Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии

Применение сцинтилляционных детекторов в космических исследованиях небесных тел солнечной системы

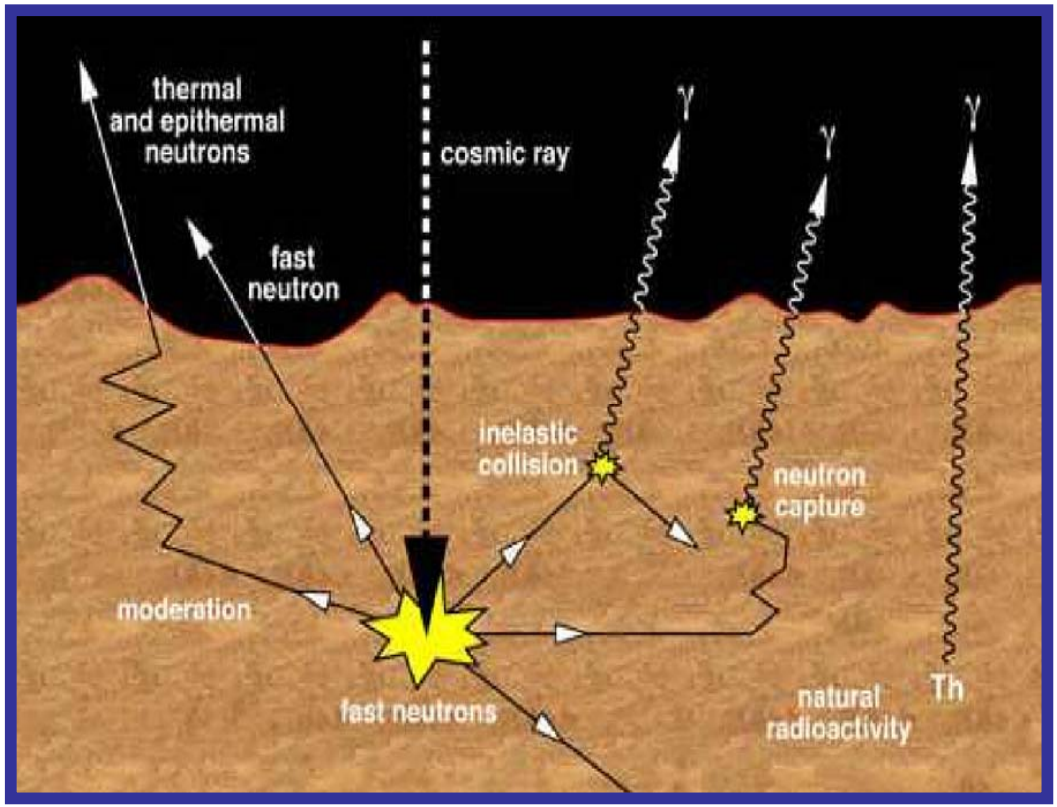
Козырев А.С., Митрофанов И.Г., Литвак М.Л., Санин А.В., Третьяков В., Рогожин А.А., Кузьмина Н.П.

Институт космических исследований РАН

г. Харьков
17-21 ноября 2008 г.

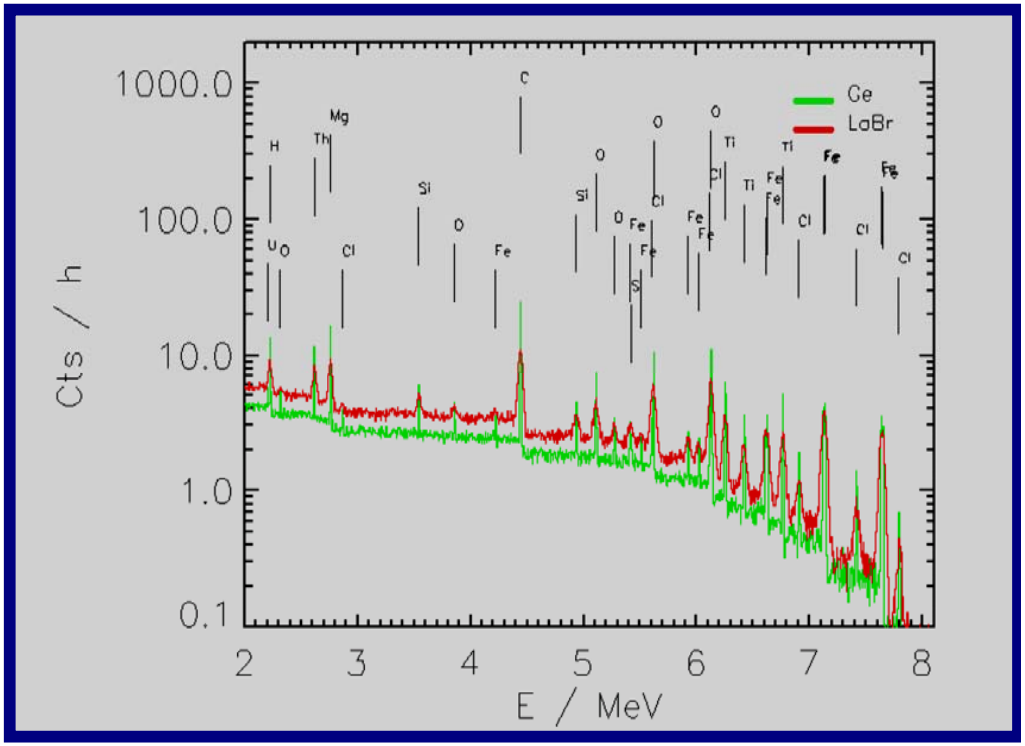
Ядерная спектроскопия поверхности планет

Механизм генерации нейтронного и гамма-излучения в приповерхностном слое



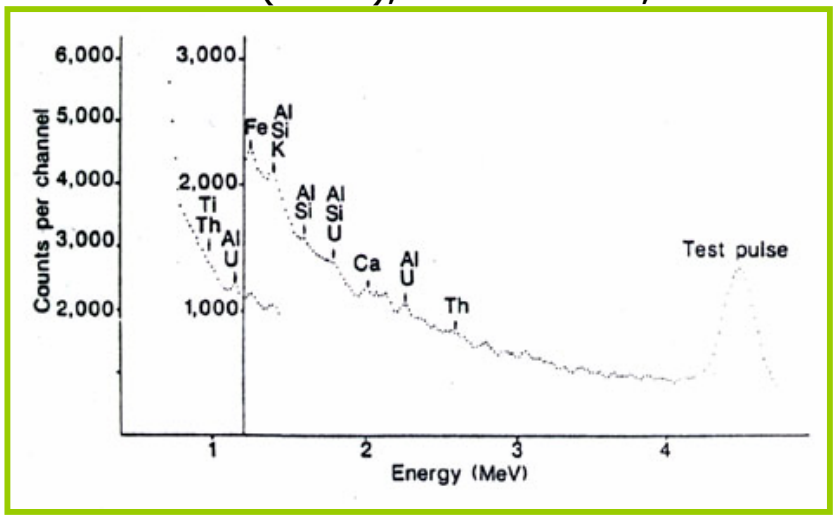
Численное моделирование гамма излучения, Овенс а. и др

