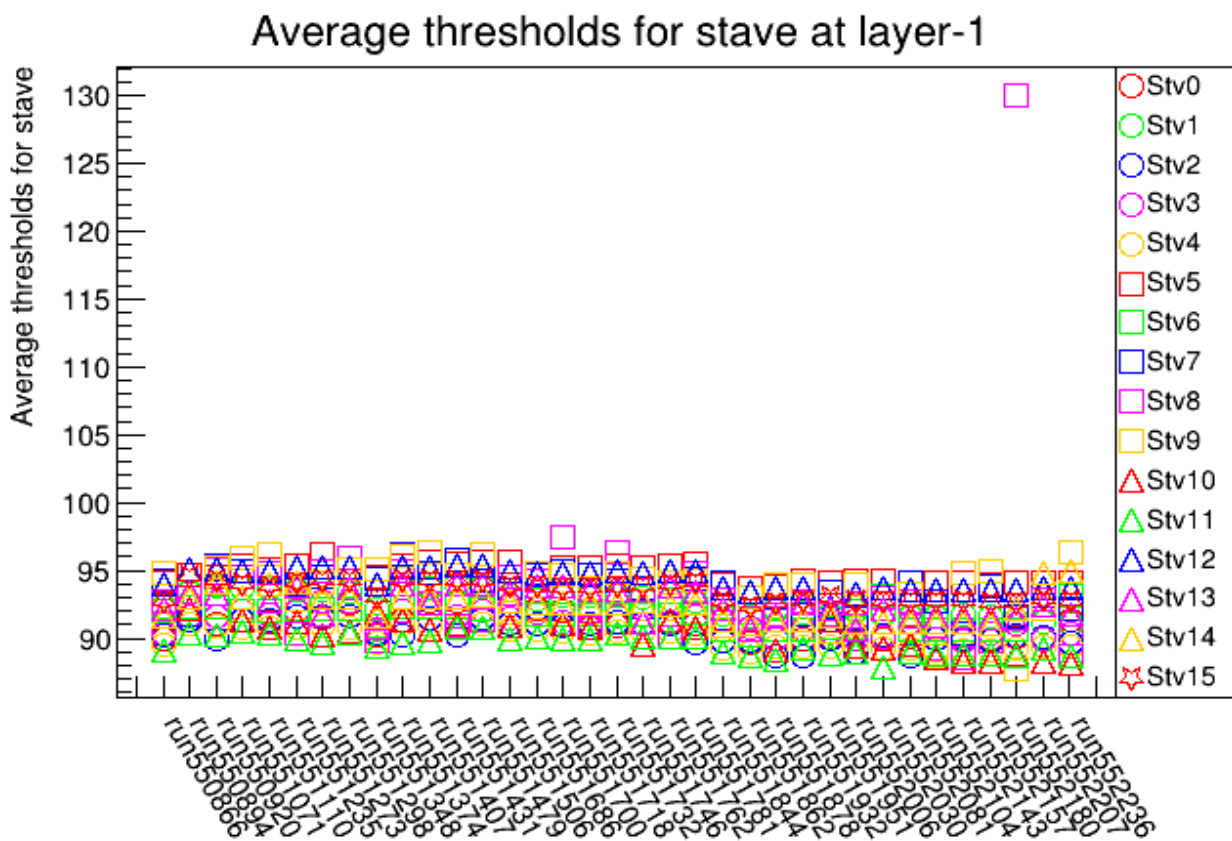
- [1] Magnus Mager. “ALICE ITS3 – a next generation vertex detector based on bent, wafer-scale CMOS sensors”. Presented 24 Sep 2021. URL: <https://indico.cern.ch/event/1071914/>
- [2] Abelev, B.; et al. [Alice Collaboration]. Upgrade of the ALICE Experiment: Letter Of Intent. J. Phys. G 2014, 41, 087001. [Google Scholar] [CrossRef]
- [3] Martinengo, P. The new Inner Tracking System of the ALICE experiment. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2017, 967, 900–903. [Google Scholar] [CrossRef]
- [4] Aglieri, G.; Cavicchiola, C.; Chalmet, P.L.; Chanlekc, N.; Collud, A.; Giubilatoe, P.; Hillemannsa, H.; Juniquea, A.; Keila, M.; King, D. Monolithic active pixel sensor development for the upgrade of the ALICE inner tracking system. J. Instrum. 2013, 8, C12041. [Google Scholar] [CrossRef]
- [5] Mager, M.; et al. [ALICE Collaboration]. ALPIDE, the Monolithic Active Pixel Sensor for the ALICE ITS upgrade. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2016, 824, 434–438. [Google Scholar] [CrossRef]
- [6] TowerJazz. Available online: <http://www.jazzsemi.com> (accessed on 26 January 2019).
- [7] B Abelev et al. Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System. Tech. rep. Nov. 2013. DOI: 10.1088/0954-3899/41/8/087002. URL: <https://cds.cern.ch/record/2011297>.
- [8] The ALICE collaboration. ALICE upgrades during the LHC Long Shutdown 2. Journal of Instrumentation. 2024
- [9] Raskina V, Křížek F. Characterization of Highly Irradiated ALPIDE Silicon Sensors. Universe. 2019; 5(4):91. <https://doi.org/10.3390/universe5040091>
- [10] Nicolo’ Valle. “A Monolithic Active Pixel Sensor-based Inner Tracking System for ALICE”. In the *15th Terascale Detector Workshop 2023*. URL: https://indico.desy.de/event/36972/contributions/135034/attachments/80455/105173/ITS2_tw.pdf
- [11] ALICE DataBase. URL: <http://ccdb-test.cern.ch:8080/browse/qc/ITS/MO/>

[12] Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (n.d.). *ALPIDE Operations Manual*. INFN. https://sunba2.ba.infn.it/MOSAIC/ALICE-ITS/Documents/ALPIDE-operations-manual-version-0_3.pdf

