

На правах рукописи



**Эпштейн Леонид Борисович**

**Первичный триггер электромагнитного калориметра  
эксперимента СОМЕТ**

1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Новосибирск — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – кандидат физико-математических наук, доцент Григорьев Дмитрий Николаевич

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Каржавин Владимир Юрьевич – доктор технических наук, Международная межправительственная научно-исследовательская организация Объединенный институт ядерных исследований, начальник отдела, г.Дубна

Шрейбер Ирина Владимировна – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», заместитель заведующего лабораторией, г.Томск

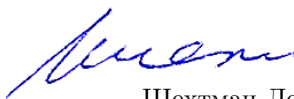
ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, г.Москва

Защита состоится «27» октября 2026 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.1.162.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <https://inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-01>.

Автореферат разослан «22» июля 2026 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.162.01,  
доктор физико-математических наук



Шехтман Лев Исаевич

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы исследования

В экспериментах на Большом Адронном Коллайдере (БАК) открыта последняя недостающая частица Стандартной Модели (СМ) — бозон Хиггса. В то же время не обнаружено ни одной частицы, выходящей за рамки Стандартной Модели, более того, почти все полученные к настоящему времени результаты хорошо согласуются с предсказаниями Стандартной Модели. Однако из астрофизических данных известно, что Стандартная Модель неполна. Например, она не описывает количество барионной материи во Вселенной или состав темной материи. Поэтому на передний план выходят высокоточные эксперименты по поиску новой физики в запрещенных в Стандартной Модели процессах.

Одним из таких процессов является нарушение закона сохранения лептонного числа в заряженном секторе. С учетом осцилляций нейтрино в рамках Стандартной Модели вероятность подобных процессов предсказывается на необнаружимо малом уровне порядка  $O(10^{-54})$ . В то же время, во многих новых теориях возникают процессы, проходящие с изменением лептонного числа с близкой по порядку величины вероятностью к планируемой экспериментальной чувствительности  $10^{-17}$ . Поэтому изучение таких процессов важно для поиска новой физики, выходящей за рамки Стандартной Модели, в том числе при энергиях на 2 порядка больше доступных для БАК.

Экспериментальное обнаружение процессов с нарушением лептонного числа в заряженном секторе безусловно означает открытие новой физики, выходящей за пределы Стандартной Модели. Отрицательный же результат приведет к серьезным ограничениям для многих современных теоретических моделей, которые предсказывают большую вероятность данного процесса. Поэтому даже отрицательные результаты экспериментов будут иметь большое значение для развития теоретической физики.

Для экспериментального обнаружения таких процессов необходимо спроектировать и разработать детектор, который бы позволил достичь требуемой точности. Одной из основных частей детектора является триггерная система, задачей которой является отбор предположительно полезных событий.

## Степень разработанности темы исследования

В настоящее время самое жесткое ограничение на возможность нарушения лептонного числа в заряженном секторе поставлено в эксперименте MEG-II. В последней опубликованной участниками эксперимента MEG-II работе приведено ограничение на вероятность безнейтринного распада

положительного мюона на позитрон и гамма-квант меньше  $2.2 \times 10^{-13}$  90% доверительной вероятностью. Эксперименты по распаду положительного мюона на позитрон и гамма-квант максимально чувствительны к петлевым диаграммам с участием частиц вне Стандартной модели, однако вклад древесных диаграмм в него равен нулю в силу симметрии. Целью эксперимента СОМЕТ является поиск когерентной конверсии мюона в электрон в поле ядра без излучения нейтрино. Данный процесс имеет меньшую чувствительность к проявлениям новой физики в петлевых диаграммах, но в то же время вклад древесных диаграмм в нем не равен нулю. В эксперименте Mu3e планируется изучать процесс распада положительного мюона на 2 позитрона и электрон, что также является примером нарушения закона сохранения лептонного числа. Этот процесс чувствителен и к петлевым диаграммам, и к древесным диаграммам, но с другими весами по отношению к процессу конверсии. Таким образом, эксперименты MEG, Mu3e и СОМЕТ дополняют друг друга и совместный анализ полученных данных позволит не только увеличить чувствительность к проявлениям новой физики, но и позволит получить информацию о ее свойствах.

Лучшее текущее экспериментальное ограничение на вероятность когерентной конверсии мюона в электрон в поле атомного ядра  $7 \times 10^{-13}$ , поставленное экспериментом SINDRUM II, недостаточно для изучения новой физики. Целью эксперимента СОМЕТ является увеличение чувствительности на 2 порядка до  $3 \times 10^{-15}$  на первом этапе и еще на 2 порядка до  $3 \times 10^{-17}$  в ходе реализации всего проекта. Также в настоящее время в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (Фермилаб), США, ведется подготовка другого эксперимента по поиску безнейтринной конверсии мюона в электрон в поле ядра, Mu2e, с такой же проектной чувствительностью  $3 \times 10^{-17}$ . Это свидетельствует о высокой заинтересованности физического сообщества в результатах этих экспериментов. Другим направлением поиска нарушения закона сохранения лептонного числа в заряженном секторе является поиск безнейтринных распадов тау-лептона. Однако в настоящее время их чувствительность сильно уступает экспериментам с мюонами.

Для эксперимента СОМЕТ необходим мощный импульсный протонный пучок с разделением сгустков частиц по времени порядка времени жизни мюона (2 мкс). Поэтому было решено, что эксперимент будет проводиться на ускорителе протонов с рекордной интенсивностью в J-PARC в Японии.