Гамма спектр поверхности Меркурия

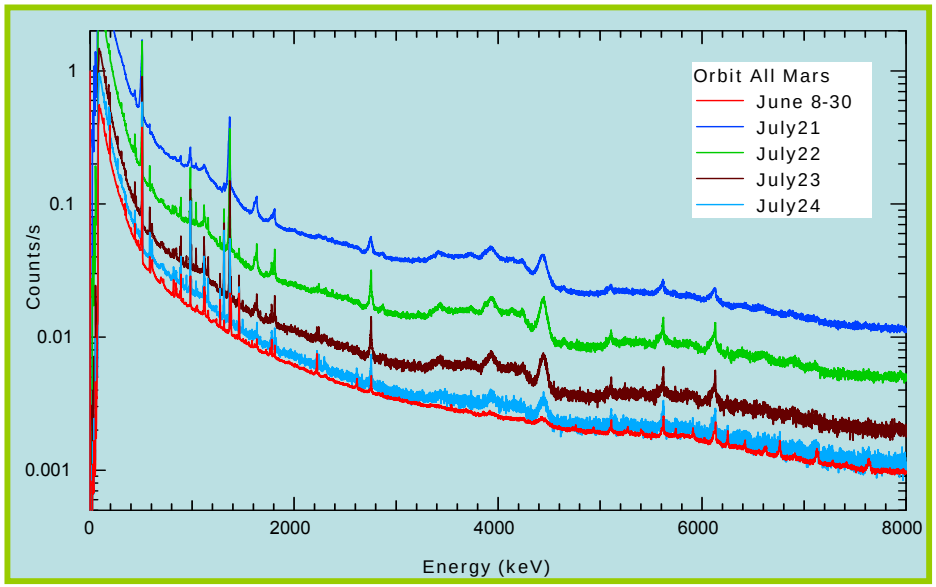


Состав поверхности: Исследования Луны и Марса

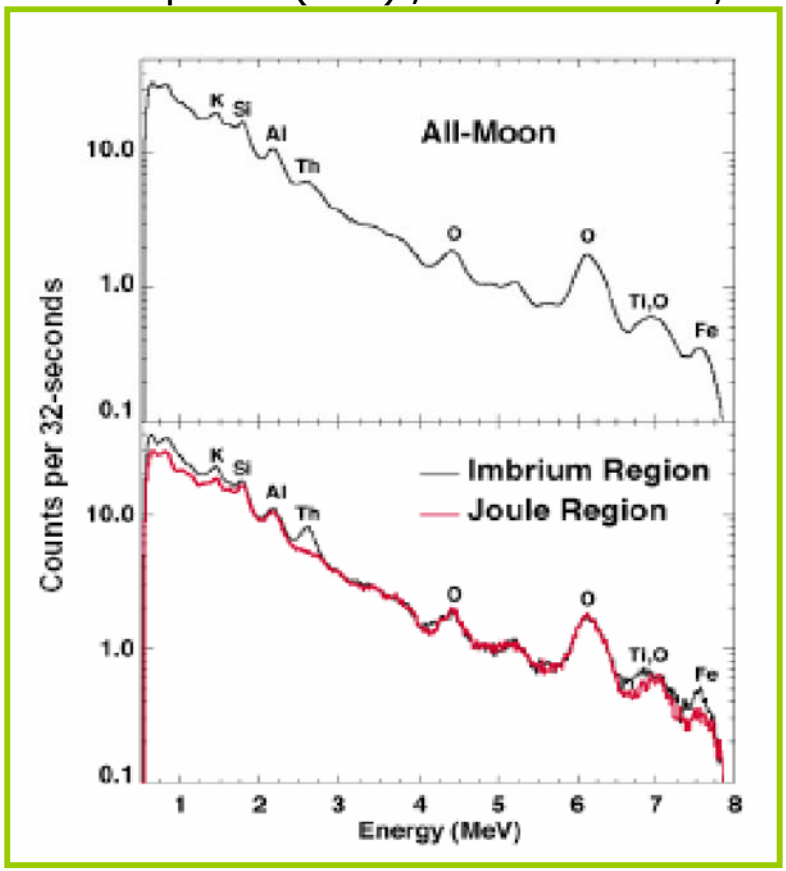
Фобос-2 (СССР), Surkov et al., 1989



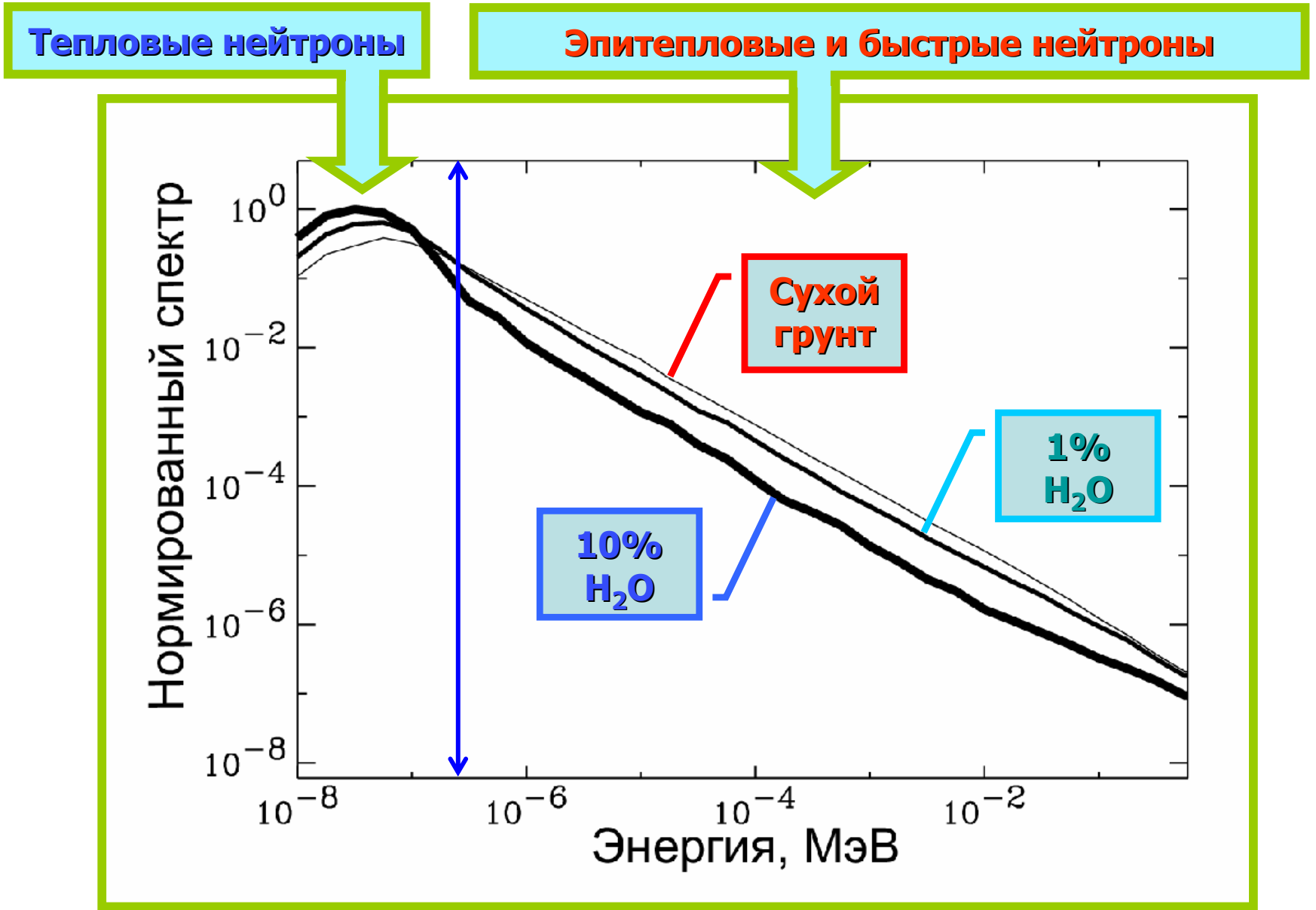
Mars Odyssey (USA), Boynton et al., 2002



