



ГАММА-400

Система отбора событий гамма-телескопа ГАММА-400

А. И. Архангельский^{1,2*}, А. М. Гальпер^{1,2}, И. В. Архангельская², А. В. Бакалдин^{1,3},
Ю. В. Гусаков¹, О. Д. Далькаров¹, А. Е. Егоров¹, А. А. Леонов^{1,2}, Н. Ю. Паппе¹, М. Ф. Рунцо²,
Ю. И. Стожков¹, С. И. Сучков¹, Н. П. Топчиев¹, М. Д. Хеймиц², И. В. Чернышева^{1,2}, Ю. Т. Юркин²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им.
П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»», Москва

³Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук, Москва

*E-mail: Архангельский Андрей Игоревич AIArkhangelskij@mephi.ru, aiangel@lebedev.ru

Skype: <https://join.skype.com/iCeNnbm3t72y>

ВККЛ-36, 28 сентября-2 октября 2020, Москва

ПКЛ_1 #137

Космический проект ГАММА-400 относится к новому поколению космических обсерваторий, предназначенных для проведения поиска следов темной материи в космическом гамма-излучении, измерения характеристик диффузного гамма-излучения и гамма-излучения Солнца в периоды солнечной активности, гамма-всплесков, протяженных и точечных гамма-источников, потоков электронов, позитронов, а также ядерной компоненты космических лучей с энергиями вплоть до нескольких ТэВ. Ядром комплекса научной аппаратуры является гамма-телескоп.

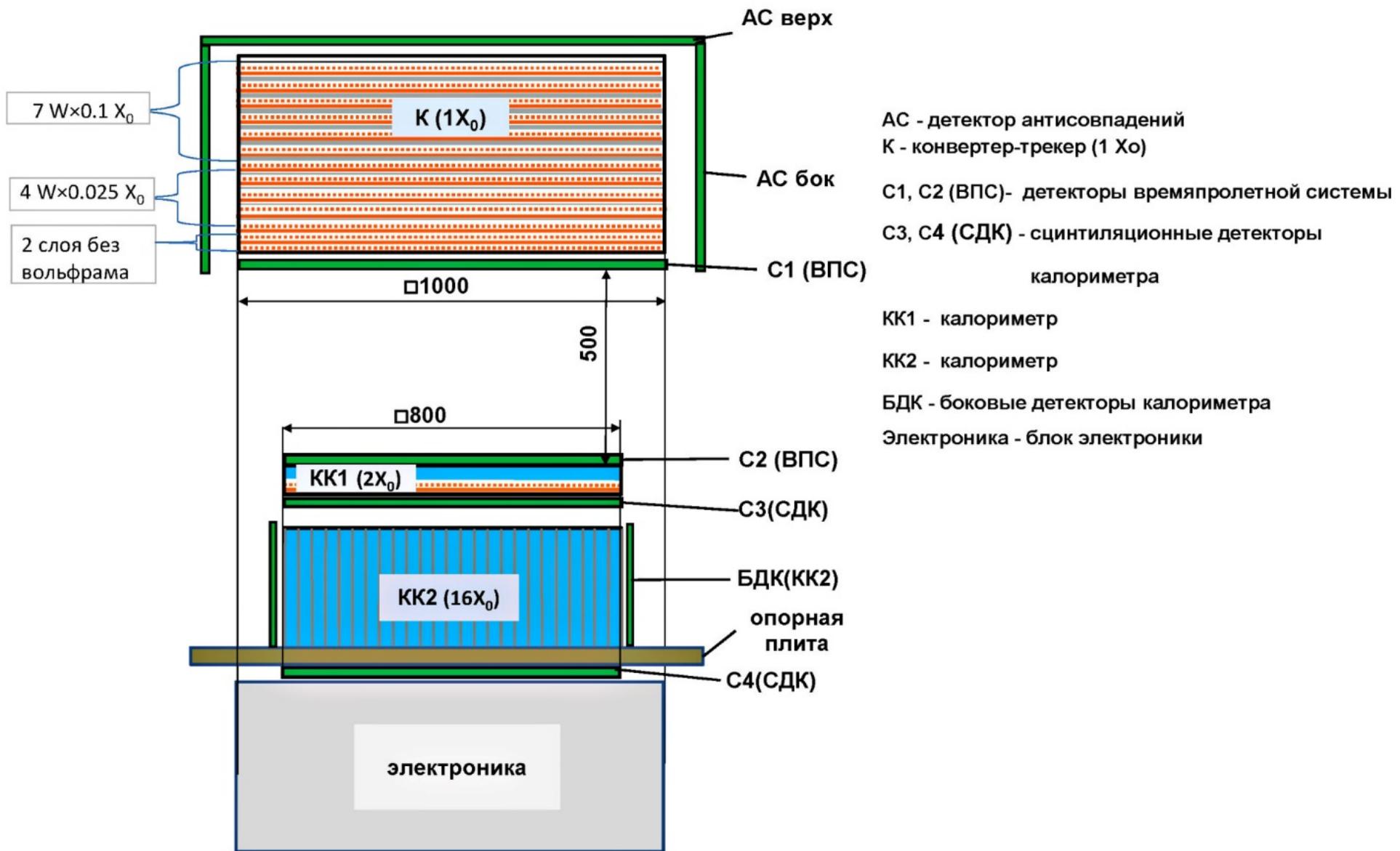
Гамма-телескоп ГАММА-400 предназначен для прецизионного измерения космического гамма-излучения в диапазоне энергий от 20 МэВ до сотен ГэВ; регистрации космического гамма-излучения от активных астрофизических объектов разной природы; поиска особенностей в энергетических спектрах от дискретных и протяженных источников; регистрации гамма-излучения