Схема эксперимента следующая: интенсивный пучок протонов взаимодействует с мишенью, после чего пионы и рожденные в их распаде мюоны направляются в специальный канал с соленоидальным магнитным полем, в котором происходит отбор мюонов. На выходе из канала медленные мюоны попадают на вторичную мишень, сделанную из алюминия,

в которой они останавливаются и захватываются на орбиту, где “происходит” их конверсионный переход с испусканием электрона. Искомый процесс  $\mu^- N \rightarrow e^- N$  является фактически двухчастичным. Сигнальными событиями являются моноэнергетические электроны с энергией равной массе мюона минус энергия отдачи ядра и энергия связи мюона в атоме ( $E_{\mu e} = m_\mu - B_\mu - E_{recoil}$ , где  $m_\mu$  — масса мюона 105.66 МэВ,  $B_\mu$  — энергия связи мюонного атома в 1S-состоянии 0.475 МэВ и  $E_{recoil}$  — энергия отдачи ядра 0.22 МэВ для алюминиевой мишени, и  $E_{\mu e} = 104.97$  МэВ).

В связи со сложностью проведения принято решение разделить эксперимент на 2 этапа. На первом этапе будет использоваться только один соленоид с поворотом на  $90^\circ$  градусов. Физическая задача этого этапа — достичь чувствительности  $3 \times 10^{-15}$  с детектором на основе цилиндрической дрейфовой камеры (CyDec), и измерить фоны с частью детектора на основе дрейфовых трубок и сцинтилляционных кристаллов (Straw-tracker and Electromagnetic CALorimeter — StrECAL), необходимых для разработки второго этапа, так как эти данные отсутствуют. На втором этапе будет использоваться полномасштабная транспортная линия из соленоидов с поворотом на  $360^\circ$  и детектором на основе дрейфовых трубок и сцинтилляционных кристаллов.

В данном эксперименте нет физических совпадений и необходимое сигнальное событие от фона будет отбираться по измеренному в координатной системе импульсу. Основной задачей калориметра является выработка сигнала запуска детектора, главным аргументом для которого будет энергия электронов, а также разделение частиц по энергии и импульсу ( $E/p$ ), и предоставление начальной временной отметки ( $T_0$ ) и начальной точки для поиска треков в координатной системе. Группа ученых из ИЯФ СО РАН (г.Новосибирск) принимает активное участие в разработке калориметра совместно с группами из ОИЯИ (г.Дубна), учебных учреждений и научных организаций Японии.

Предварительная электроника электромагнитного калориметра должна одновременно обеспечивать как энергетическое, так и временное разрешения. Поэтому к ней предъявляются противоречивые требования на быстродействие и низкий уровень шумов.

Согласно проведенным расчетам, для обеспечения допустимой частоты запуска детектора энергетическое разрешение в режиме реального времени должно быть не хуже 5%. Ввиду огромной фоновой загрузки необходимо оптимизировать условия на выдачу сигнала запуска триггера электромагнитного калориметра детектора, являющегося основной запускающей системой, как компромисс между эффективностью и загрузкой системы сбора данных (ССД). Оптимизация включает как аппаратную функцию, так и программную обработку данных. Для этого был разработан способ выработки сигнала о нахождении предполагаемого события, с целью запуска процедуры чтения информации с подсистем детектора.

Данный способ основан на использовании специального модуля, анализирующего непрерывно поступающую информацию в режиме реального времени (онлайн) без мертвого времени за короткий промежуток времени (1 мкс). При этом из-за большой фоновой загрузки, вызванной нейтронами и гамма-квантами (с энергосвыделением 1-10 МэВ), возникает две проблемы: наложение сигналов в каналах калориметра и повышенный радиационный фон в зоне расположения детектора. Кроме того, энергия попадающей в калориметр частицы распределяется между несколькими кристаллами. Поэтому для решения первой проблемы для регистрации электронов с энергией 104.97 МэВ, производящих сигналы в нескольких кристаллах, необходимо определить оптимальный размер кластера, оперируя группой кристаллов. Для решения второй проблемы при проектировании системы необходимо учитывать вероятность повышенного радиоактивного фона.

Основную часть данной работы составляют результаты работы по разработке и созданию первичного триггера электромагнитного калориметра детектора эксперимента СОМЕТ.

## **Цель и задачи диссертационной работы**

**Целью** диссертационной работы является создание системы запуска (первичного триггера) электромагнитного калориметра для эксперимента СОМЕТ. Для достижения поставленной цели в рамках диссертационной работы необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Спроектировать систему запуска регистрации событий для эксперимента СОМЕТ, позволяющую обеспечить энергетическое разрешение в режиме реального времени не хуже 5% для обеспечения допустимой частоты запуска детектора.
2. Разработать алгоритм анализа данных конвейерного типа (без “мертвого” времени), который должен учитывать как статистические флуктуации развития электромагнитного ливня, так и большую загрузку от фоновых событий.
3. Провести экспериментальные исследования энергетического разрешения и эффективности системы первичного триггера электромагнитного калориметра, а также расчетные и экспериментальные исследования времени принятия решения и задержки выработки триггерного сигнала.
4. Исследовать стабильность работы различных типов микросхем: операционных усилителей (ОУ), аналого-цифровых преобразователей (АЦП), флэш-памяти, программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и всего модуля в условиях высокого радиационного облучения до 2 кГр и потока  $10^{12}$  нейтронов/см<sup>2</sup>,

чтобы выбрать наиболее подходящие типы для обработки аналоговых и цифровых сигналов.

### Научная новизна

1. Создана уникальная система первичного триггера, анализирующая форму входных импульсов с 128 каналов в режиме реального времени, работающих на частоте дискретизации 80 МГц в амплитудном динамическом диапазоне 8 бит. Особенностями системы является возможность программного управления параметрами измерительных трактов (амплитудный диапазон, частота дискретизации) и режимами работы алгоритма кластеризации (величины порогов, размеры кластеров и т.д.). Использование ПЛИС больших размеров и ёмкости для построения системы первичного триггера позволило использовать ее в детектирующих системах с большим числом каналов, характерных для современных крупномасштабных экспериментов по физике элементарных частиц. Так же в системе первичного триггера реализована возможность программной модификации алгоритма обработки данных при помощи загружаемого в ПЛИС цифрового узла конфигурационного файла. Это позволит использовать его не только в качестве системы запуска регистрации событий для электромагнитного калориметра эксперимента СОМЕТ, но и в других экспериментах физики элементарных частиц.
2. Создан и реализован на базе элементов ПЛИС уникальный алгоритм анализа сигналов с групп кристаллов в реальном времени, который учитывает как статистические флуктуации развития электромагнитного ливня, так и большую фоновую загрузку. Благодаря калибровочным процедурам удалось обеспечить следующие характеристики трактов системы запуска регистрации событий: амплитудный динамический диапазон 10 бит (достигается цифровым образом внутри ПЛИС) при частоте дискретизации 80 МГц и энергетическое разрешение в режиме реального времени 4.5%, сравнимое с полученным после “офлайн” обработки записанных данных.
3. Создана система запуска регистрации событий с возможностью работы в условиях повышенного радиационного уровня до 2 кГр и  $10^{12}$  потока нейтронов/см<sup>2</sup>.