Lunar Prospector (USA) , Lawrence et al., 1998

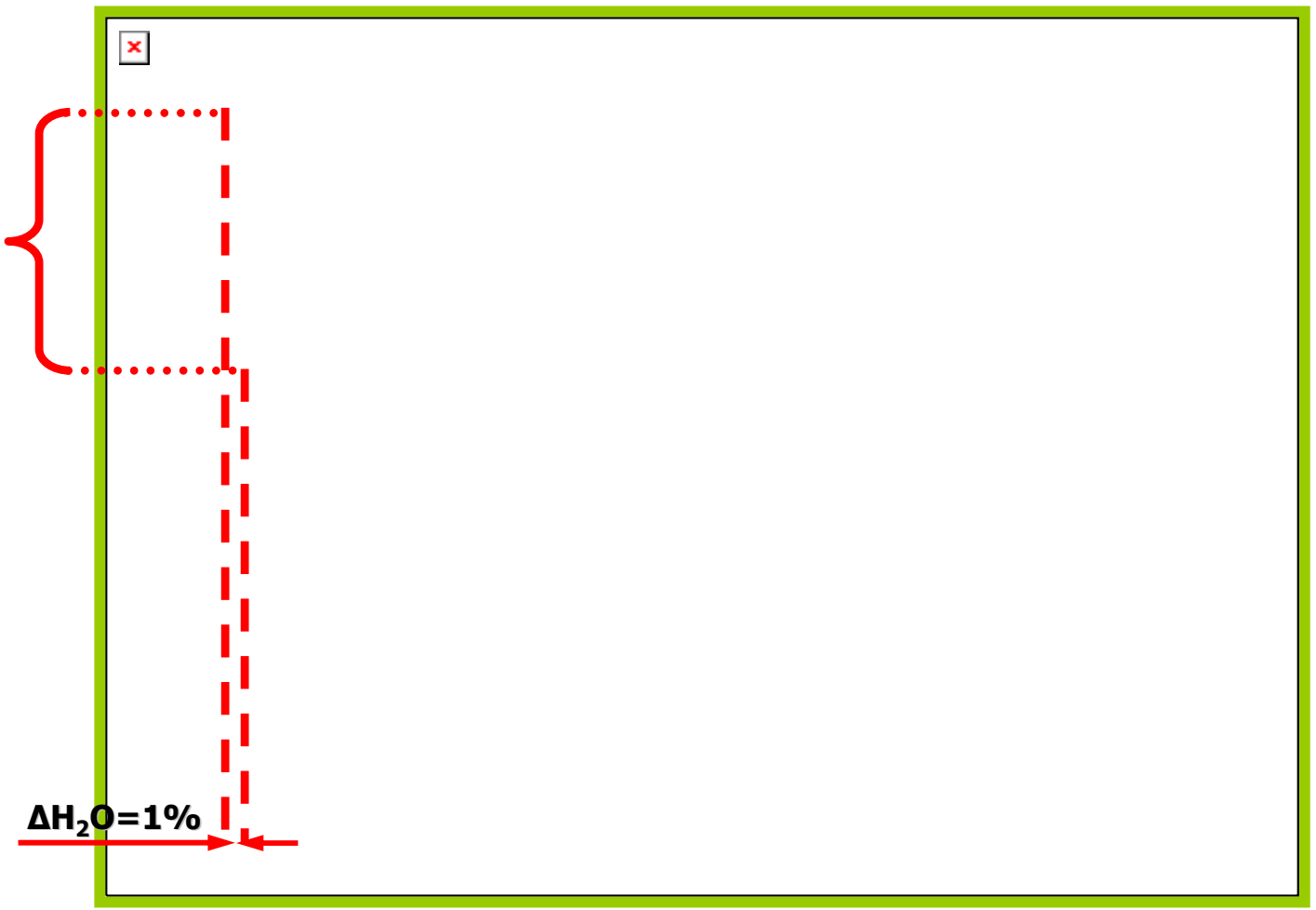


Нейтронная спектроскопия: поиск водосодержащих слоев



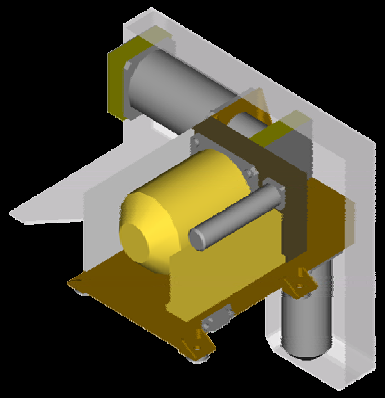
Регистрация эпитепловых нейтронов как индикатор содержания воды в приповерхностном слое планеты

1% H_2O ≡ Decreasing of epithermal neutron flux by 35%



Применение сцинтилляционных нейтронных детекторов

ХЕНД: ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ



Цель: Нейтронное картографирование поверхности Марса

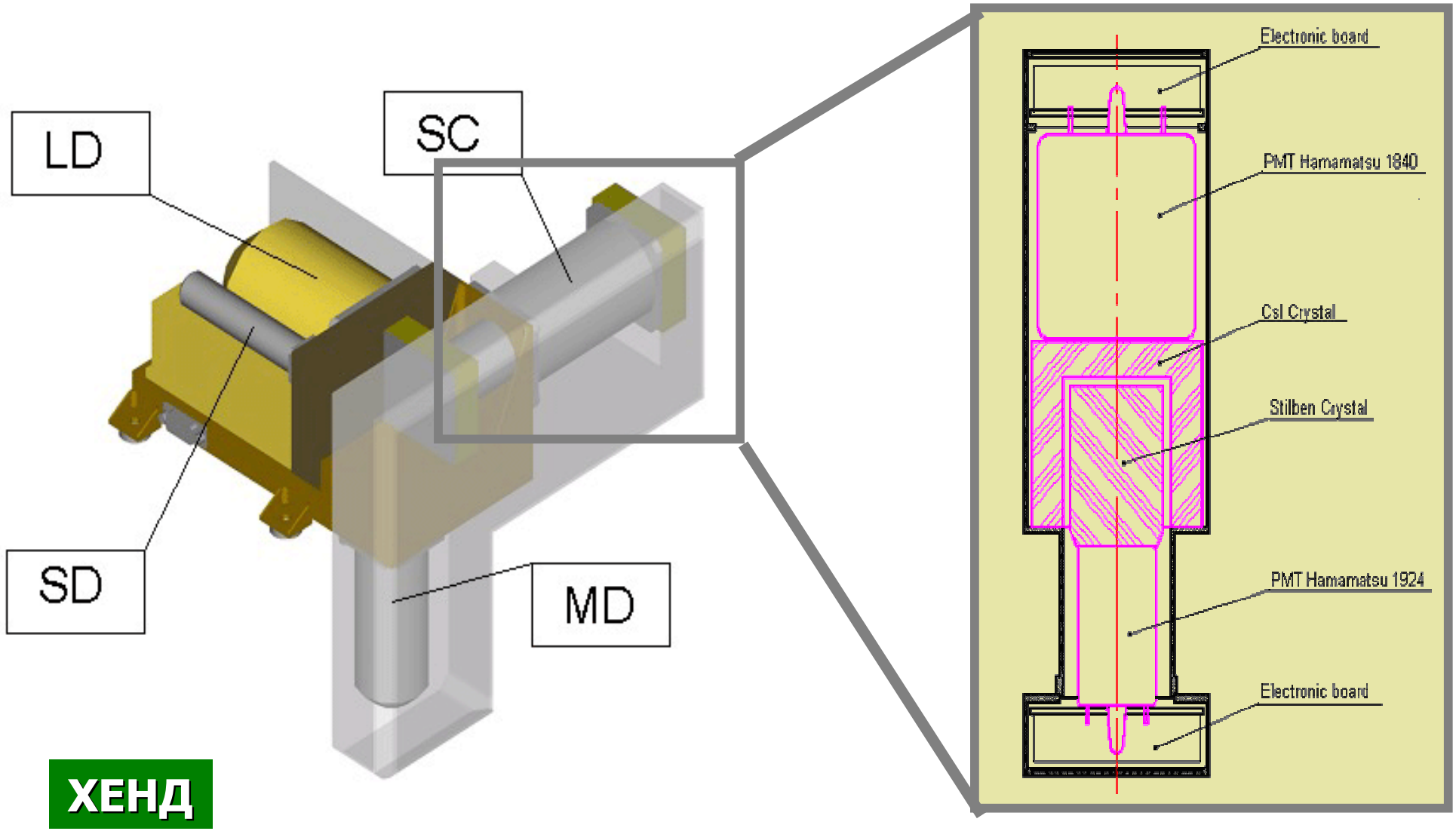
Научные задачи:

- Поиск поды в приповерхностном грунте
- Сезонные наблюдения
- Мониторирования солнечных вспышек
- Локализация гамма-всплесков

Характеристики:

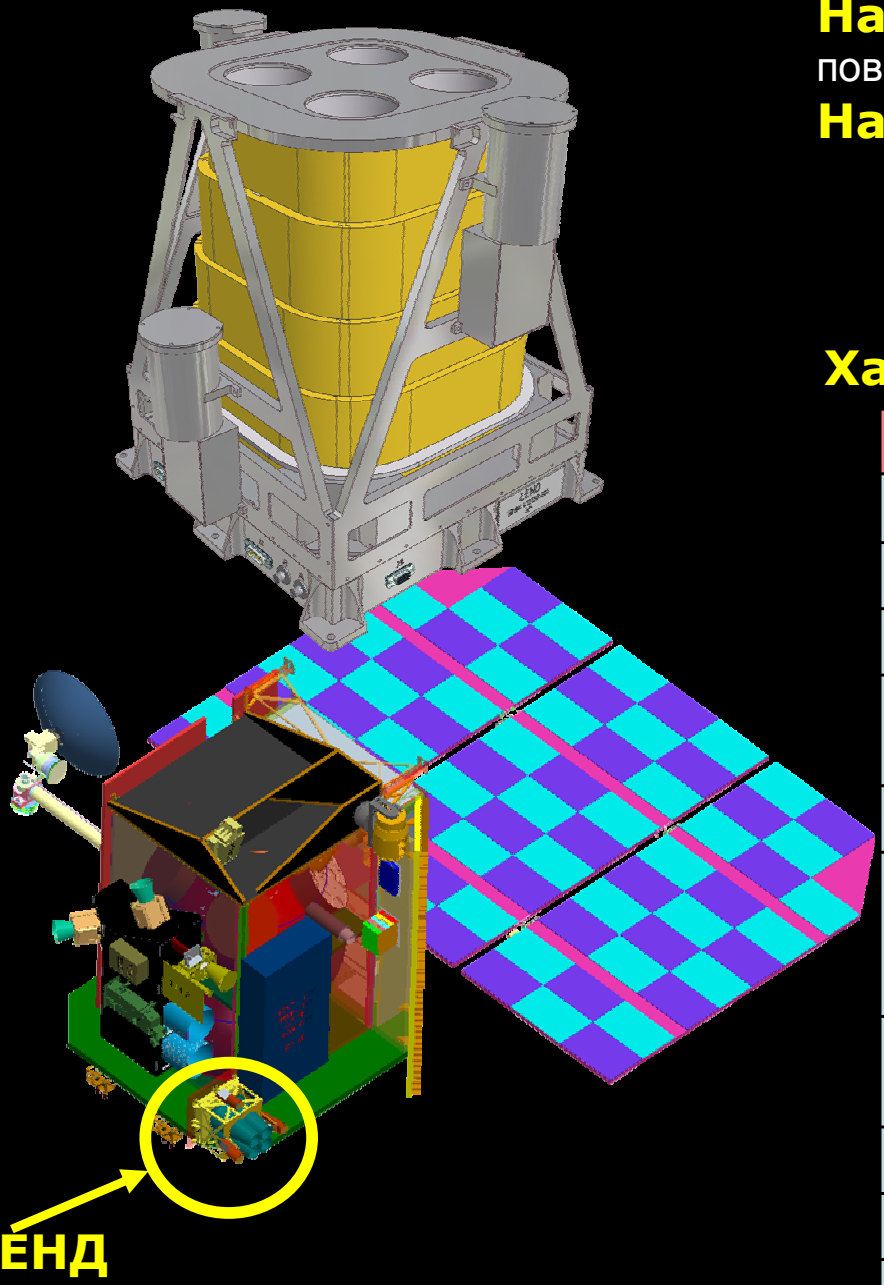
ПАРАМЕТРЫ	ЗНАЧЕНИЯ
Масса	3,6 кг
Энергопотребление	6 В
Размеры	
Пространственное разрешение	300 x 300 км
Временное разрешение	> 0.25 с
Энергетический диапазон, нейтроны	Широкий энергетический диапазон 0.4 эВ – 15 МэВ
Энергетический диапазон, гамма-излучение	Широкий энергетический диапазон 30 кэВ – 5 МэВ
Температурный диапазон	(-40C, 50C)
Детекторы	3He – пропорциональный счетчик, кристалл стильбен, кристалл CsI
Миссия	Mars Odyssey orbiter
Высота	400-450 км

Нейтронный спектрометр прибора ХЕНД: расположение



ХЕНД

ЛЕНД: ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ



Назначение: Нейтронное картографирование поверхности Луны с высоким разрешением

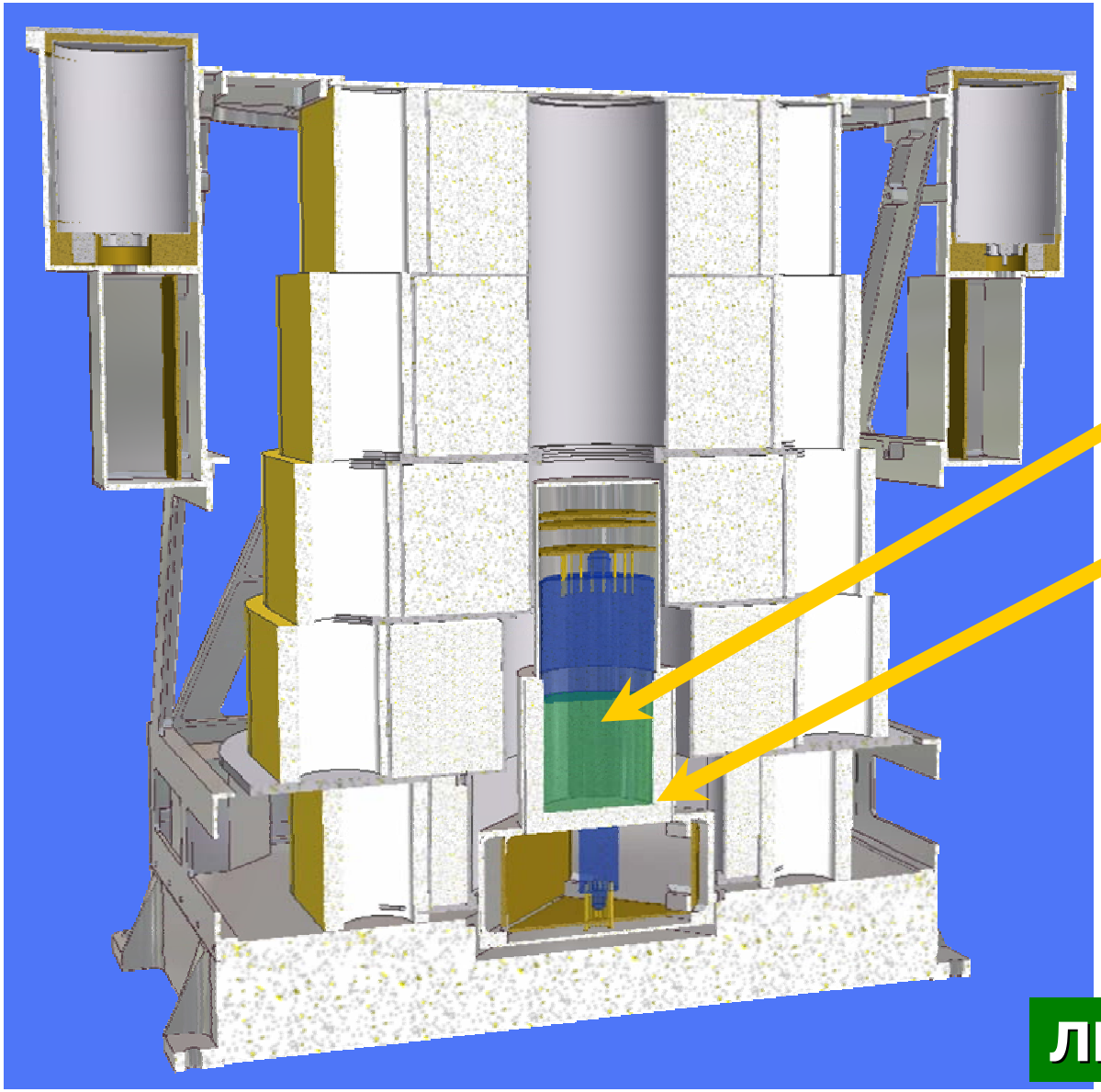
Научные задачи:

- Картографирование поверхности Луны
- Поиск водяного льда в «холодных ловушках» на полюсах Луны
- Измерения радиационного фона (нейтроны <15 МэВ)

Характеристики:

ПАРАМЕТРЫ	ЗНАЧЕНИЯ
Масса	24 кг
Энергопотребление	13 В
Размеры	460 mm x 460 mm x 438 mm
Пространственное разрешение	5 км x 5 км на высоте 50 км
Временное разрешение	> 1 с
Энергетический диапазон, нейтроны	Широкий энергетический диапазон 10^{-3} эВ – 15 МэВ
Детекторы	3He – пропорциональный счетчик, кристалл стильбен
Температурный диапазон	(-20C, 50C)
Миссия	Lunar Reconnaissance Orbiter
Высота	30 - 60 км

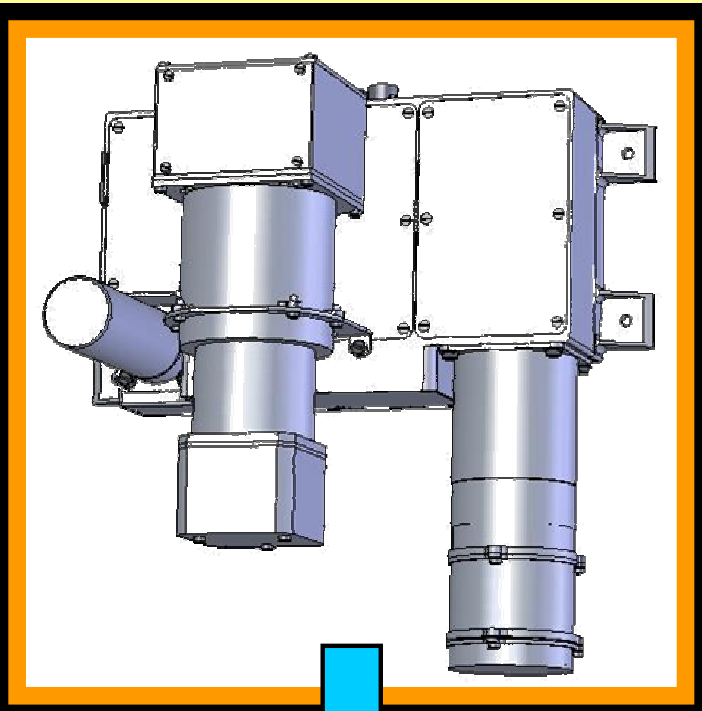
Нейтронный спектрометр прибора ЛЕНД: расположение

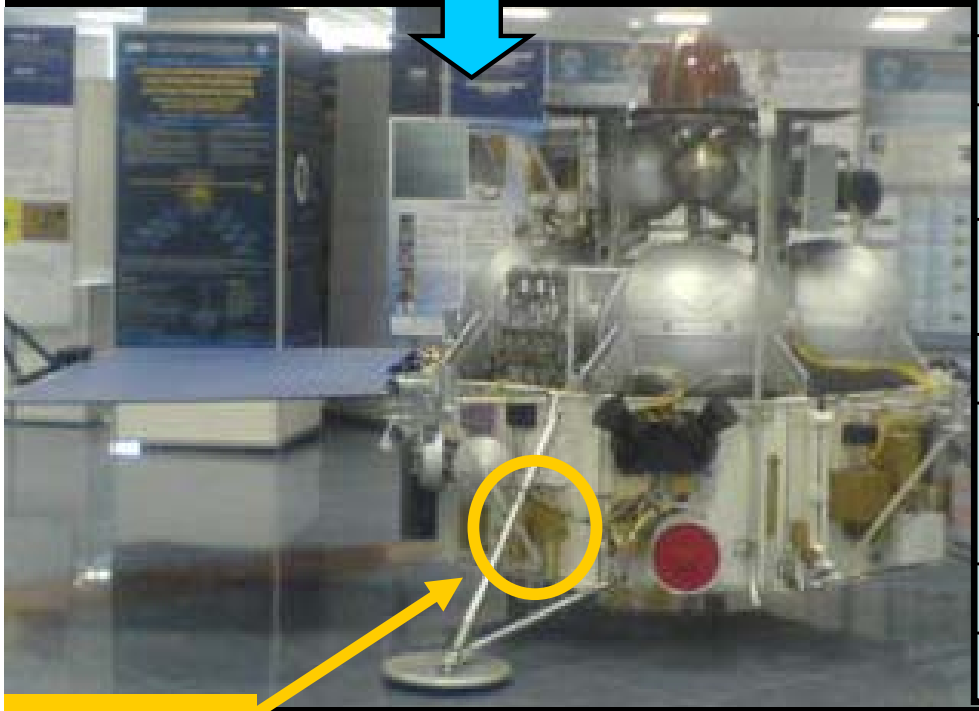


Сцинтилляционный блок прибора ЛЕНД:

- Кристалл стильбена
- Антисовпадательная защита на основе пластикового сцинтиллятора