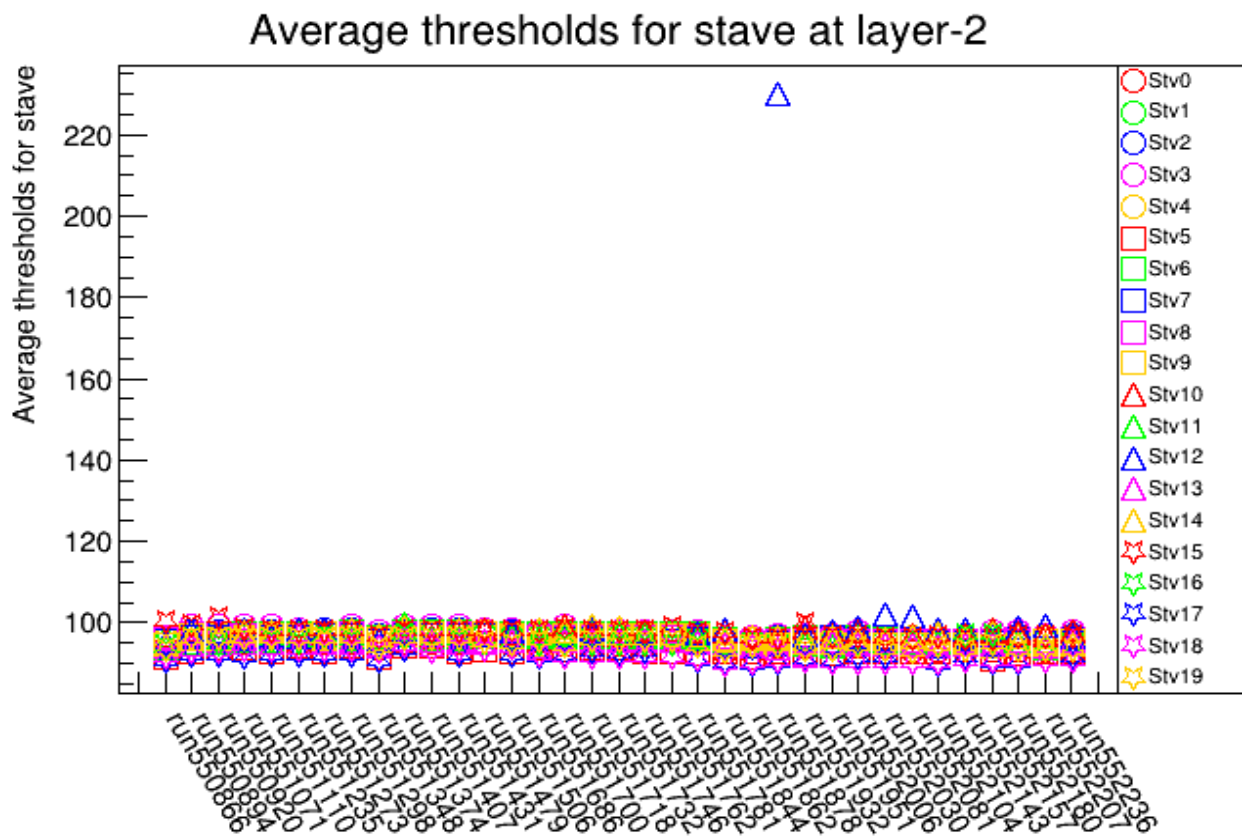
ДОДАТКИ



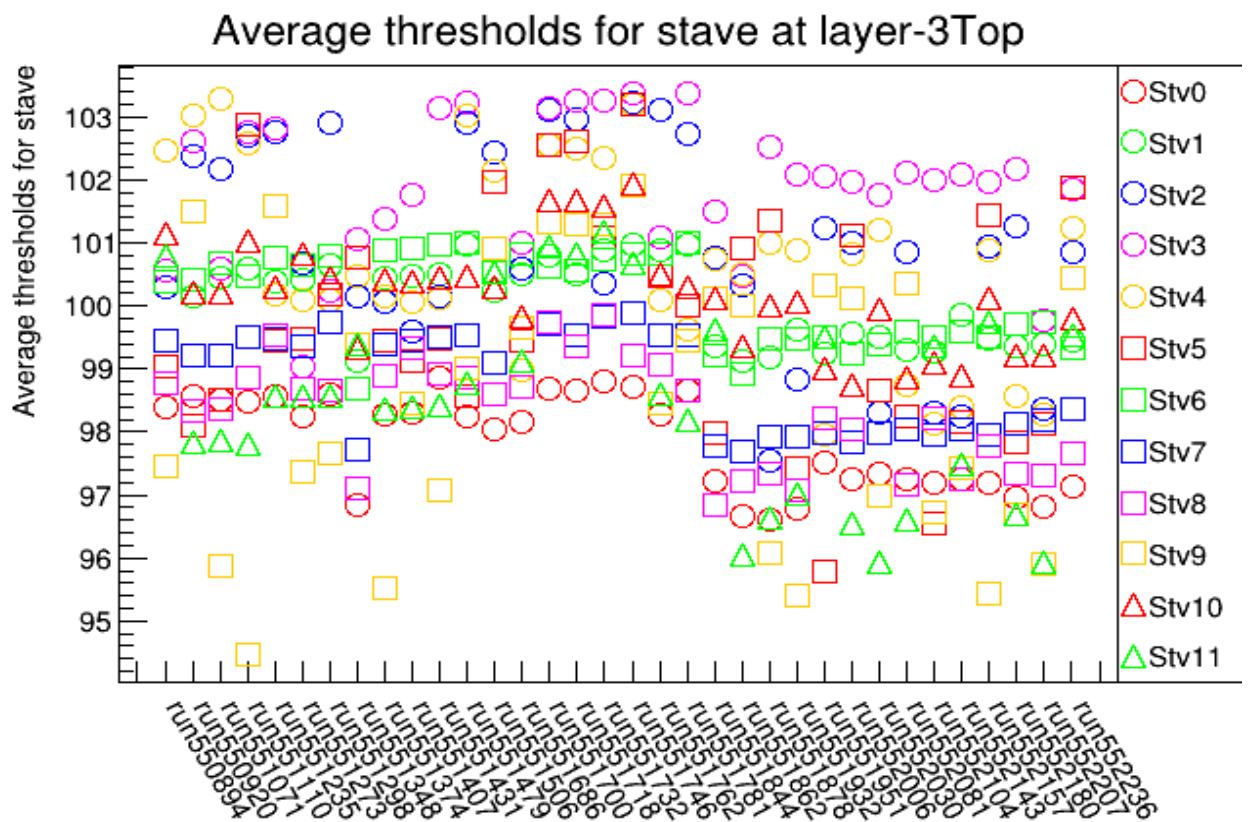
Додаток 1. Середні порогові значення, шар 0, за період травня 2024 року



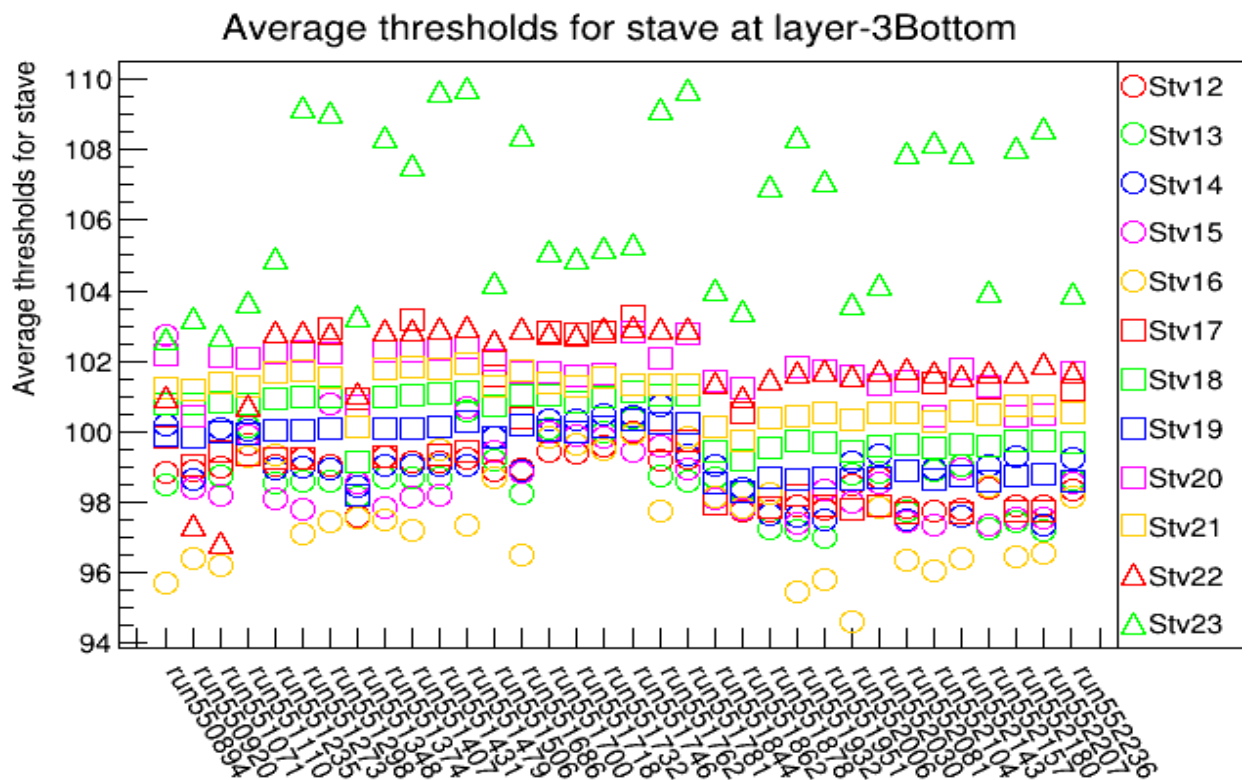
Додаток 2. Середні порогові значення, шар 1, за період травня 2024 року