от переменных дискретных источников с целью выяснения природы ускорительных процессов элементарных частиц в этих источниках; проведения детальных обзоров и картографирования галактической плоскости и центра Галактики с высоким разрешением и высокой чувствительностью [1, 2].

Комплекс научной аппаратуры ГАММА-400 устанавливается на платформе НАВИГАТОР [3], разрабатываемой НПО им. С.А. Лавочкина и выводится на высокоапогейную орбиту со следующими начальными параметрами:

- высота апогея не менее 300000 км;
- высота перигея не менее 500 км;
- наклонение к плоскости экватора $51,4^\circ$;
- период обращения 7 суток.

Физическая схема гамма-телескопа

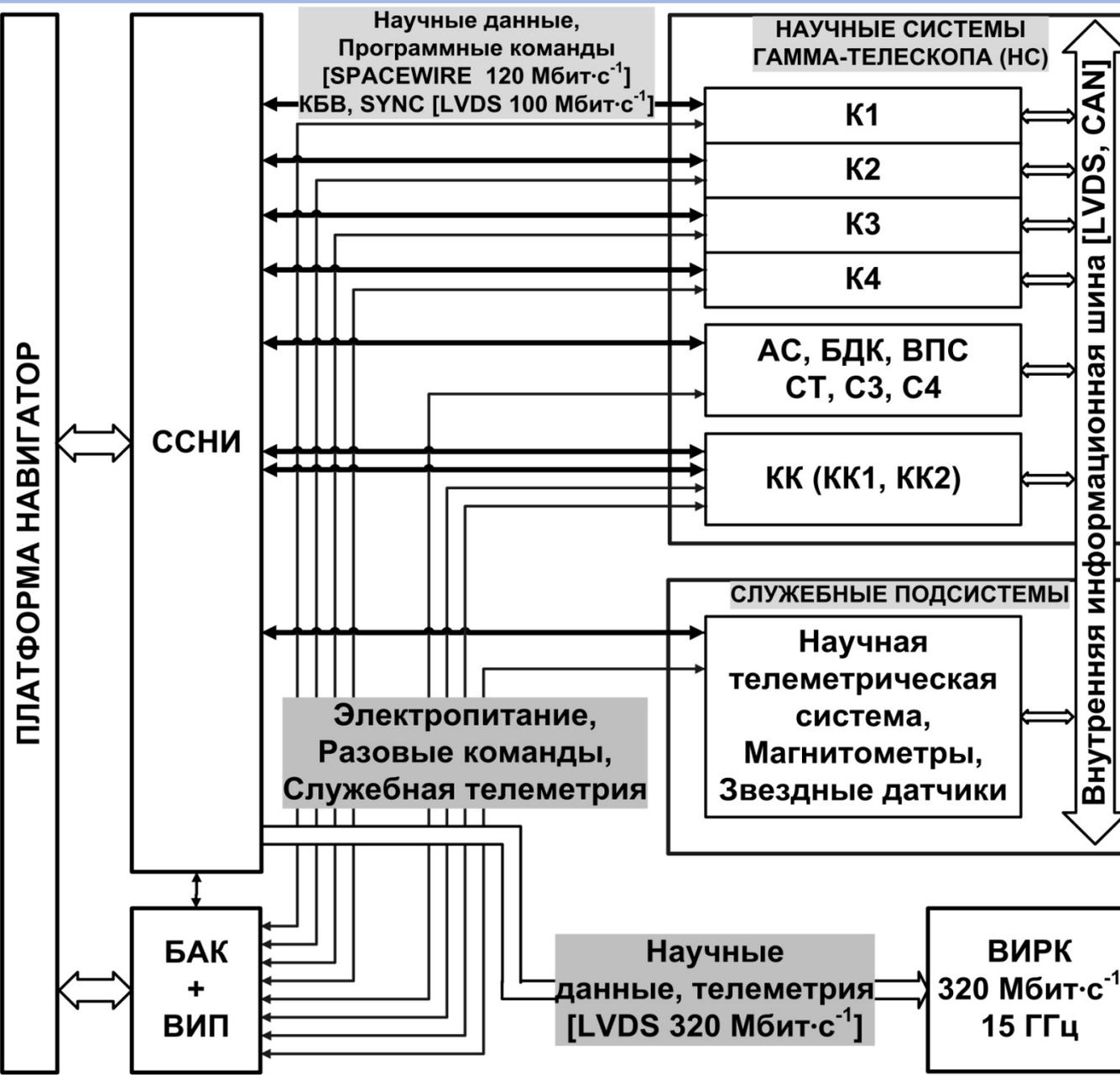


В состав гамма-телескопа входят следующие системы и детекторы:

- **К** – координатно-чувствительный конвертер-трекер;
- **КК1** и **КК2** – спектрометрические блоки координатно-чувствительного калориметра **КК** на основе CsI(Tl);
- **С3** – сцинтилляционный детектор прешауэра (**КК1+С3**) калориметра;
- **С4** – сцинтилляционный детектор утечки;
- **ВПС** – времяпролетная система, состоящая из четырех, ориентированных перпендикулярно плоскостей, состоящих из десяти (восьми) полос сцинтиллятора ВС408 размером 1000 (800) мм × 100 мм × 10 мм каждая, объединенных попарно в детекторы **С1** и **С2**, расположенные на расстоянии 50 см друг от друга;

- $AC_{\text{верх}}$ – верхний антисовпадательный детектор;
- $AC_{\text{бок}}$ – боковые антисовпадательные детекторы;
- **БДК** – боковые антисовпадательные детекторы калориметра (детекторы **С3**, **С4**, **ВПС**, **АС** и **БДК** выполнены из конструктивно и схемотехнически унифицированных модулей и различаются размером и количеством сцинтилляционных полос, а также содержанием блоков фронтальной электроники);