НС ХЕНД: ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ





Назначение: Поиск водорода на поверхности Фобоса

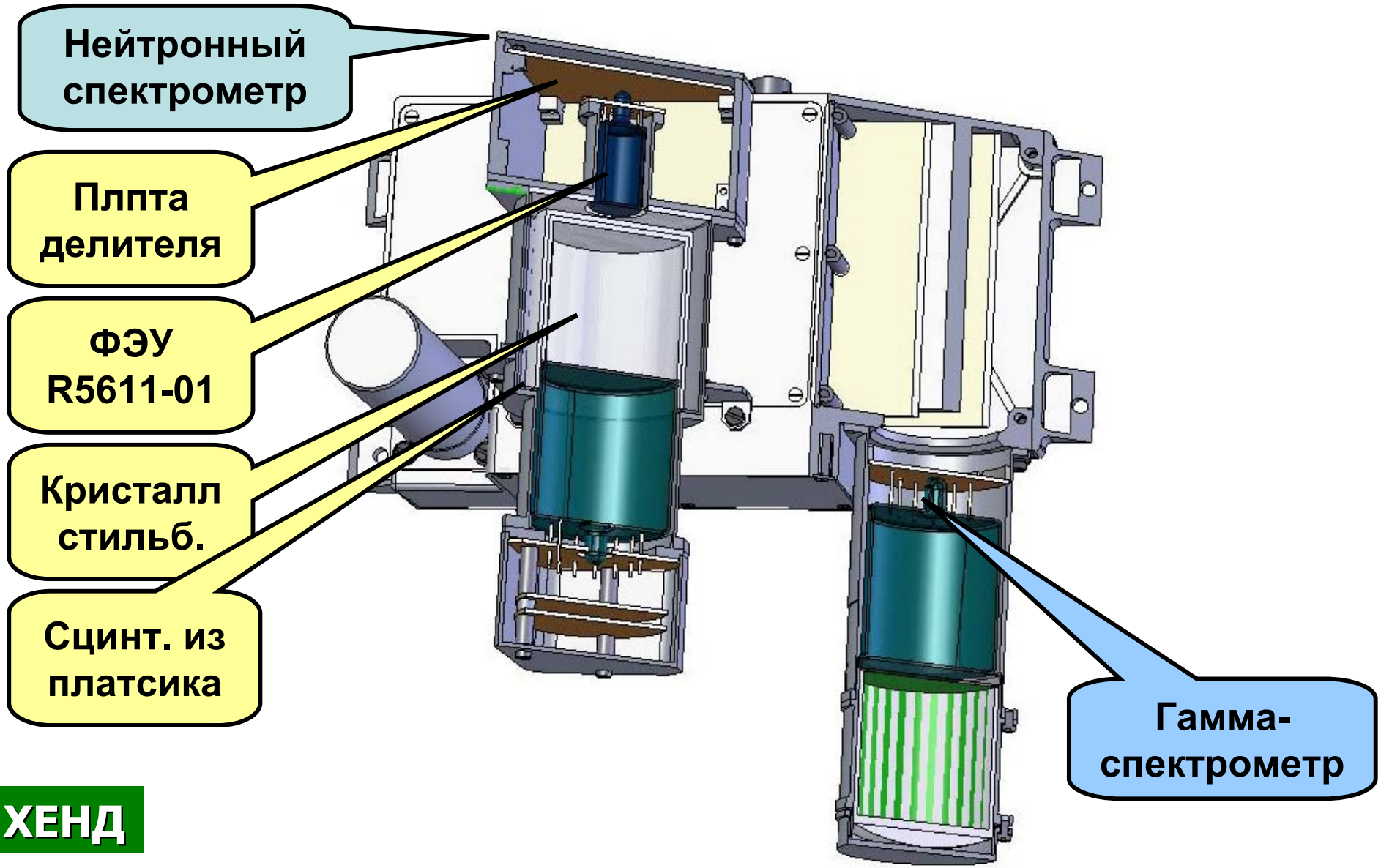
Научные задачи:

- Поиск воды в приповерхностном слое Фобоса
- Мониторинг радиационного фона на стадии перелета

Характеристики:

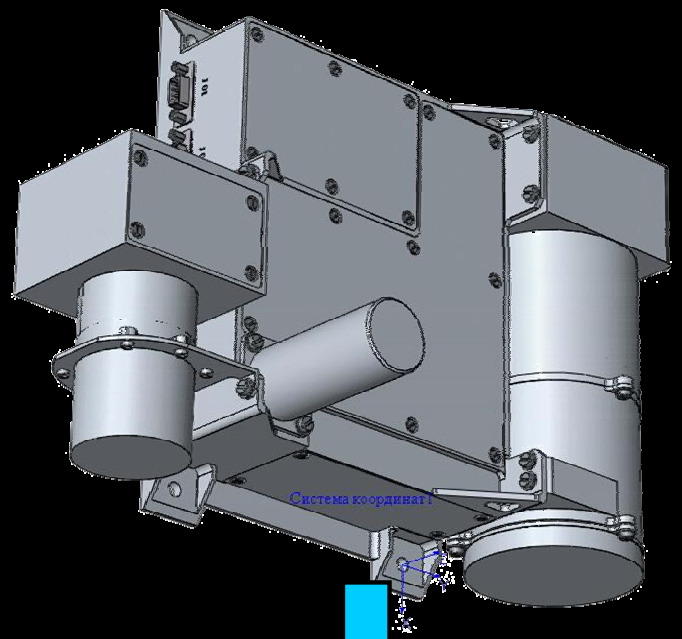
ПАРАМЕТРЫ	ЗНАЧЕНИЯ
Масса	3,3 кг
Энергопотребление	6 В
Пространственное разрешение	1 м
Временное разрешение	> 0.25 с
Энергетический диапазон, нейтроны	Широкий энергетический диапазон 0.4 eV – 15MeV
Энергетический диапазон, гамма	Широкий энергетический диапазон 30 keV – 10 MeV
Температурный диапазон	(-40C, 40C)
Детекторы	3He – пропорциональный счетчик, кристалл стильбен, LaBr3 кристалл
Миссия	Фобос-Грунт
Высота	Поверхность Фобоса

Нейтронный спектрометр прибора НС ХЕНД: расположение



НС ХЕНД

МГНС: ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ



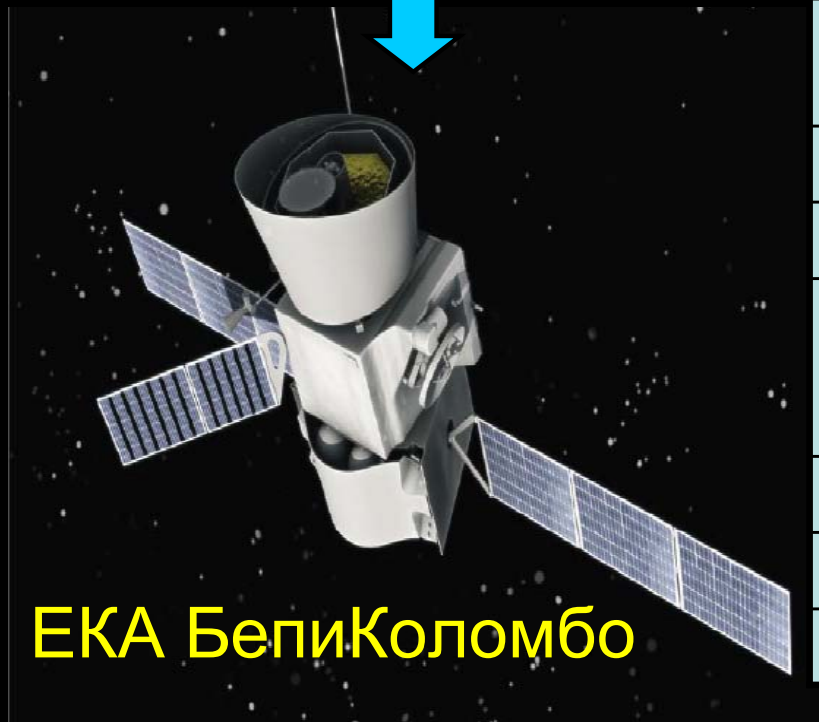
Назначение: Нейтронное и гамма-картографирование поверхности Меркурия

Научные задачи:

- Поиск воды в приповерхностном слое Меркурия
- Картографирование элементного состава поверхности Меркурия