## Научая и практическая значимость

**Теоретической значимостью работы** является возможное обнаружение физики за рамками Стандартной модели или установление более жесткого ограничения на процесс когерентной конверсии мюона в электрон в поле ядра без излучения нейтрино. Созданная система запуска регистрации событий в рамках эксперимента СОМЕТ позволит получить уникальные результаты по поиску нарушения закона сохранения лептонного числа в заряженном секторе с недоступной на данный момент точностью. Стандартная Модель предсказывает исчезающе малую вероятность исследуемого процесса, меньше  $10^{-54}$ . Данные эксперимента, полученные с помощью разработанной системы первичного триггера, должны позволить поставить предел в  $3 \times 10^{-17}$  в предполагаемом безнейтринном процессе конверсии электрона в мюон.

**Практической значимостью работы** является успешный опыт создания и проверки электронной системы на стенде с использованием сигнала с генератора и сигналов от частиц космического излучения, а также на выведенном пучке электронов в течение нескольких сезонов. Полученные в рамках диссертационной работы результаты исследования имеют большое значение для создания аналогичных систем запуска регистрации и “онлайн” обработки сигналов на современных экспериментах по физике элементарных частиц.

## Методология и методы исследования

Главный методический подход, реализованный в работе, заключается в последовательном сочетании этапов разработки, изготовления и испытания основных модулей системы первичного триггера. Для проектирования схем и трассировки печатных плат использовалась система автоматизированного проектирования Altium Designer, которая позволяет проводить моделирование работы небольших схем. Для разработки и написания кода алгоритма первичного триггера использовалось ПО фирмы AMD (Xilinx) ISE 13.7. Для предварительной проверки работы кода использовалась ПО Modelsim. Изготовленные компоненты прошли все необходимые виды испытаний. Разработанная триггерная система на основе радиационно апробированных элементов (до 2 кГр и  $10^{12}$  потока нейтронов/см<sup>2</sup>) принята к эксплуатации в эксперименте СОМЕТ. Работоспособность и стабильность заявленных параметров системы первичного триггера проверены на стенде и выведенном пучке электронов.

## Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанная концепция системы первичного триггера электромагнитного калориметра позволит запускать регистрацию событий эксперимента СОМЕТ по поиску нарушения законов сохранения лептонного числа.
2. Разработанный и реализованный на базе элементов ПЛИС алгоритм анализа данных системы первичного триггера электромагнитного калориметра использует сигналы с компактных групп кристаллов и работает в режиме реального времени.
3. Созданная и успешно испытанная система первичного триггера электромагнитного калориметра для эксперимента по нарушению закона сохранения лептонного числа СОМЕТ обеспечивает энергетическое разрешение в режиме реального времени лучше 5% при работе с необходимой частотой запусков детектора.
4. Результаты проведенных экспериментальных исследований энергетического разрешения и эффективности системы первичного триггера электромагнитного калориметра, а также расчетных и экспериментальных исследований времени принятия решения и задержки выработки триггерного сигнала, удовлетворяют всем техническим и физическим требованиям.
5. Исследованная стабильность работы различных типов микросхем: стабилизаторов напряжения, ОУ, АЦП, флэш-памяти и ПЛИС, и всего модуля в условиях высокого радиационного облучения до 2 кГр и потока  $10^{12}$  нейтронов/см<sup>2</sup>, позволяет отобрать и использовать наиболее подходящие типы микросхем для обработки аналоговых и цифровых сигналов в системе первичного триггера электромагнитного калориметра.

## Степень достоверности и апробация результатов

Работы, составляющие материал диссертации, многократно докладывались и обсуждались на совещаниях коллаборации эксперимента СОМЕТ (СОМЕТ Collaboration meeting). Результаты работы были представлены в виде докладов на 3 международных конференциях и опубликованы в их трудах: Topical Workshop on Electronics for Particle Physics (TWEPP-2016) (Карлсруэ, Германия, 2016г.); 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Proceedings (IEEE NSS/MIC) (Сидней, Австралия, 2018г.); Topical Workshop on Electronics for Particle Physics (TWEPP-2019) (Сантьяго де Компостела, Испания, 2019г.).

Исследования были поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (Соглашения № 13-02-92109 ЯФ\_а, 2013–2014; №14-22-03071 офи\_м, 2014–2016; 17-02-01073 А, 2017–2019; 18-52-00004 Бел\_а, 2018–2019).

## Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в семи печатных и электронных изданиях, пять из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК (включая периодические научные издания, индексируемые Web of Science и Scopus) [1–5] и две в сборниках тезисов докладов научных конференций, опубликованных в электронных изданиях индексируемых Web of Science и Scopus [6; 7]. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [8].

## Личный вклад

Автор принимал определяющее участие в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации,

для проверки которых были созданы стенд и тестовые программы. Результаты разработки и испытаний на стенде и выведенном пучке были опубликованы в статье [1], написанной автором лично, при совместном обсуждении с соавторами.

Для проверки концепции и подбора параметров триггерного алгоритма было проведено моделирование системы первичного триггера. Автор принимал активное участие в моделировании и анализе данных после испытаний системы, описанных в статье [2].

В основном модуле первичного триггера автором были лично реализованы алгоритмы цифровой обработки сигналов (ЦОС), выполняемые на базовых логических элементах ПЛИС, о чем было получено свидетельство [8]. Авторский вклад соискателя в статье [3] заключается в полном описании структуры системы первичного триггера электромагнитного калориметра.