- отсек блоков электроники;
- система формирования триггерных сигналов - отбора событий (**СТ**);
- система управления, сбора и хранения научной информации (**ССНИ**) [4];
- система электропитания (**СЭП**).

Функциональная схема гамма-телескопа



ССНИ – система сбора научной информации;
БАК – блок аппаратов коммутации;
ВИП – вторичные источники питания систем гамма-телескопа;
К1-К4 – автономные секции конвертера-трекера **К**;
СТ – система формирования триггерных сигналов;
ВИРК – высокоинформативный радиокomплекс.

Система формирования триггерных сигналов СТ
(отбора событий) гамма-телескопа ГАММА-400
осуществляет формирование триггеров, соответствующих
регистрации различных типов событий на основании
выходных сигналов блоков фронтальной электроники
детектирующих систем телескопа.

Для повышения надежности, система
спроектирована с использованием схемы двойного
резервирования; магистрали информационного обмена
также дублированы, причем каждая магистраль имеет
свои собственные приемо-передающие узлы.

Триггер гамма-телескопа ГАММА-400 в основной апертуре вырабатывается на трехуровневой основе:

- быстрый триггер **FT** (внутренний для СТ) сигнализирует о пролете заряженной частицы через основную апертуру гамма-телескопа и инициирует начало экспресс-анализа информации с детекторных систем АС, ВПС, СДК для выработки логического сигнала триггера первого уровня **LVL1**;

- триггер первого уровня **LVL1** инициирует сбор и анализ данных со всех детекторных систем телескопа;

- триггер второго уровня **LVL2** инициирует, по результатам проведенного анализа, вывод данных в ССНИ для последующей передачи на наземный сегмент комплекса.