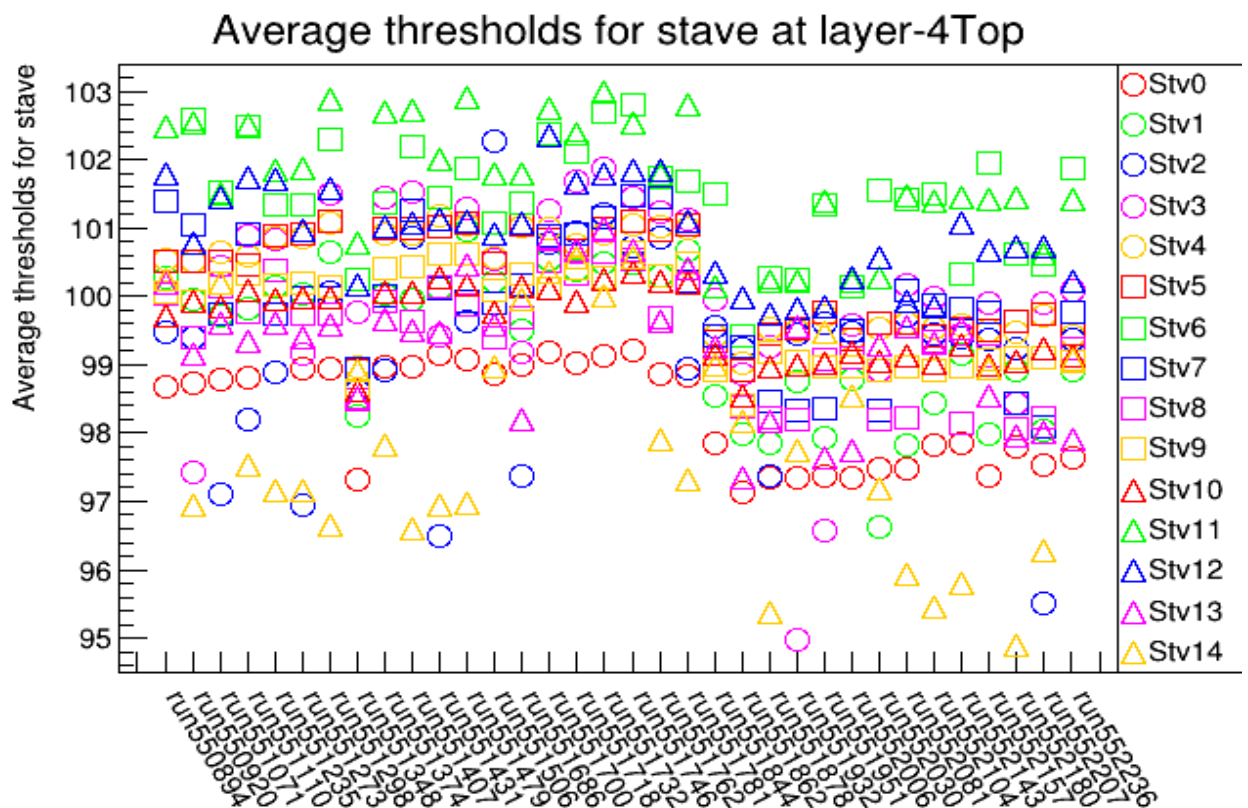
Додаток 3. Середні порогові значення, шар 2, за період травня 2024 року



Додаток 4. Середні порогові значення, верхньої частини шару 3, за період травня 2024 року

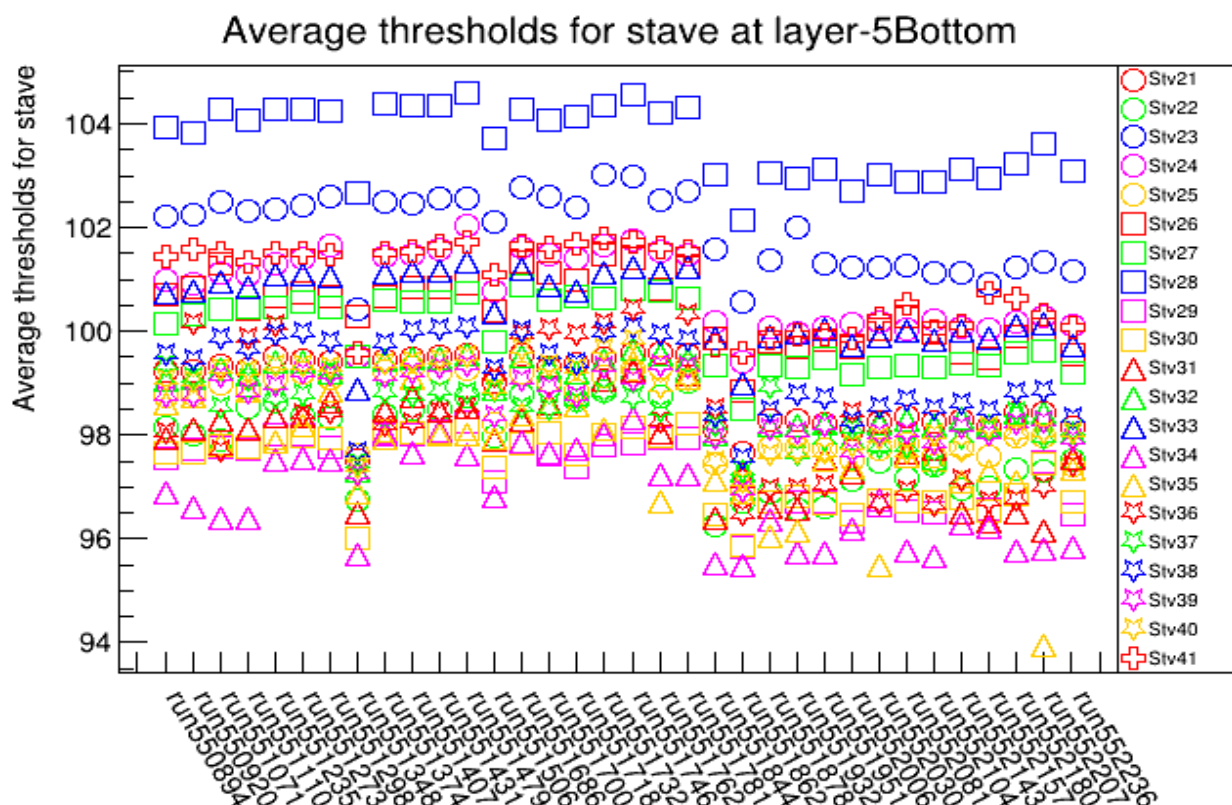


Додаток 5. Середнє порогове значення, нижньої частини шару 3, за період
травня 2024 року