Непосредственно автором была проведена оптимизация конструкции и алгоритма системы первичного триггера электромагнитного калориметра. Автор лично занимался отладкой и калибровкой модулей, тестированием на выведенном пучке частиц и финальными испытаниями первичного триггера в составе всей системы. Результаты испытаний окончательной конструкции и алгоритма были описаны автором лично и приведены в публикациях [4; 5].

## Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и 4 приложений. Полный объем диссертации составляет 99 страниц, включая 65 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 47 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** описана актуальность темы, определены цель и задачи исследования, приведены новизна и значимость работы, а также перечислены положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена общему описанию эксперимента СОМЕТ.

Главная задача эксперимента — поиск когерентной конверсии мюона в электрон в области ядра без излучения нейтрино:  $\mu^- + N(A, Z) \rightarrow e^- + N(A, Z)$  ( $\mu - e$  конверсия), что является нарушением закона сохранения лептонного числа (Charged Lepton Flavour Violation — CLFV), с чувствительностью к единичному событию (ЧЕС)  $\sim 3 \times 10^{-17}$ , которая превосходит результаты лучшего предыдущего эксперимента — SINDRUM II на 4 порядка.

Из-за сложности разрабатываемых транспортных поворотных магнитов было принято решение разделить эксперимент на 2 этапа (рисунок 1). На первом этапе будет использоваться только половина одной С-образной транспортной системы, соответствующая повороту транспортируемых частиц на  $90^\circ$ . На втором этапе будет использоваться полномасштабная транспортная линия соленоидов с поворотом на  $360^\circ$  с детекторной секцией. Физическая задача Этапа-I — достичь чувствительности  $3 \times 10^{-15}$ . Так как поворот только на  $90^\circ$ , то будет очень много фона и дрейфовые трубки не смогут адекватно работать из-за слишком большой загрузки. При таких условиях можно использовать детектор на основе цилиндрической дрейфовой камеры, так как большая часть фона не долетает до внутренней стенки камеры. Но при этом после завершения физического набора данных в конце работы Этапа-I цилиндрическая дрейфовая камера будет заменена на систему StrECAL.

**Вторая глава** посвящена описанию основных элементов электромагнитного калориметра, общему описанию триггерной системы детектора и системы сбора данных.

*В первом параграфе* описывается структура калориметра: типы используемых кристаллов и фотоэлементов, конструкция элементов калориметра, электроника измерительного тракта калориметра.

*Во втором параграфе* кратко описываются структуры триггерной системы калориметра и системы сбора данных. Триггерная система и система сбора данных эксперимента СОМЕТ были сконструированы так, чтобы в наибольшей степени использовать коммерчески доступные комплектующие, а также готовые блоки, разработанные для других экспериментов.

Блок-схема триггерной системы эксперимента СОМЕТ с детектором на основе дрейфовых трубок и электромагнитного калориметра показана на рисунке 2. Триггерная система детектора состоит из модуля центрального триггера (FC7), плат управления и синхронизации триггера (FCT),

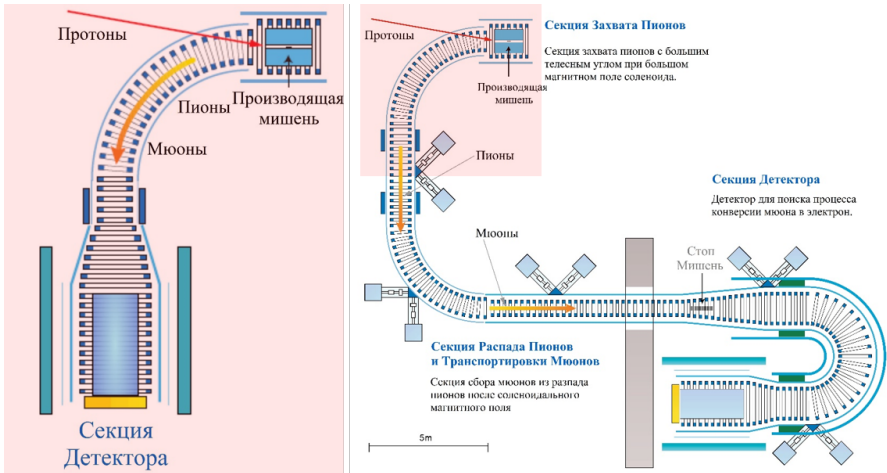


Рисунок 1 — Два этапа эксперимента COMET. Слева изображена структура Этапа-I, справа структура Этапа-II

системы первичного триггера электромагнитного калориметра, модуля передачи “быстрого” сигнала триггера (FDB), первичного триггера системы активной защиты от космического излучения, триггерных интерфейсных плат (Trigger IF) измерительной электроники калориметра (EROS) и дрейфовых трубок (ROESTI).

Сигнал триггера формируется на основе данных калориметра. Система защиты от частиц космического излучения должна обеспечивает сигнал “метку” события, вызванного космическими частицами, а также сигнал запуска для отладки детектора. Каждая плата, связанная с триггером, управляется ПЛИС для получения данных от детектора, выполнения цифровой обработки данных и передачи сформированного пакета и решения в модуль центрального триггера по гигабитным оптическим линиям.

Система Сбора Данных (ССД) основана на стандартной сети Ethernet и реализована с использованием коммерчески доступных готовых сетевых компонентов.

**В третьей главе** дано детальное описание системы первичного триггера электромагнитного калориметра, приведены результаты испытаний разработанной электроники и алгоритма обработки входных сигналов на стенде и на выведенном пучке электронов.

*В первом параграфе* формулируются технические требования, предъявляемые к электронике первичного триггера электромагнитного калориметра:

1. Энергетическое разрешение лучше 5% при энергии электронов около 105 МэВ.
2. Эффективность к полезным событиям не ниже 90%.