Триггеры **FT** и **LVL1** вырабатываются аппаратно, за время 40-120 нс после прохождения частицы через основную апертуру гамма-телескопа.

Быстрый триггер **FT** вырабатывается при пересечении заряженной частицей трех из четырех плоскостей времяпролетной системы ВПС в апертуре прибора, которая определяется, исходя из сравнения комбинации сработавших в ВПС сцинтилляционных полос, в заданном временном окне длительностью 200 нс, с «разрешенными» шаблонами (масками). Набор масок определяется по результатам моделирования и калибровок гамма-телескопа и загружается в регистры ПЛИС плат модуля формирования быстрого триггера МФБТ при инициализации модуля. При обнаружении совпадения, вырабатывается логический сигнал быстрого триггера **FT**.

Параллельно вырабатывается сигнал **АС_ВЕТО**, который определяется, как логическая сумма по *OR* суммарных сигналов с детекторов АСверх и АСбок1-АСбок4 в том же временном окне.

Одновременно с этим анализируется суммарное энерговыделение в детекторной системе СЗ. По результатам расчетов введен следующий критерий: если энерговыделение в одном из слоев детектора превышает 30 МэВ (что соответствует срабатыванию любого из четырех дискриминаторов суммарного сигнала, снимаемого с одной стороны слоя детектора с порогом 15 МэВ) то сигнал с АС игнорируется, но информация о сработавших полосах АС все равно заносится в общий кадр информации о событии для наземного анализа.

Четыре логических сигнала СДК складываются по логике *OR*, формируя логический сигнал **C3_HIGH**, а затем суммарный сигнал комбинируется с сигналом **AC_VETO** по логике:

$$\mathbf{VETO} = ((\mathbf{NOT\ C3_HIGH}) \mathbf{AND\ AC_VETO}),$$

формируя глобальный логический сигнал **VETO**.

Комбинация данных сигналов:

$$\mathbf{LVL1} = \mathbf{FT\ AND\ (NOT\ VETO)}$$

образует триггер первого уровня.

Сигнал **LVL1** выдается в блоки фронтальной электроники детекторов АС и ВПС, прерывая их текущую работу и инициируя в них сбор и подготовку к передаче данных в модуль формирования мастер-триггера МФМТ, инициирует считывание из МФБТ в МФМТ содержимого соответствующих буферов ВЦП, счетчиков и регистров, а также производит, в соответствии с «разрешенной»