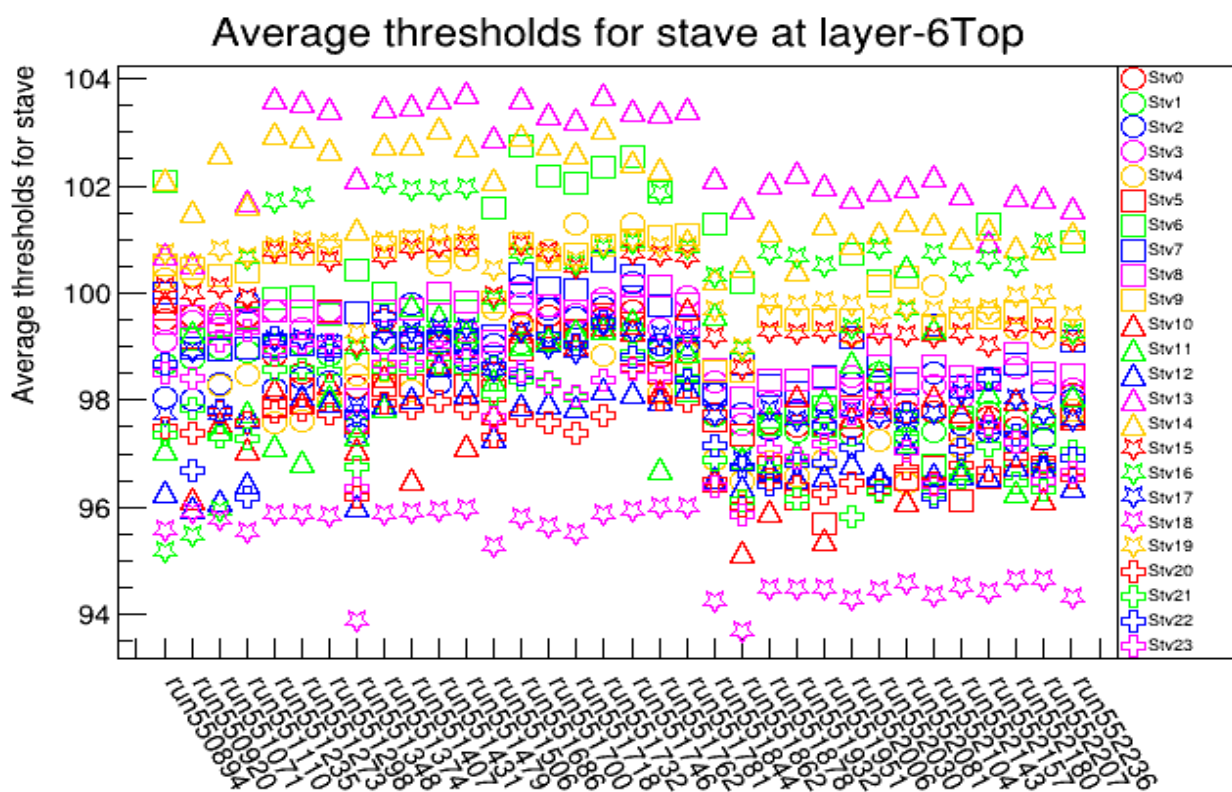


Додаток 6. Середнє порогове значення, верхньої частини шару 4, за період травня 2024 року

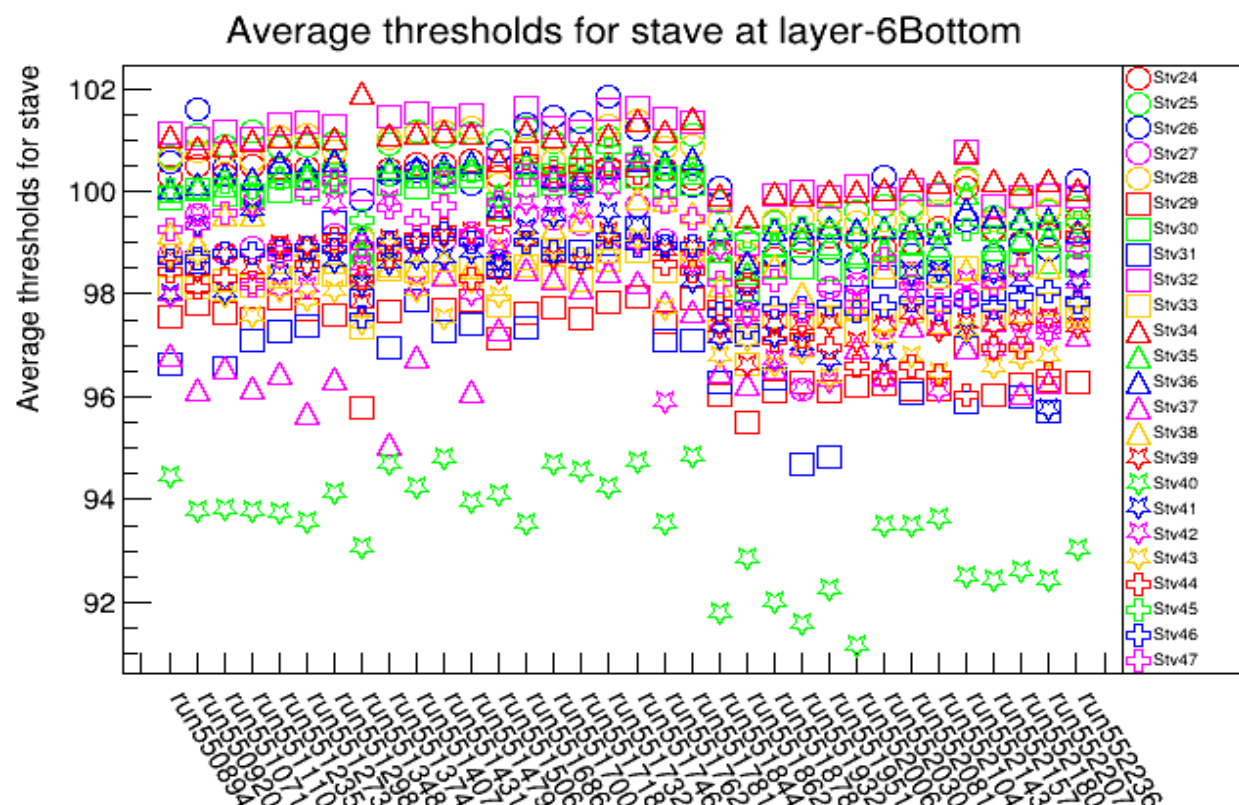
Додаток 8. Середні порогові значення, верхньої частини шару 5, за період травня 2024 року