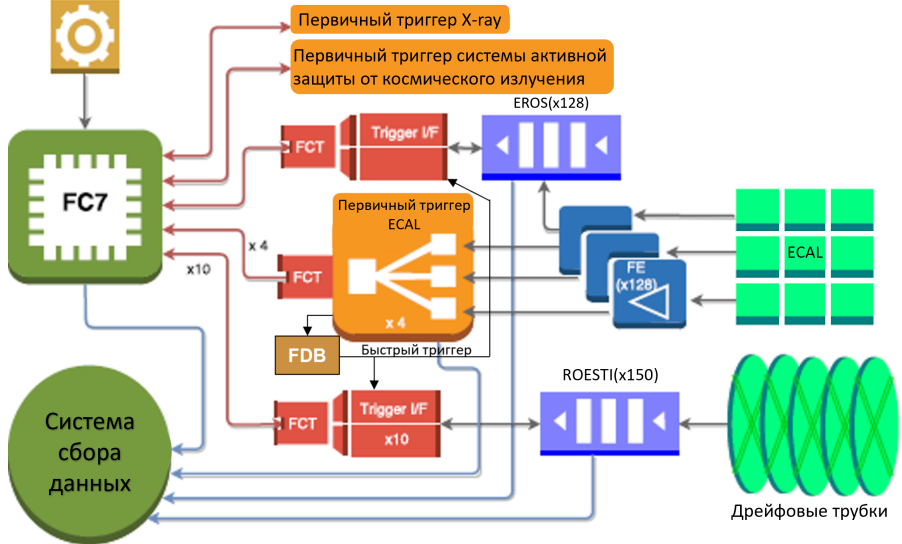


Рисунок 2 — Блок-схема триггерной системы эксперимента COMET со StrECAL

3. Время прихода триггерного сигнала в оцифровывающую электронику от момента события не более 900 нс.
4. Необходима устойчивая работа в зоне повышенного радиационного излучения на уровне до  $10^{12}$  нейтронов/см<sup>2</sup> и поглощенной дозы гамма-квантов до 2 кГр с учетом фактора безопасности 10.
5. Использование Ethernet (Raw/UDP/TCP-IP) для чтения данных и удаленного управления электроникой.

Во втором параграфе описывается общая структура реализации системы первичного триггера электромагнитного калориметра.

С целью уменьшения объема информации, обрабатываемого в системе первичного триггера, в предварительной электронике производится аналоговое суммирование сигналов с каждого модуля  $2 \times 2$  кристаллов, и суммарный сигнал является базовой единицей — триггерной ячейкой.

Так как энергия попадающей в калориметр частицы распределяется между несколькими кристаллами, то для формирования кластера необходимо произвести суммирование энерговыделения в этих кристаллах.

В электромагнитном калориметре эксперимента COMET используется 1920 кристаллов, что соответствует 480 триггерным ячейкам. Разместить обработку всех каналов на одной или, даже, двух печатных платах технически сложно. С другой стороны, калориметр имеет 4-х кратную симметрию и разместить обработку порядка 120 каналов на одной

плате вполне возможно. Поэтому было принято решение разделить калориметр на 4 сектора, каждому из которых будет соответствовать 1 большая плата.

Для облегчения обслуживания триггерной электроники было принято решение аналоговую часть и оцифровывающие элементы триггерных сигналов калориметра вынести в отдельные маленькие платы, а обработку оцифрованных данных сделать на материнской плате.

В *третьем параграфе* приводится техническая реализация первичного триггера электромагнитного калориметра: аналоговая и цифровая части электронного тракта первичного триггера.

Одним из ключевых элементов плат оцифровщиков является АЦП. По совокупности параметров для оцифровывающих плат были выбраны 4-х каналные АЦП AD9287 фирмы Analog Device с частотой дискретизации 80 МГц и временем преобразования 8 тактов (100 нс).

На рисунке 3 показаны результаты испытаний выбранной схемы построения оцифровывающих плат. На левом графике показана измеренная зависимость значения на выходе АЦП от входной амплитуды, усредненная по всем каналам, в диапазоне эквивалентном энерговыделению от 0 до 105 МэВ. На основе измеренных величин были рассчитаны интегральная и дифференциальная нелинейности триггерного канала, составляющие  $\pm 1.9$  наименьшего значащего бита (LSB) и  $\pm 0.17$  LSB, соответственно. На правой гистограмме представлено амплитудное распределение, соответствующее энерговыделению 105 МэВ, построенное по 14100 событиям. Из гистограммы видно, что  $\sigma_{\text{шума}}$  в самих триггерных каналах получается равной 2.5 ед.АЦП или 1.92 МэВ, при полученном из измерений коэффициенте пересчета равного 0.77. Суммарный вклад в энергетическое разрешение составляет 2%, что в 2.5 раза лучше требуемого уровня и пренебрежимо мало.

Каждая оцифровывающая плата содержит два 4-х каналных 8-ми битных АЦП. На рисунке 4 приведены фотографии оцифровывающей и материнской плат. В одну материнскую плату можно установить до 16 оцифровывающих плат.

Цифровая часть первичного триггера решает следующие задачи:

- Принимает данные от АЦП с заданной тактовой частотой;
- Загружает опорные константы в регистры управления АЦП и внутренние регистры ПЛИС при включении питания;
- Выполняет процедуры обработки данных, поступивших со всех 128 каналов, в реальном времени;
- Вырабатывает сигнал триггера для оцифровывающих плат калориметра (EROS) и системы дрейфовых трубок (ROESTI).
- Передает триггерную информацию через FCT в центральный триггер для принятия окончательного решения.