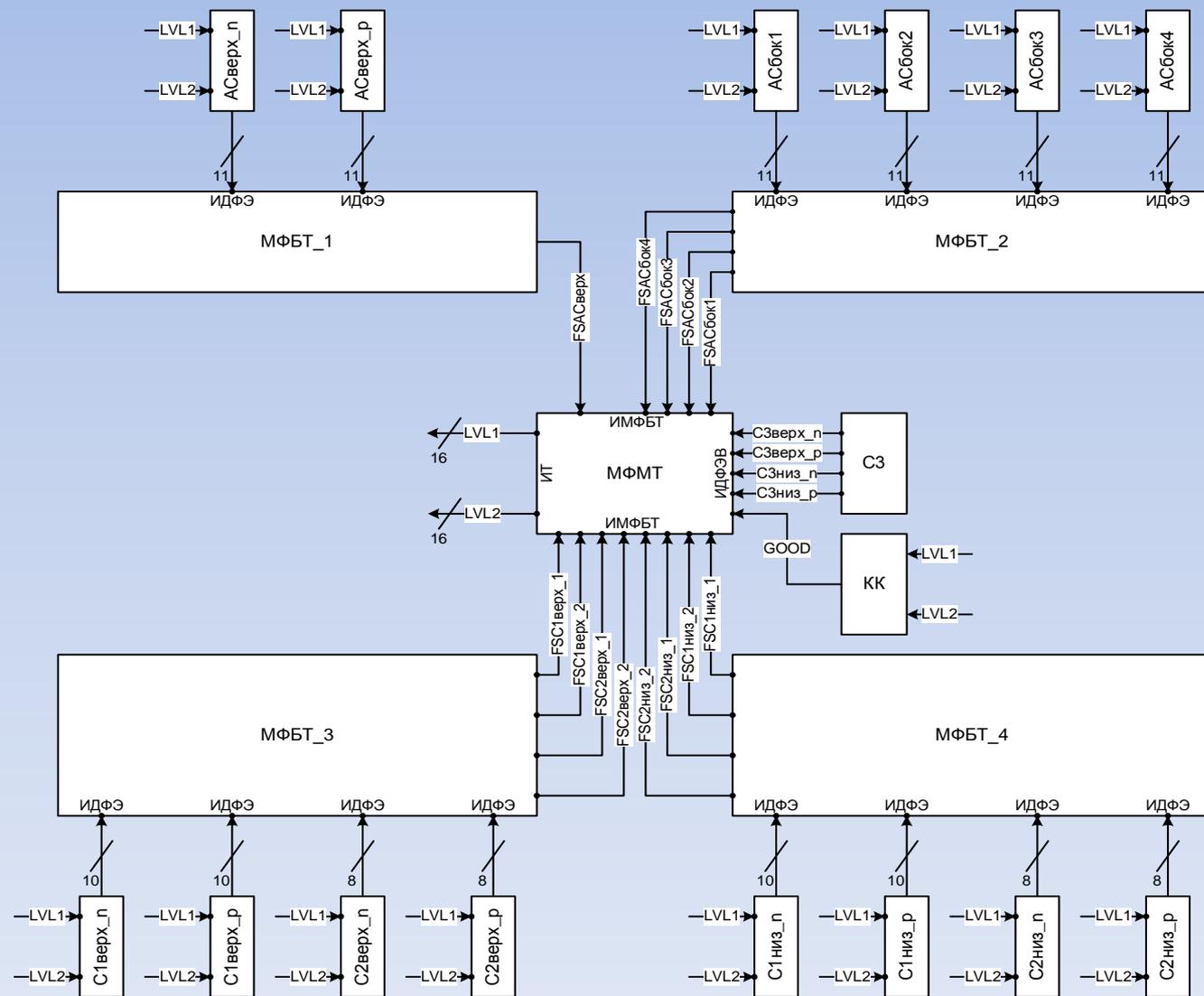
комбинацией сработавших полос ВПС, выбор из соответствующих буферов ВЦП модуля формирования быстрого триггера МФБТ значений времен пересечения частицей соответствующих полос детекторов С1 и С2. Если разность времен, определяемых комбинацией сработавших полос, находится в допустимых пределах, делается вывод о движении частицы в основной апертуре сверху-вниз. При этом вырабатывается логический сигнал **UP_DOWN**, который может учитываться при формировании триггера второго уровня.

Одновременно сигнал **LVL1** выдается на конвертер-трекер К и координатно-чувствительный калориметр КК, инициируя сбор данных в указанных системах.

В КК при этом производится экспресс-анализ данных с детекторов С3, С4, БДК, КК1 и КК2 с выдачей, в случае положительного результата анализа, сигнала **GOOD** на соответствующий вход интерфейса МФМТ. Анализ информации, может занять около 10 мкс, что обусловлено временем, необходимым для сбора заряда в сцинтилляционных детекторах КК1 и КК2 на основе CsI(Tl) координатно-чувствительного калориметра КК. Если данный сигнал поступает в течение 10 мкс, то в соответствии с логикой выработки триггера второго уровня в МФМТ, на детекторные системы выдается триггер второго уровня **LVL2**, разрешающий вывод научной информации на ССНИ, а также выдается на

детекторные системы АС и ВПС разрешая вывод массивов данных в МФМТ по высокоскоростному интерфейсу ВСИ SpaceWare, упаковки в телеметрические кадры, привязки к бортовому времени и подготовке к передаче в ССНИ. При непоступлении сигнала в указанном временном интервале, или при невыполнении условий формирования триггера второго уровня, МФМТ повторно выдает на детекторные системы сигнал **LVL1**, инициирующий сброс набранных данных и переход в режим ожидания следующего события.