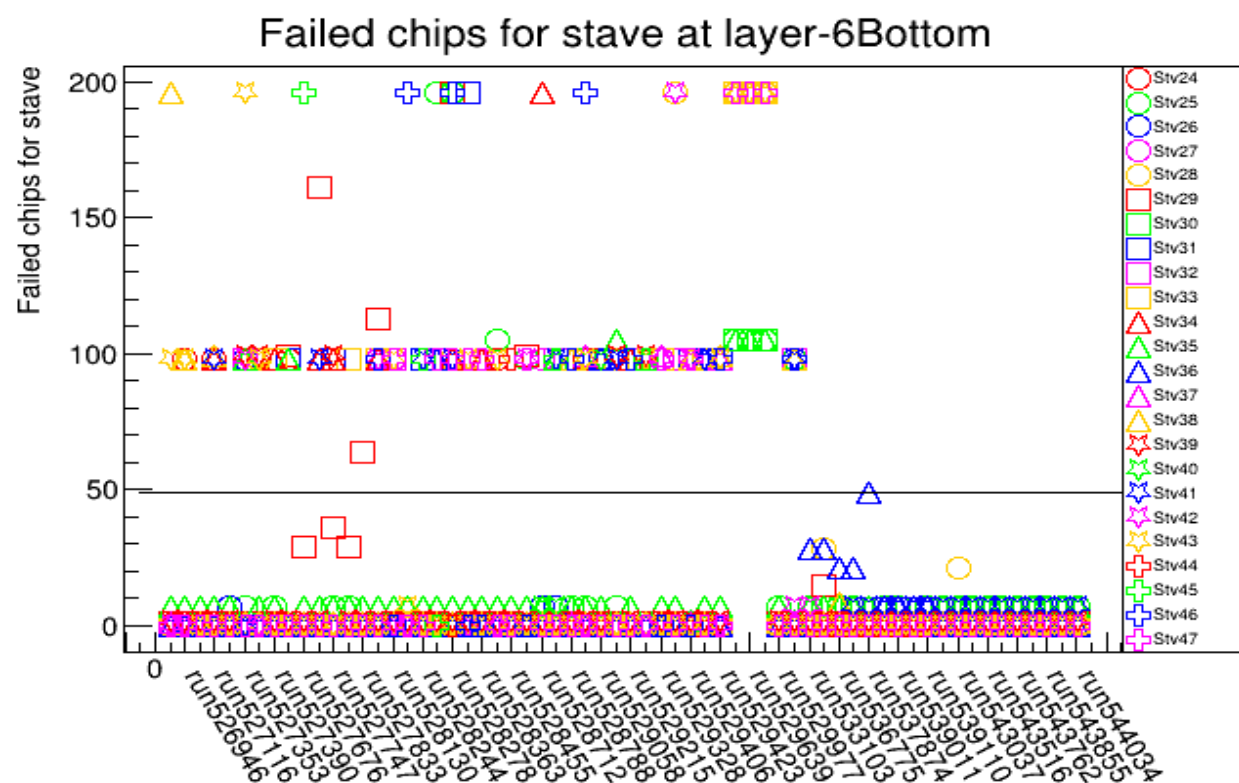
Додаток 9. Середні порогові значення, нижньої частини шару 5, за період травня 2024 року



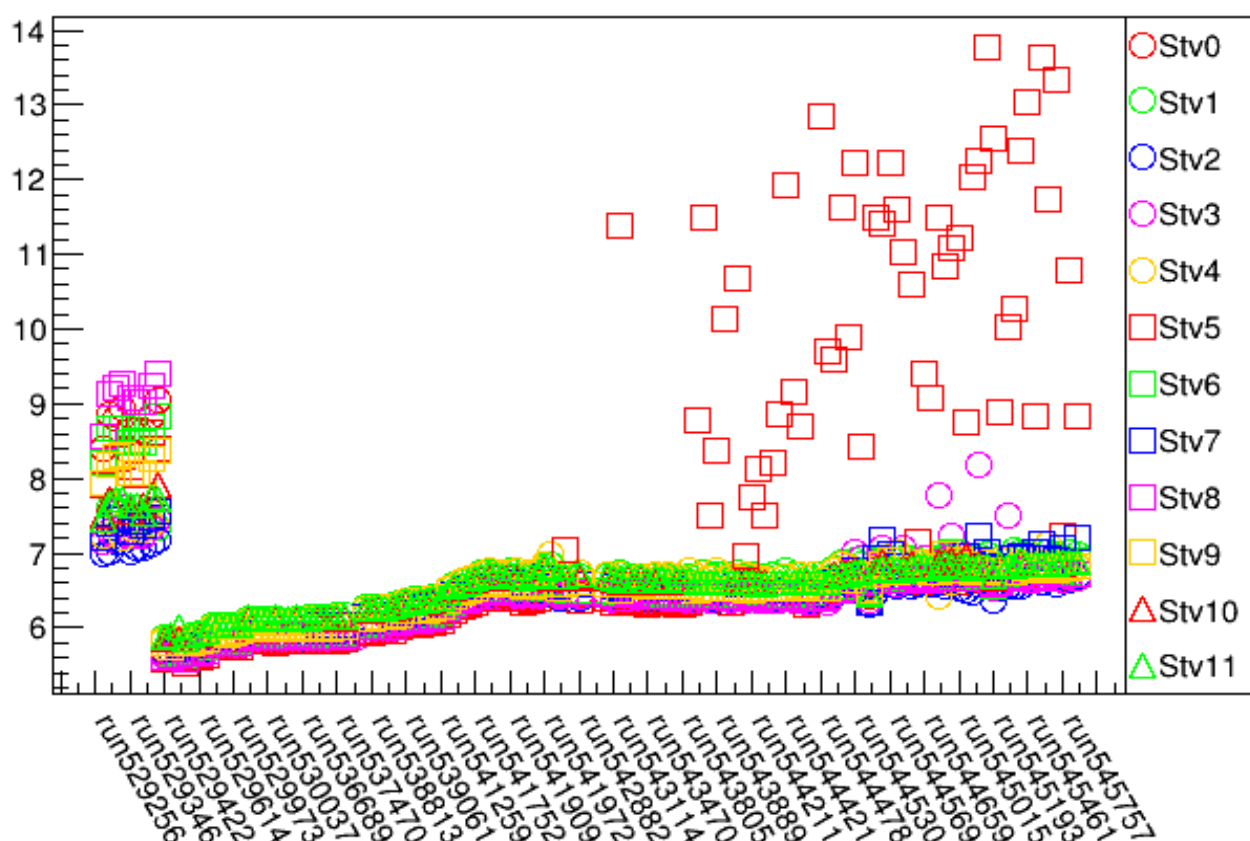
Додаток 10. Середнє порогове значення, верхньої частини шару 6, за період травня 2024 року



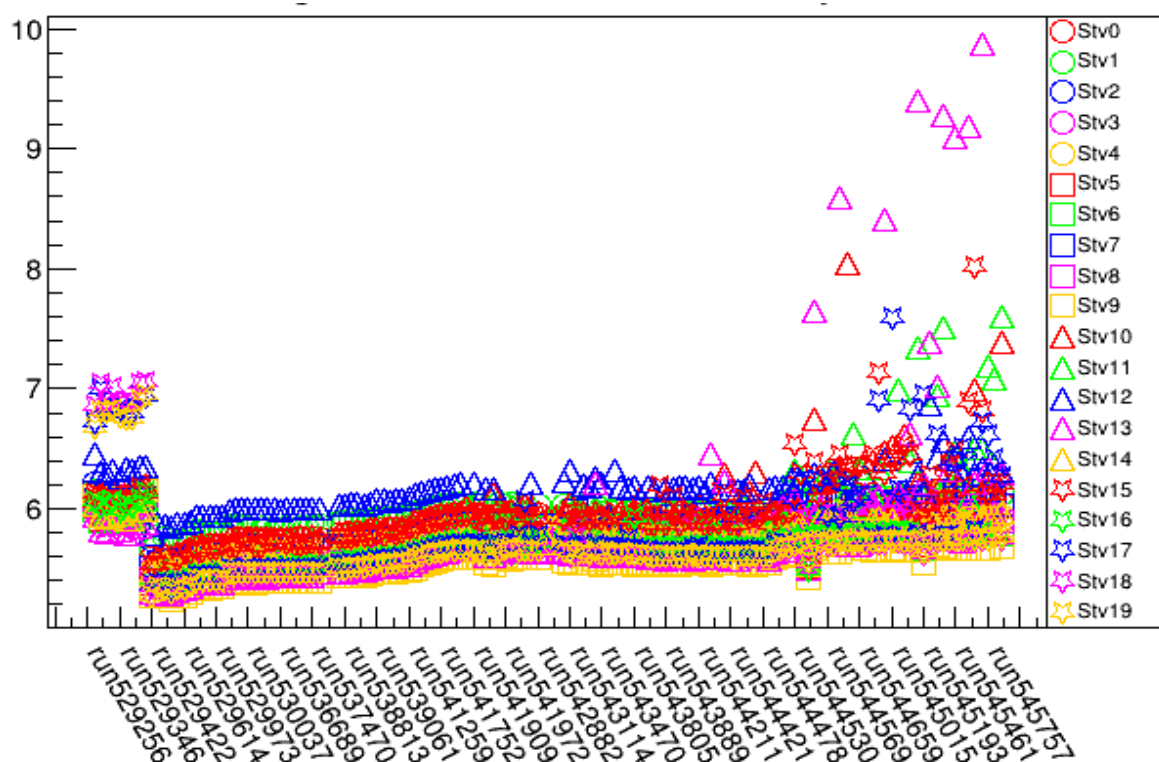
Додаток 11. Середнє порогове значення, нижньої частини шару 6, за період травня 2024 року