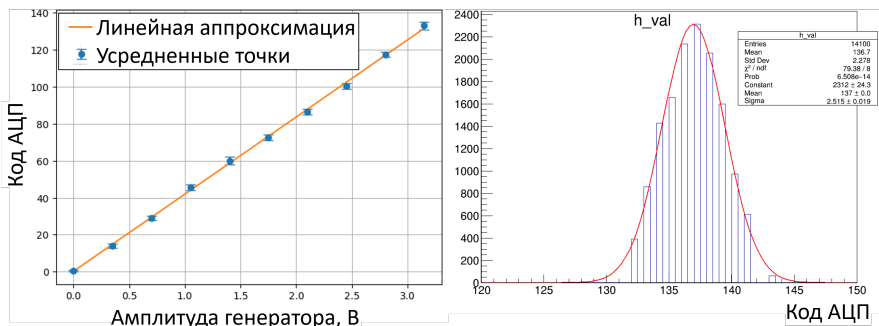


Рисунок 3 — Результаты испытаний выбранной схемы построения оцифровывающих плат. Слева: зависимость значения на выходе АЦП от входной амплитуды триггерного канала. Справа: амплитудное распределение эквивалентное энерговыделению в 105 МэВ

Цифровой узел первичного триггера построен на основе ПЛИС фирмы AMD (Xilinx) серии Virtex-4 (Рисунок 5). Весь код для ПЛИС был написан на языке программирования VHDL.

Для решения перечисленных задач в состав проекта для ПЛИС первичного триггера включены:

- Модуль приема данных, обеспечивающий фиксацию поступающих от АЦП значений с помощью входных приемников ISERDES (Input Serializer Deserializer — входная сериализация-десериализация);
- Модуль загрузки начальных установок, который при включении питания производит запись опорных констант в регистры ПЛИС и в регистры управления АЦП (по последовательной шине SPI);
- Блок цифровой обработки данных. С его помощью реализуется алгоритм обработки данных, поступающих от АЦП, необходимый для выработки триггерного решения;
- Модули триггерных данных и решения, отвечающие за передачу триггерной информации через FCT в центральный триггер для принятия окончательного решения и сигналов триггера в оцифровывающие платы EROS;
- Блок переключения тактовой частоты — для работы в автономном режиме с кварцевым генератором, при отсутствии тактовой частоты от центрального триггера.
- Блок счетчика ошибок, показывающий количество ошибок внутренней работы цифровой части.
- Модули тестовой памяти и тестовых входов/выходов используются для отработки разных комбинаций данных.

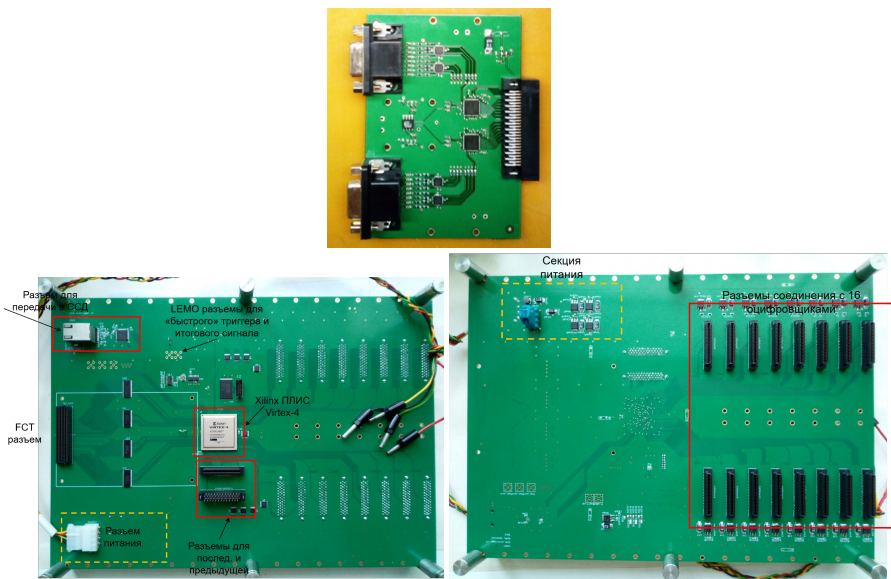


Рисунок 4 — Фотографии электроники первичного триггера калориметра. Сверху: Оцифровывающая плата первичного триггера. Снизу: Материнская плата первичного триггера, виды сверху (слева) и снизу (справа)

В четвертом параграфе приводятся исследования стабильности работы различных типов микросхем в условиях высокого радиационного облучения до 2 кГр и потока  $10^{12}$  нейтронов/см<sup>2</sup>.

В пятом параграфе описывается моделирование и реализация алгоритма первичного триггера. Для построения оптимального алгоритма кластеризации было проведено моделирование методом Монте-Карло. В моделировании сравнивалось три размера кластера:

1.  $1 \times 1$  триггерных ячеек, соответствующих  $2 \times 2$  кристаллам;
2.  $2 \times 2$  триггерных ячеек, соответствующих  $4 \times 4$  кристаллам;
3.  $3 \times 3$  триггерных ячеек, соответствующих  $6 \times 6$  кристаллам.

В первом случае за кластер принималась триггерная ячейка с максимальным энерговыделением. Для случая с размером  $2 \times 2$ , кластер находился следующим образом: сначала производилось суммирование по всем возможным комбинациям триггерных ячеек размером  $2 \times 2$  со сдвигом на одну триггерную ячейку ( $2 \times 2$  кристалла), как показано на рисунке 6. Затем выбиралась триггерная группа с максимальной суммой, которая принималась за сработавший кластер. В случае с размером кластера  $3 \times 3$  триггерные ячейки, поиск кластера происходил аналогично случаю  $2 \times 2$ , с единственной разницей в том, что суммирование происходило по всем возможным комбинациям  $3 \times 3$  триггерные ячейки.