Взаимодействие детекторных подсистем при отборе событий

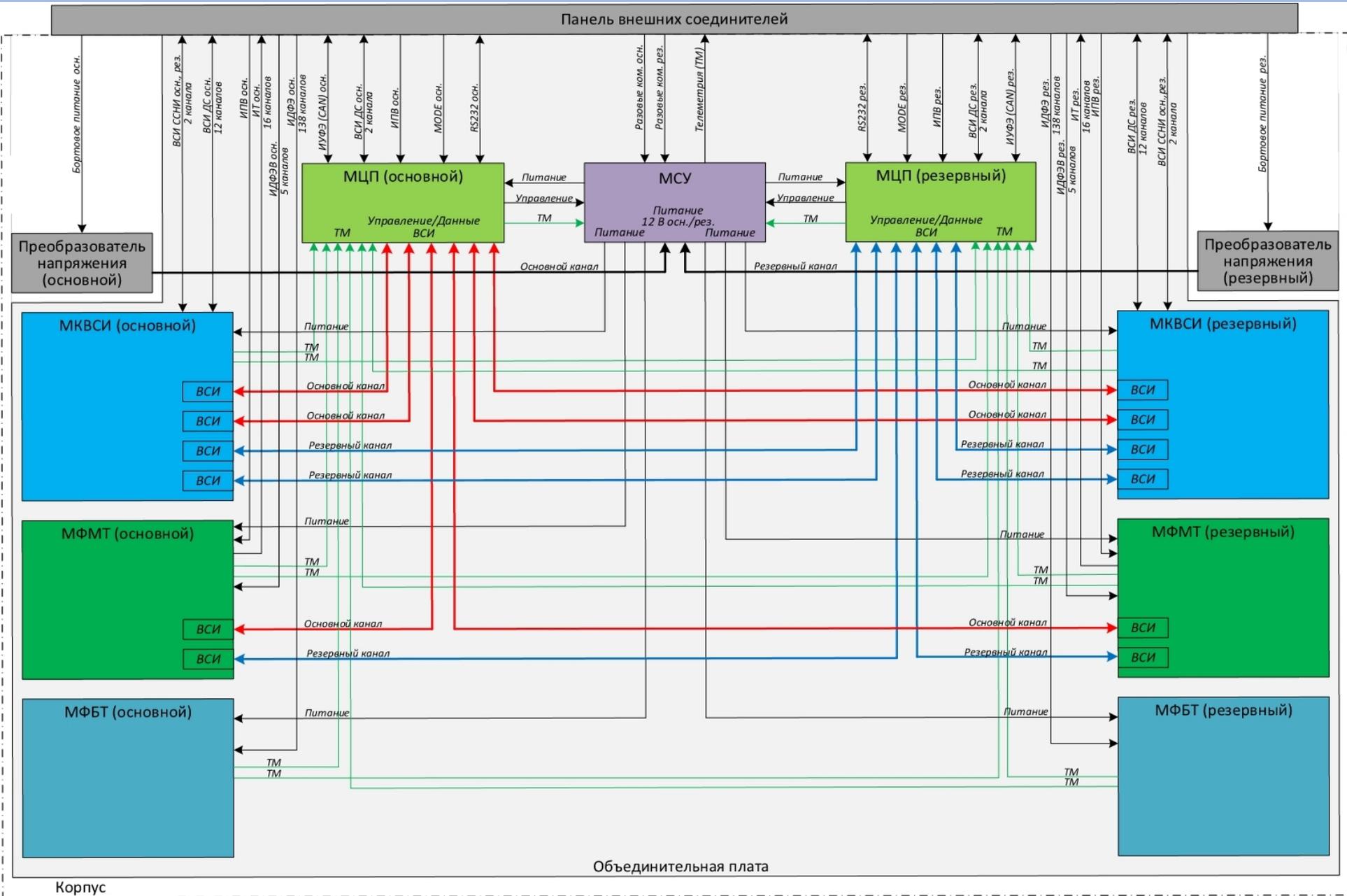


ИДФЭ - интерфейс дискриминаторов фронтальной электроники;
ИМФБТ - интерфейс модуля формирования быстрого триггера;
МФБТ_1-4 – четыре платы модуля формирования быстрого триггера;
МФМТ - модуль формирования мастер-триггера;
FSx – сигналы быстрых субтриггеров с соответствующих детекторных подсистем;
LVL1 и **LVL2** – сигналы триггеров первого и второго уровня соответственно.

СТ содержит модуль системы управления (МСУ), основной и резервный модуль центрального процессора (МЦП), основной и резервный модуль коммутатора высокоскоростного интерфейса SpaceWire (МКВСИ), два основных и два резервных модуля формирования быстрого и мастер триггеров (МФБТ и МФМТ), корпус с объединительной платой, основным и резервным преобразователями напряжения электропитания и панелью внешних соединителей. Для достижения необходимой надежности в СТ реализовано перекрестное резервирование модулей.