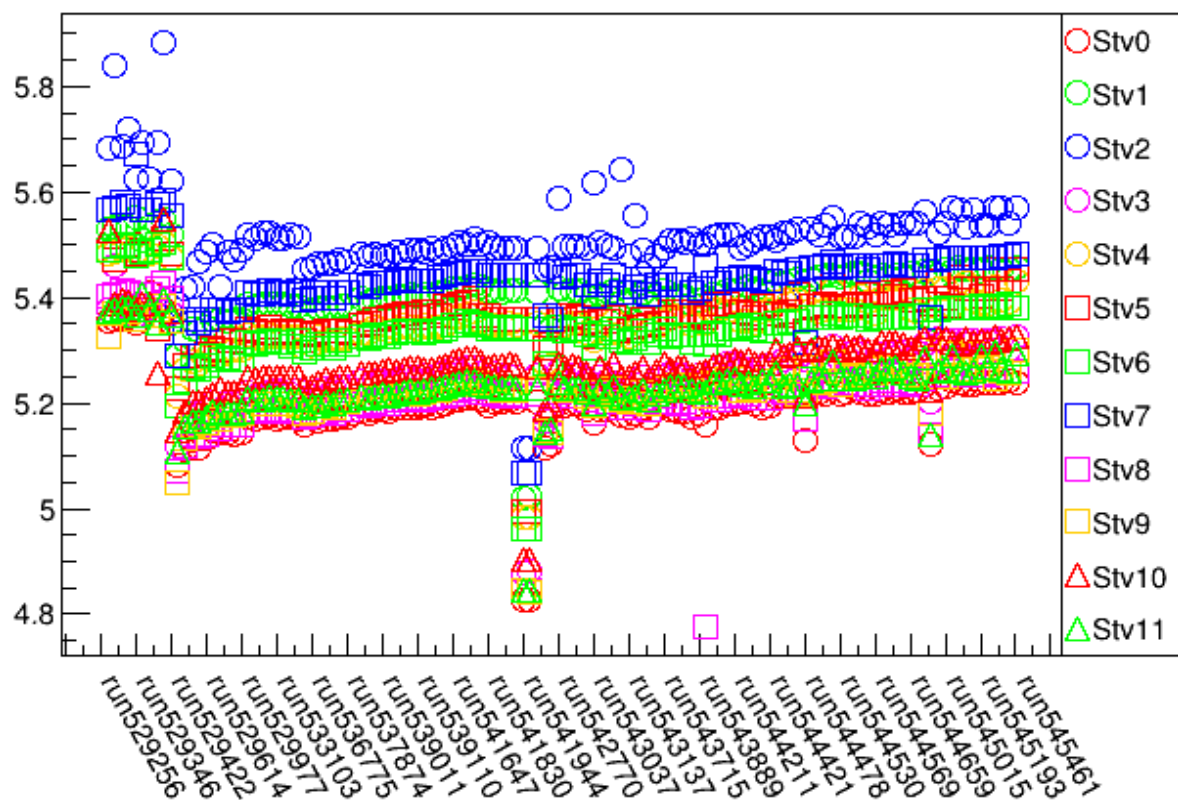
Додаток 12. Приклад графіку чипів, які не пройшли запуск для калібрування, для нижньої частини шару 6, за період травня 2024 року



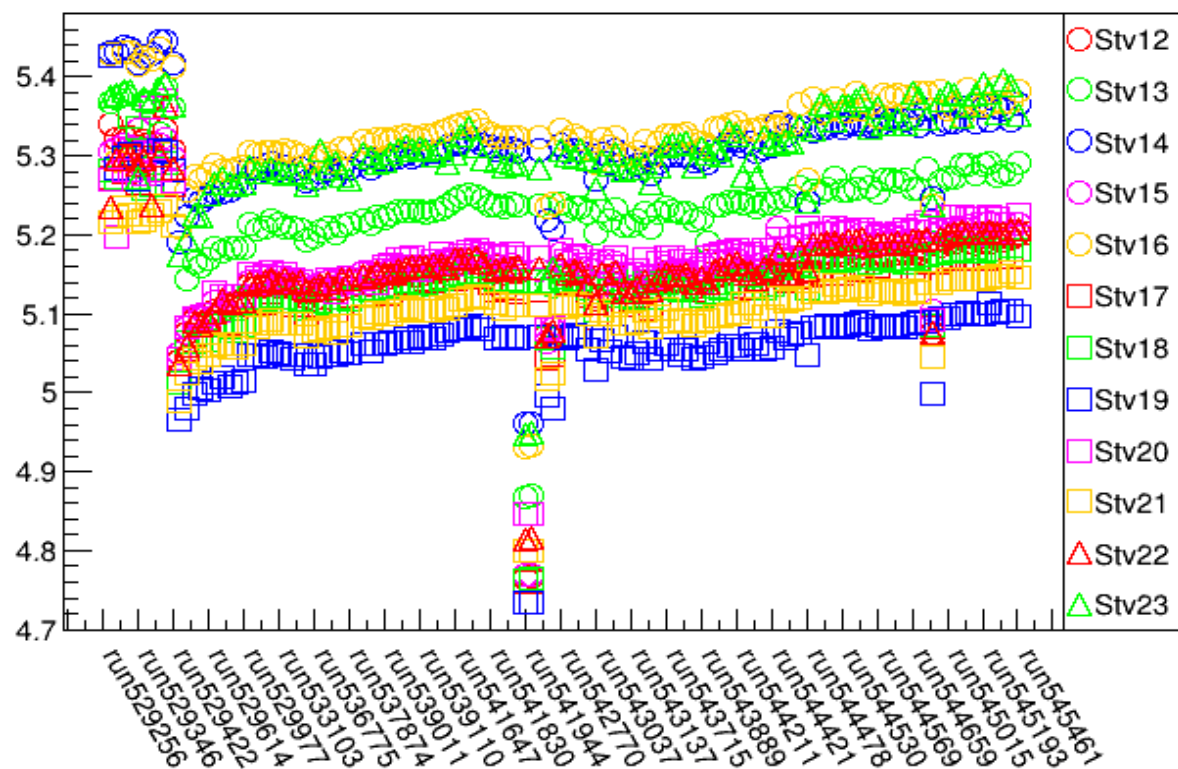
Додаток 13. Графік шуму середнього порогове значення шару 0, за період травня 2024 року