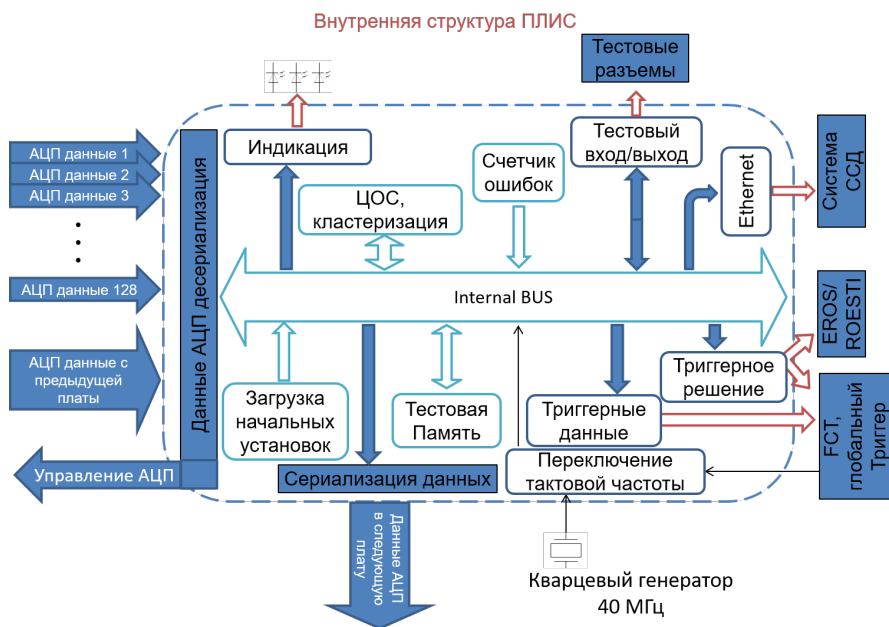


Рисунок 5 — Блок-схема внутренней структуры ПЛИС первичного триггера электромагнитного калориметра

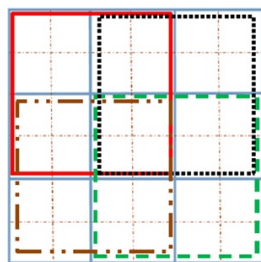


Рисунок 6 — Суммирование по всем возможным комбинациям  $2 \times 2$  триггерных ячеек

Проведенное моделирование с целью оценки коэффициента подавления потока электронов, возникающих в процессе DIO, в зависимости от эффективности триггера показало, что при 90% эффективности триггера на основе единичной триггерной ячейки, коэффициент подавления потока равен 50. В то время как при 90%-93% эффективности триггера на основе кластера  $2 \times 2$  триггерных ячеек поток электронов, возникающих в процессе DIO, уменьшается на 6 порядков. В работе приведено детальное сравнение работы первичного триггера на основе кластеров, состоящих из  $2 \times 2$  и  $3 \times 3$  триггерных ячеек. Результаты моделирования

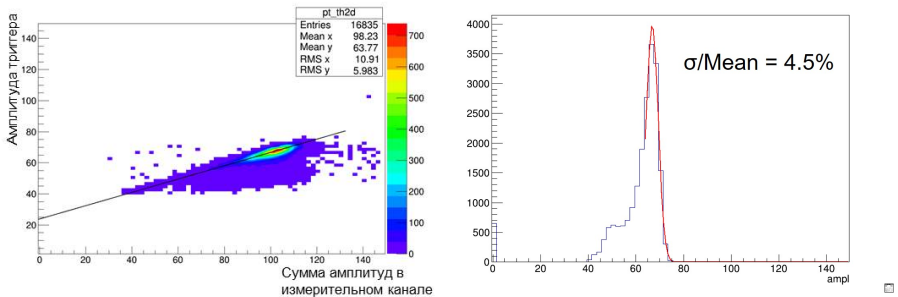
показали, что оба кластера обеспечивают почти одинаковое энергетическое разрешение, в то время как кластер из  $3 \times 3$  триггерных ячеек имеет большее количество наложенных сигналов от разных, почти одновременно происходящих событий, которые могут дать “ложный” сигнал запуска.

Поэтому в первичном триггере калориметра эксперимента СОМЕТ используется размер кластера  $2 \times 2$  триггерных ячейки и описанный выше алгоритм поиска кластера, который обеспечивает необходимую эффективность и подавление фона при минимальном объеме кристаллов, то есть он оптимизирует область суммирования с учетом минимизации наложений.

В шестом и седьмом параграфах приводятся измерения энергетического разрешения и времени принятия решения системы первичного триггера электромагнитного калориметра на стенде и на выведенном пучке электронов.

Созданная система первичного триггера апробирована в серии тестов при различных условиях в соответствии с разработанными методиками регистрации и обработки сигналов с калориметрической системы на стенде (ИЯФ СО РАН, Россия и КЕК/J-PARC, Япония) и выведенном пучке электронов (Университет Тохоку, Япония).

Общая эффективность первичного триггера при зарегистрированном энерговыделении более 30 МэВ составила 99.4%, более 40 МэВ — 99.7%. Энергетическое разрешение триггерной системы по записанным заходам получилось 4.5% (рисунок 7) при энергии частиц около 105 МэВ. Испытания показали, что разработанный алгоритм обработки данных конвейерного типа (без мертвого времени) работает корректно.



а)

б)

Рисунок 7 — а) график линейности каналов первичного триггера; б) распределение измеренных амплитуд в каналах АЦП за вычетом пьедестала

Благодаря предложенной модели двойного триггера и принятым решениям о модернизации, задержка от момента события до прихода сигнала запуска чтения данных от центрального триггера не превышает

900 нс, как показано на рисунке 8. Предельная частота работы триггерной системы ограничена несколькими десятками килогерц из-за времени считывания данных одного события. Для вычитывания данных и удаленного управления электроникой имеется возможность использования Ethernet (Raw/UDP).