СТ осуществляет взаимодействие по каналам обмена информацией и цепям питания с бортовыми системами КА, детекторными системами КНА, ССНИ.

Функциональная схема СТ



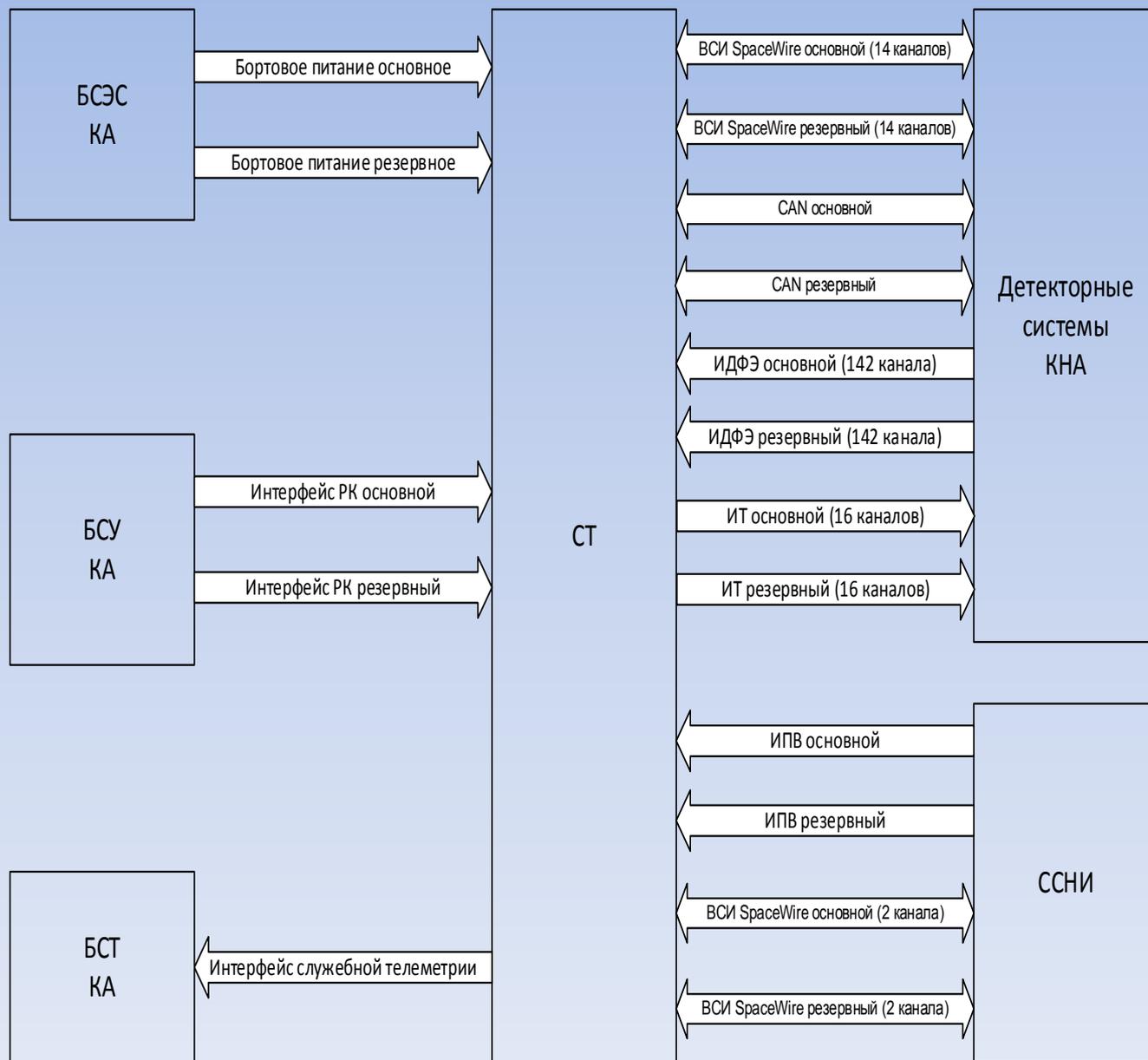
От бортовой системы электроснабжения (БСЭС) КА СТ получает бортовое электропитание по основному и резервному каналам. БСЭС обеспечивает питание постоянным током с напряжением $(28,5 \pm 1,35)\text{В}$ в установившемся режиме и $(28,5 \pm 3,0)\text{В}$ при переходных процессах длительностью до 50 мс в течении всего срока активного существования (САС) КА.