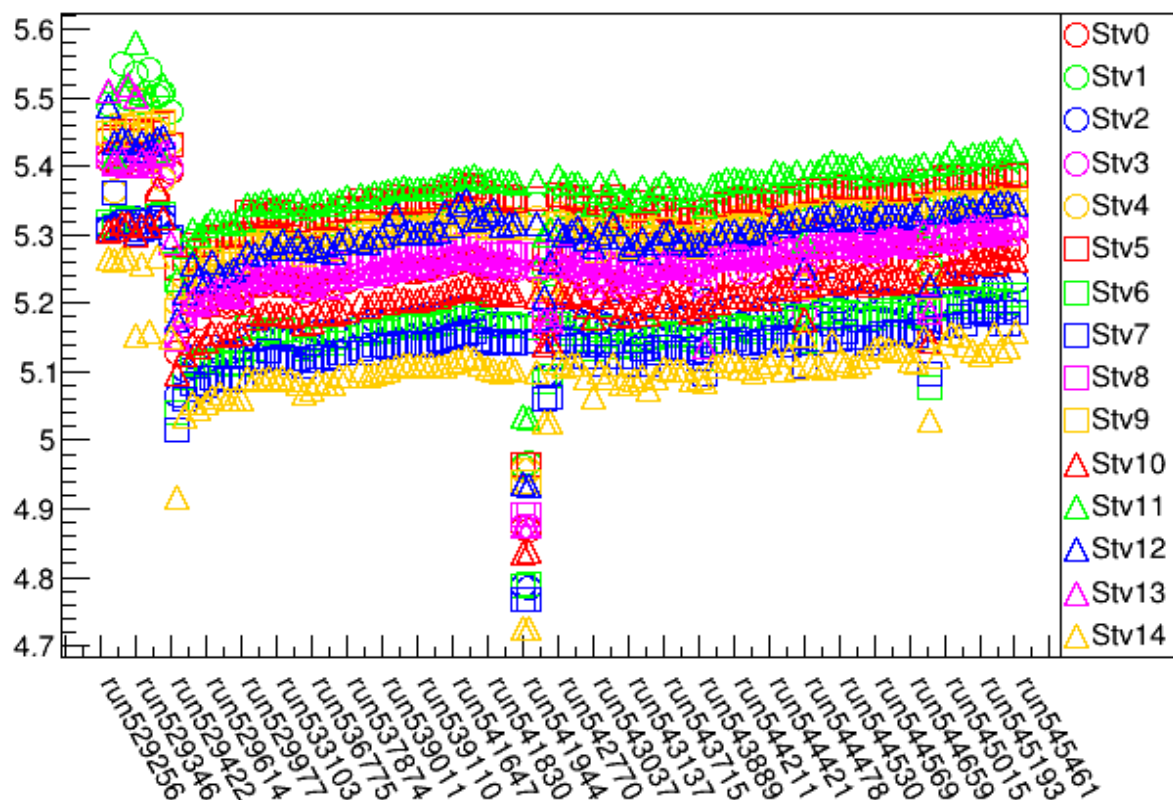
Додаток 14. Графік шуму середнього порогове значення шару 2, за період травня 2024 року



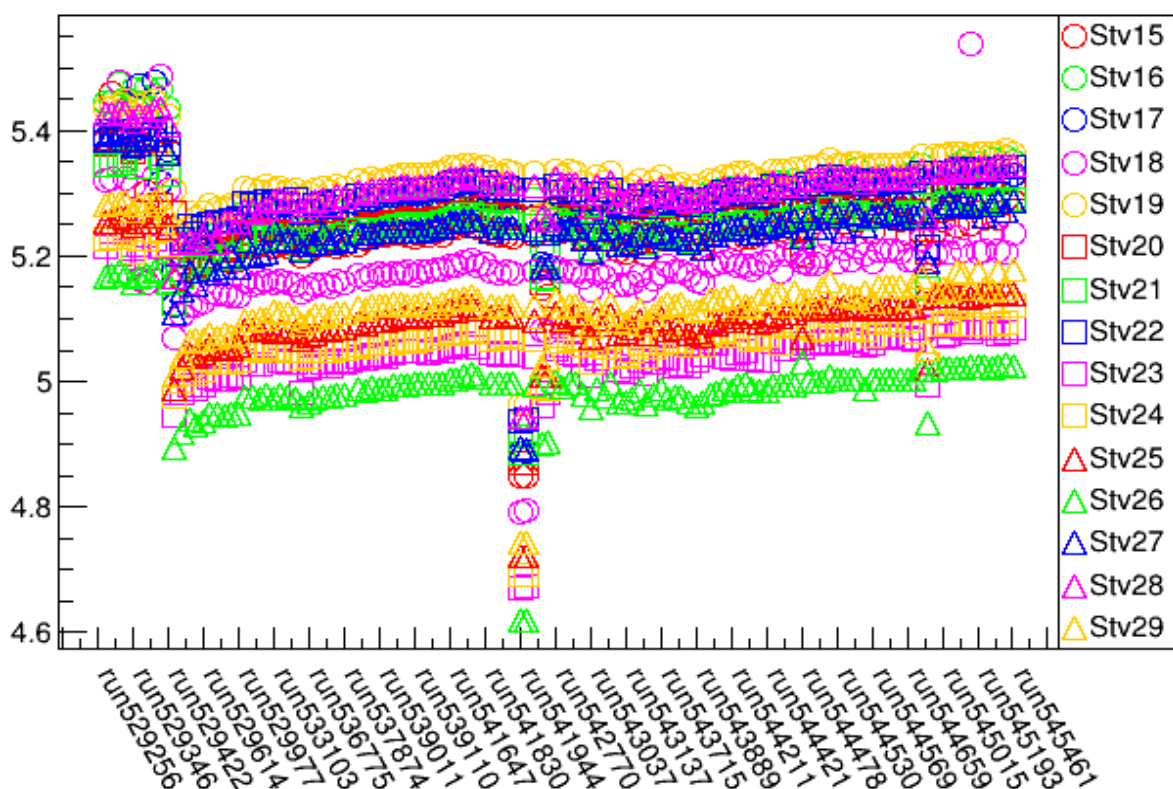
Додаток 15. Графік шуму середнього порогове значення для верхньої частини шару 3, за період травня 2024 року



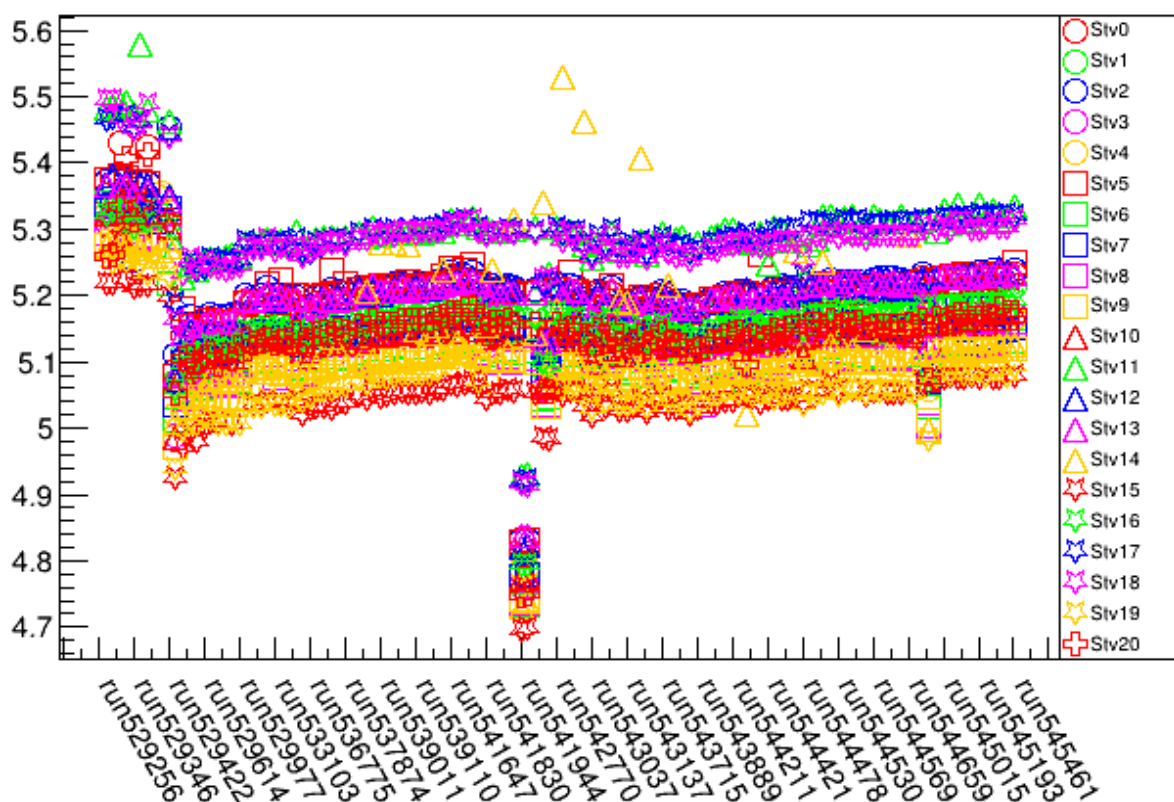
Додаток 16. Графік шуму середнього порогове значення для нижньої частини шару 3, за період травня 2024 року