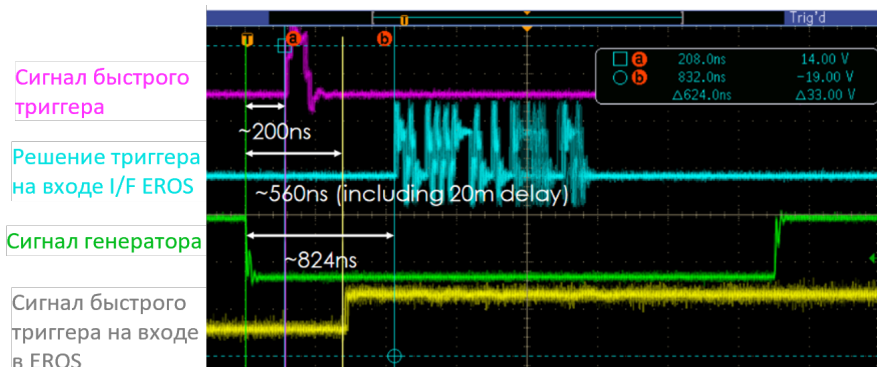


Рисунок 8 — Осциллограмма сигналов в ключевых точках электронного тракта электромагнитного калориметра

**В заключении** представлены основные результаты работы.

**В приложении А** приведены форматы данных используемой и разработанной электроники.

**В приложении Б** приведены принципиальные схемы разработанной электроники.

**В приложении В** представлены результаты радиационных испытаний регуляторов напряжения и цифровых микросхем на устойчивость к гамма-излучению.

**В приложении Г** представлены полученные свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и акты внедрения аппаратуры триггерной системы и программы для ЭВМ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена созданию электроники, разработке алгоритма кластеризации и испытаниям первичного триггера электромагнитного калориметра эксперимента СОМЕТ. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Создана электроника системы первичного триггера, представляющая собой единый набор электронных модулей и блоков в формате крейта евромеханики, выполняющая все требуемые функции по аналоговой и цифровой обработке сигналов калориметра и выработке логических сигналов для центрального

триггера, и удовлетворяющая физическим и техническим требованиям по энергетическому разрешению, временным параметрам и радиационной стойкости. Прототипы и финальная версия электроники были успешно протестированы на стенде.

2. Разработан алгоритм логики первичного триггера по поиску кластеров. Алгоритм был протестирован на стенде и на выведенном пучке электронов. Результаты тестирования показали, что алгоритм работает корректно. Эффективность вычислялась из соотношения количеств событий зарегистрированных внешней системой и событий зарегистрированных триггерной системой калориметра. Общая эффективность при энергии более 30 МэВ составила 99.4 %, при энергии более 40 МэВ составила 99.7%. На выведенном пучке электронов было получено энергетическое разрешение триггерной системы по записанным заходам около 4.5 % при энергии пучка электронов 105 МэВ.
3. Разработаны методики наладки и тестирования электроники на стенде и создано соответствующее программное обеспечение. Все модули и блоки электроники отлажены и проверены для использования в эксперименте. Разработаны методики контроля и оперативного управления электроникой в эксперименте.

В перспективе результаты работы могут быть использованы для разработки триггерных систем на основе алгоритмов кластеризации для современных электромагнитных калориметров для проведения фундаментальных экспериментальных исследований по физике элементарных частиц и атомного ядра.

## **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

### **В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:**

- [1] Анализ данных электромагнитного калориметра эксперимента СОМЕТ в режиме реального времени. / Л. Эпштейн, Р. Ахметшин, Д. Григорьев [и др.] // Текст: электронный // Сибирский физический журнал. Серия: Физика высоких энергий, ускорителей и высокотемпературной плазмы. — 2017. — Т. 12, № 4. — С. 5—13. — URL: <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2017-12-4-5-13>. — Дата публикации: 12.2017.
- [2] Система предварительного отбора событий электромагнитного калориметра эксперимента СОМЕТ. / Л. Эпштейн, Д. Шёлковский, Д. Григорьев, Ю. Юдин // Текст: электронный // Известия НАН Беларуси. Серия физико-математических наук. — 2019. — Т. 56, № 1. —

С. 97–109. — URL: <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2019-55-1-97-109>. — Дата публикации: 2019.

- [3] COMET Phase-I technical design report / L. Epshteyn, R. Abramishvili, G. Adamov, [et al.] // Текст: электронный // Progress of Theoretical and Experimental Physics. — 2020. — Vol. 2020, no. 3. — P. 033C01. — URL: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptz125>. — Дата публикации: 13.03.2020.
- [4] *Epshteyn, L. B.* Study of the COMET experiment / L. B. Epshteyn, D. N. Grigoriev, D. V. Shoukavy // Текст: электронный // Moscow University Physics Bulletin. — 2025. — Vol. 79, S1. — P. 1–7. — URL: <https://doi.org/10.3103/S002713492470067X>. — Дата публикации: 20.02.2025.
- [5] *Эпштейн, Л.* Система первичного триггера электромагнитного калориметра эксперимента COMET / Л. Эпштейн, Д. Григорьев, Д. Шёлковый // Текст: электронный // Журнал технической физики. — 2025. — Т. 95, № 11. — С. 2256–2264. — URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/61610>. — Дата публикации: 21.10.2025.

#### **В сборниках трудов конференций:**

- [6] The level-1 trigger system for the electromagnetic calorimeter of the COMET experiment / L. Epshteyn, R. Akhmetshin, D. Grigogiev, [et al.] // Текст: электронный // Journal of Instrumentation. — 2017. — Vol. 12, no. 01. — P. C01064. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/12/01/C01064>. — Дата публикации: 23.01.2017.
- [7] The electronics for the electron calorimeter of the COMET experiment / L. Epshteyn, R. Akhmetshin, D. Grigogiev, D. Shoukovy, Y. Yudin // Текст: электронный. — 2018. — URL: <https://dx.doi.org/10.1109/NSSMIC.2018.8824666>. — Дата публикации: 05.09.2019.

#### **Зарегистрированные программы для ЭВМ:**

- [8] *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Программное обеспечение для триггерной системы электронного калориметра эксперимента COMET. / Л. Эпштейн ; ИЯФ СО РАН // Текст: электронный, — №2023616419 (Рос. Федерация). — URL: <https://fips.ru/EGD/642562ef-dca4-4f7a-8e58-f19aa8608d7e> (дата обр. 16.12.2024).

**Эпштейн Леонид Борисович**

**Первичный триггер электромагнитного калориметра  
эксперимента СОМЕТ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

---

Сдано в набор 22.06.2026 года.

Подписано в печать 23.06.2026 года.

Формат 60×90/16. Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 16

---

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротапринте ИЯФ СО РАН  
*630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11*