Бортовая система управления (БСУ) КА осуществляет коммутацию основного/резервного каналов питания системы, подачу и отключение питания с основного и резервного МЦП, аварийное отключение питания основных и резервных модулей МКВСИ, МФМТ, МФБТ через интерфейс дублированных разовых команд РК.

ССНИ через основной или резервный ВСИ SpaceWire передает в СТ макрокоманды и получает из СТ телеметрические сообщения. Макрокоманды содержат данные для управления СТ и детекторными системами КНА, бортовое время, данные об параметрах орбиты КА. Телеметрические сообщения включают информацию о состоянии СТ и детекторных систем. ССНИ передает в СТ код приборного времени и сигналы синхронизации («1 Гц», «5 МГц», «1 МГц», «Данные») по дублированному интерфейсу ИПВ. В бортовую систему телеметрии (БСТ) от СТ по интерфейсу служебной телеметрии поступают дискретные телеметрические сигналы о наличии напряжения 12 В в цепях питания модулей СТ. С детекторными системами КНА СТ связана

дублированными ВСИ SpaceWire. Количество дублированных каналов SpaceWire – 14. По этим каналам ВСИ SpaceWire передаются научные данные, макрокоманды и телеметрическая информация. Передача массивов данных из СТ в ССНИ осуществляется по двум дублированным каналам ВСИ SpaceWire. СТ посылает детекторным системам АС и ВПС макрокоманды по интерфейсу CAN и принимает от них телеметрические сообщения по интерфейсу ВСИ SpaceWire по соответствующим запросам. По ВСИ SpaceWire производится также прием научных данных от детекторных систем АС и ВПС.

Блок-схема связи СТ с детекторными системами КНА и основными системами КА



КА – космический аппарат;
КНА – комплекс научной аппаратуры;
БСЭС - бортовая система электроснабжения;
БСУ - бортовая система управления;
БСТ – бортовая система телесигнализации;
ССНИ - система сбора и накопления научной информации;
ВСИ – высокоскоростной интерфейс;
ИДФЭ - интерфейс дискриминаторов фронтальной электроники
ИПВ – интерфейс приборного времени;
ИТ – интерфейс триггеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящий момент в рамках проекта ГАММА-400 завершена разработка дополнения к эскизному проекту «Разработка ДЭП систем АС, К, ВПС, СДК, СТ гамма-телескопа. Проведение макетирования и испытаний», шифр СЧ ОКР: «ГАМСИС». В отношении системы формирования триггеров (отбора событий) получены следующие основные результаты:

- проработаны и обоснованы принципиальные решения по созданию СТ, дающие общее представление о принципах ее работы и позволяющие обеспечить выполнение требований технического задания и общих технических требований;
- разработан и изготовлен макет СТ;

- разработана и изготовлена контрольно-проверочная аппаратура (КПА) макета СТ;
- проведены функциональные испытания макета СТ, подтвердившие правильность принятых технических решений и возможность получения требуемых технических характеристик СТ.

Экспертиза, проведенная АО «ЦНИИмаш» показала, что дополнение к эскизному проекту на разработку комплекса научной аппаратуры космического комплекса «ГАММА-400» в основном соответствует требованиям ТЗ на СЧ ОКР «ГАММА-400» (ДЭП КНА). В настоящее время проводятся мероприятия по доработке в установленном порядке материалов дополнения к эскизному проекту с учетом изложенных в экспертном заключении замечаний и рекомендаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Topchiev N. P., Galper A. M., Bonvicini V., et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79(3). P. 417.
2. Galper A. M., Adriani O., Arkhangelskaja I. V., et al. // Adv. in Space Res. 2013. V. 51. P. 297.
3. Syrov A. S., Smirnov V. V., Sokolov V. N., et al. // Cosmonautics and Rocket Engineering. 2015. V. 3. P. 58.
4. Arkhangelskiy A. I., Bobkov S. G., Serdin O. V., et al. // J. of Phys.:Conf. Ser. 2015. V. 675(3). 032013.

СПАСИБО

ЗА

ВНИМАНИЕ!