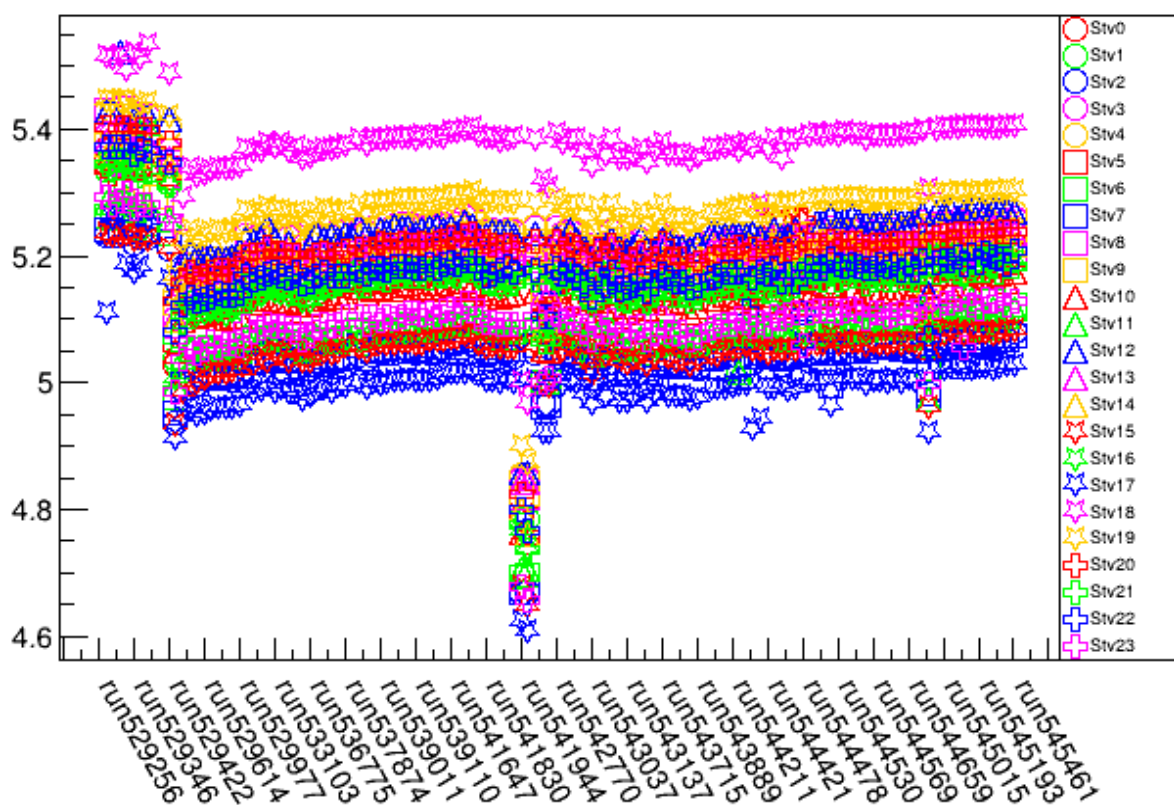
Додаток 17. Графік шуму середнього порогове значення для верхньої частини шару 4, за період травня 2024 року



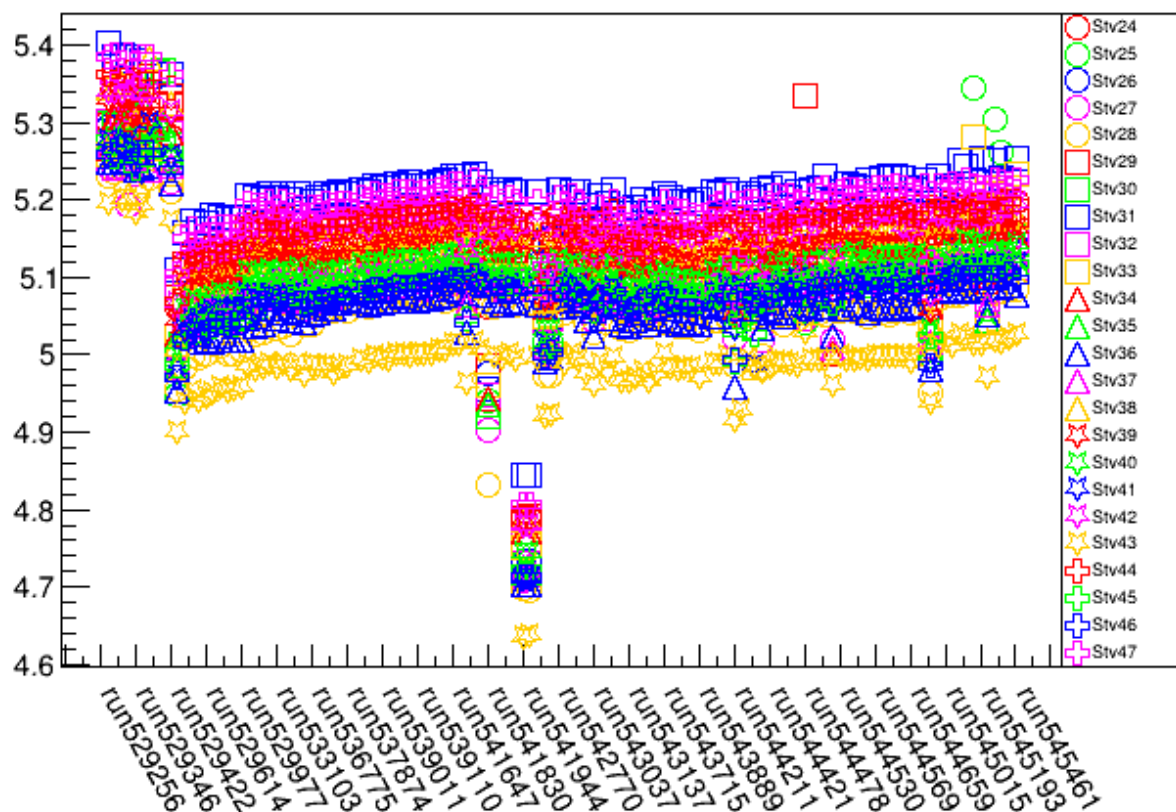
Додаток 18. Графік шуму середнього порогове значення для нижньої частини шару 4, за період травня 2024 року



Додаток 19. Графік шуму середнього порогове значення для верхньої частини шару 5, за період травня 2024 року



Додаток 20. Графік шуму середнього порогове значення для верхньої частини шару 6, за період травня 2024 року



Додаток 21. Графік шуму середнього порогове значення для нижньої частини шару 6, за період травня 2024 року