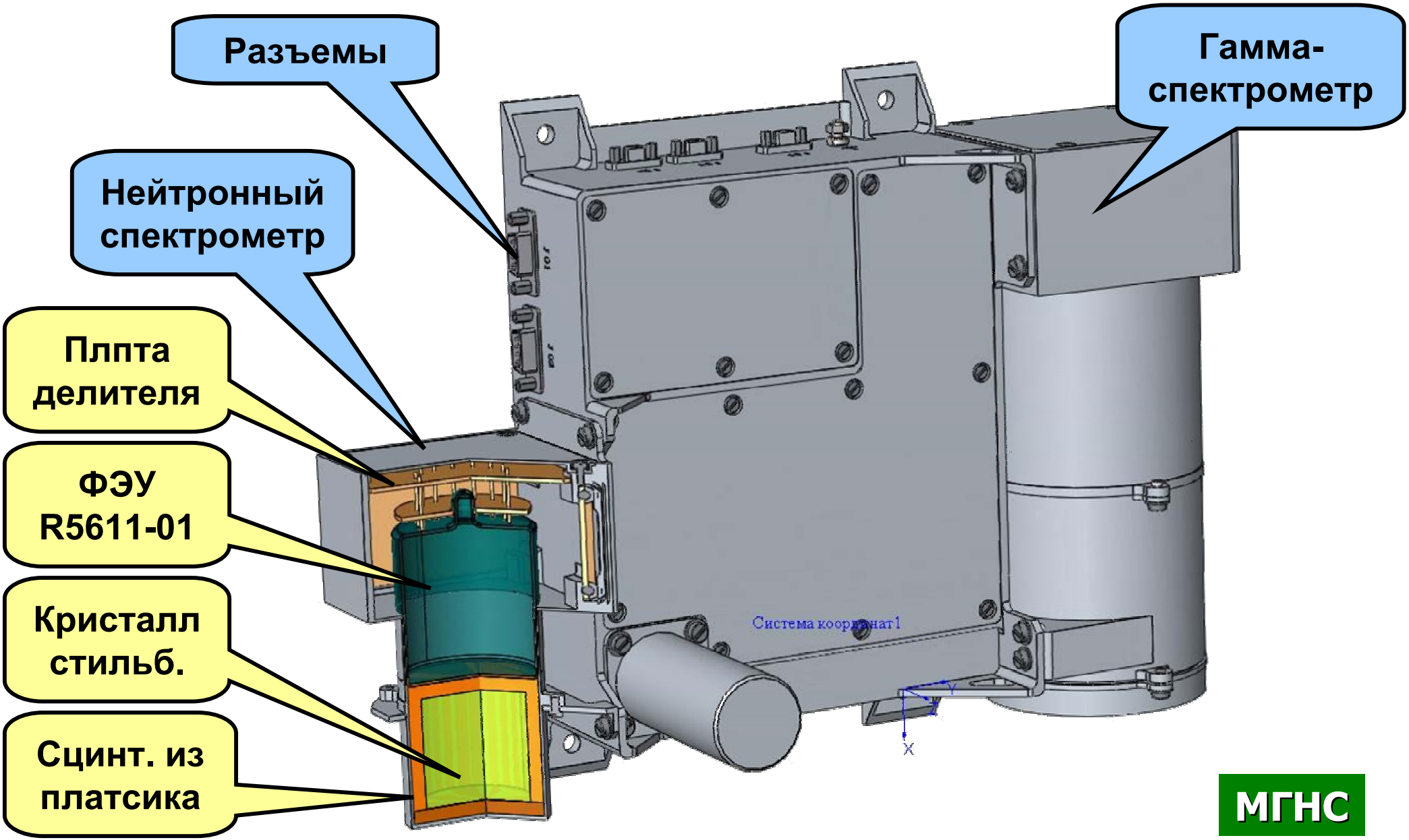
Характеристики:

ПАРАМЕТРЫ	ЗНАЧЕНИЯ
Масса	5.2 кг
Энергопотребление	5 В
Пространственное разрешение	400 км
Временное разрешение	2-4 μsec
Энергетический диапазон, нейтроны	Широкий энергетический диапазон 10^{-3} eV – 15 keV
Энергетический диапазон, гамма	300 keV – 10 MeV
Энергетическое разрешение, гамма	3% at 660 keV
Детекторы	пропорциональный счетчик, кристалл стильбен, LaBr3 кристалл
Температурный диапазон	(-20C, 40C)
Миссия	ESA: BepiColombo
Высота	400 км – 1500 км



ЕКА БепиКоломбо

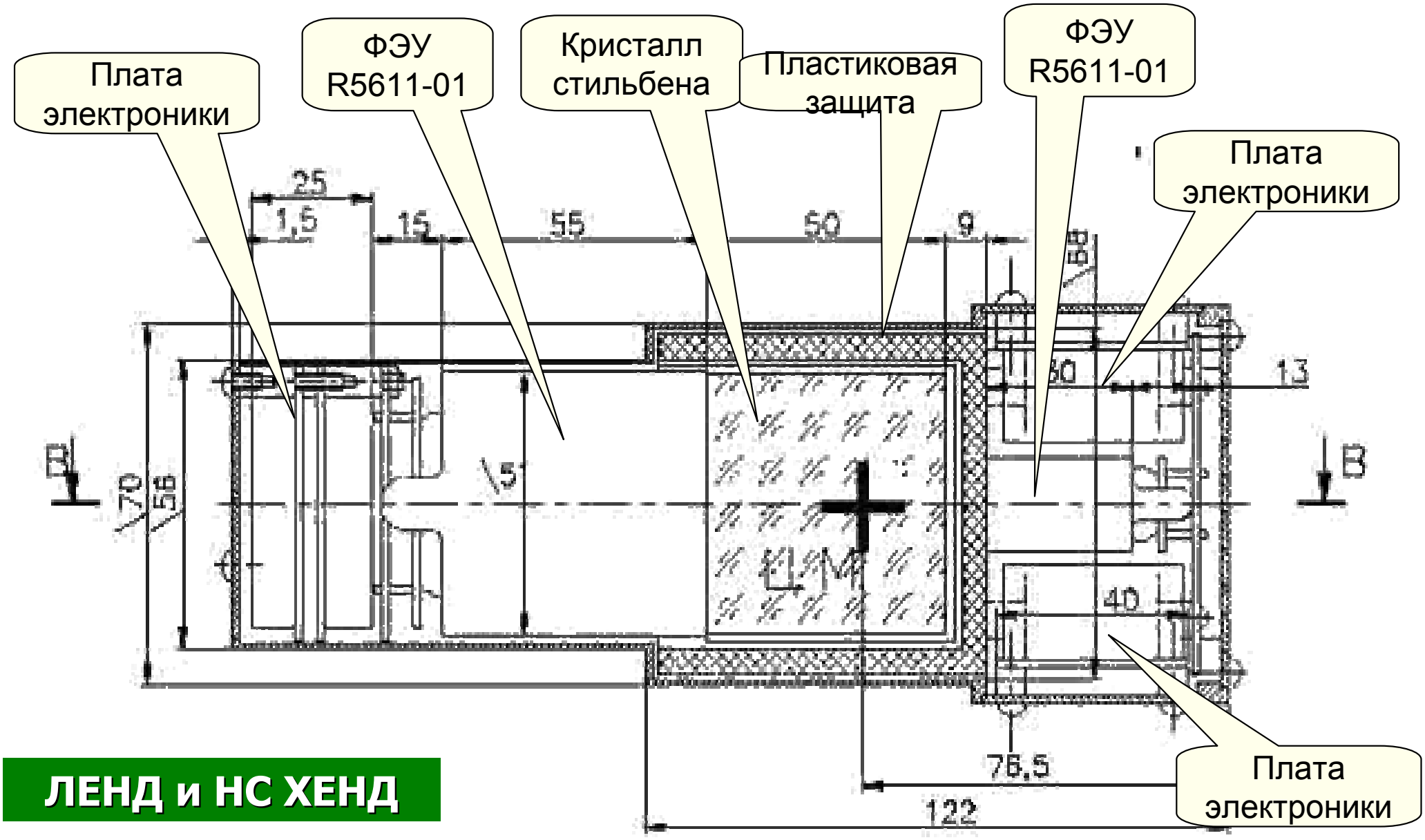
Нейтронный спектрометр прибора МГНС: расположение



МГНС

Нейтронный спектрометр приборов ЛЕНД и НС ХЕНД:

конструкция сцинтиблока



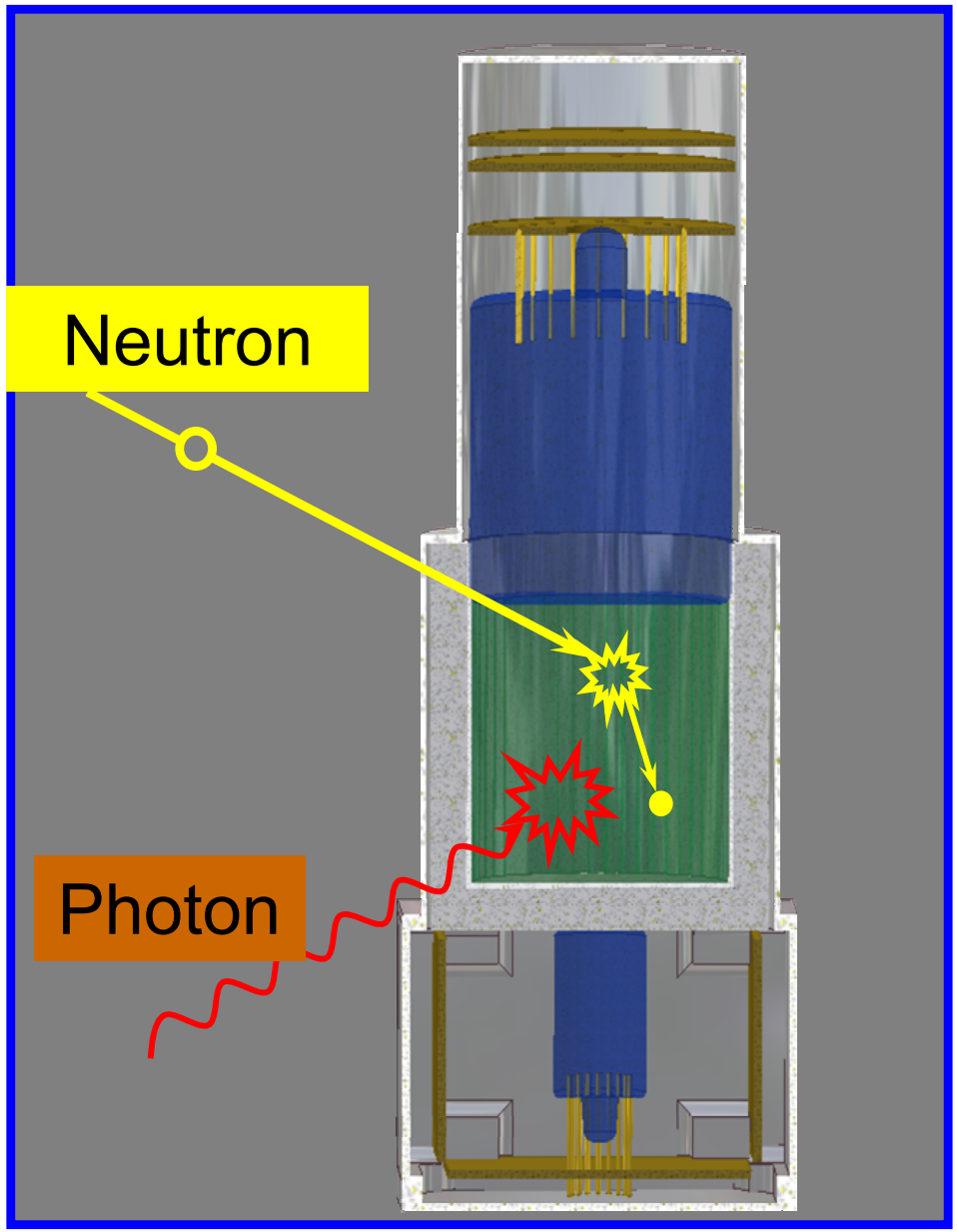
ЛЕНД и НС ХЕНД

Нейтронный спектрометр: пластиковая защита и кристалл стильбена

Антисовпадательная защита из платикогово сцинтиллятора

Кристалл стильбена завернутый в тефлоновую ленту

Нейтронный спектрометр: отклонение фоновых фотонов



Разделение между нейтронными и гамма сигналами осуществляется электронной схемой на основе формы сигналов

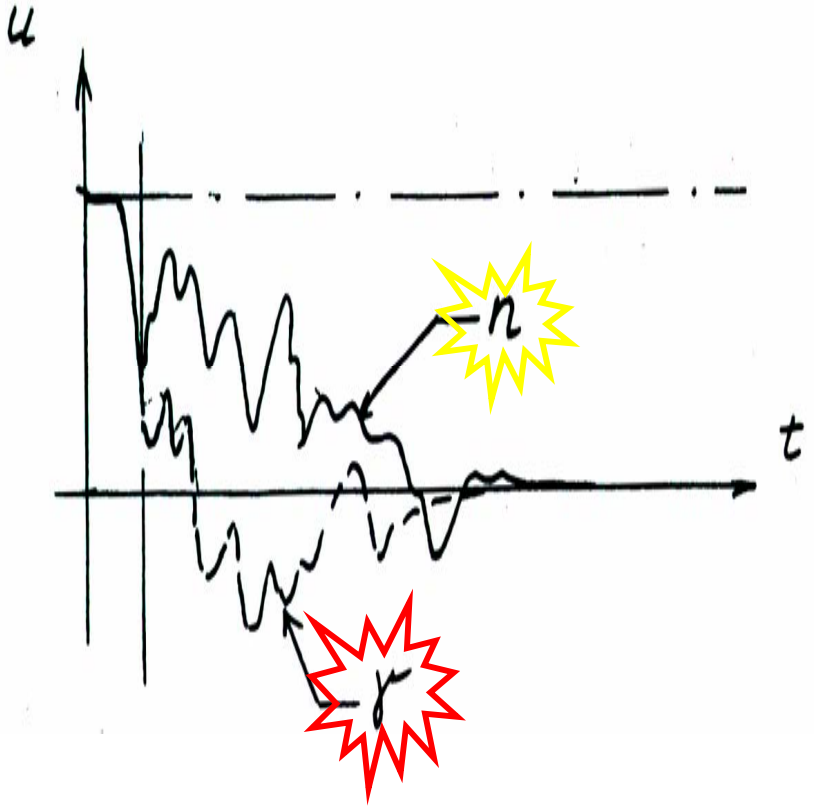
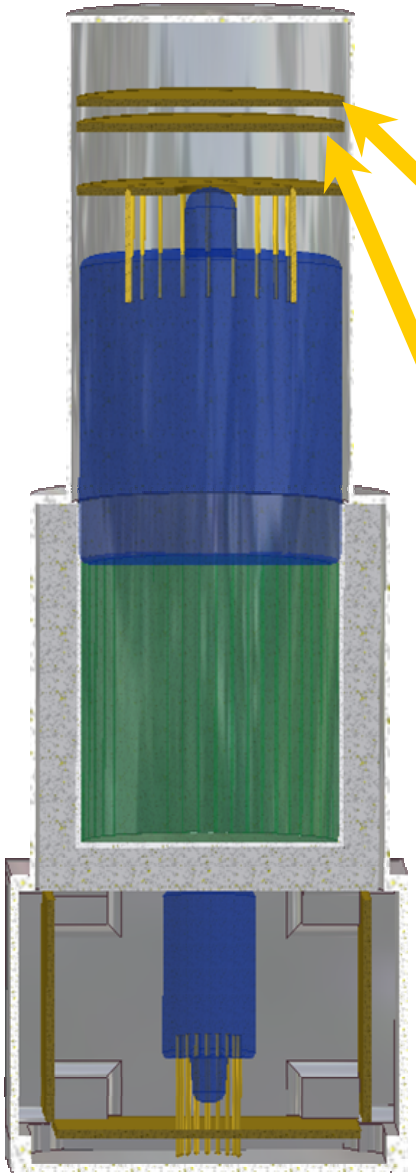
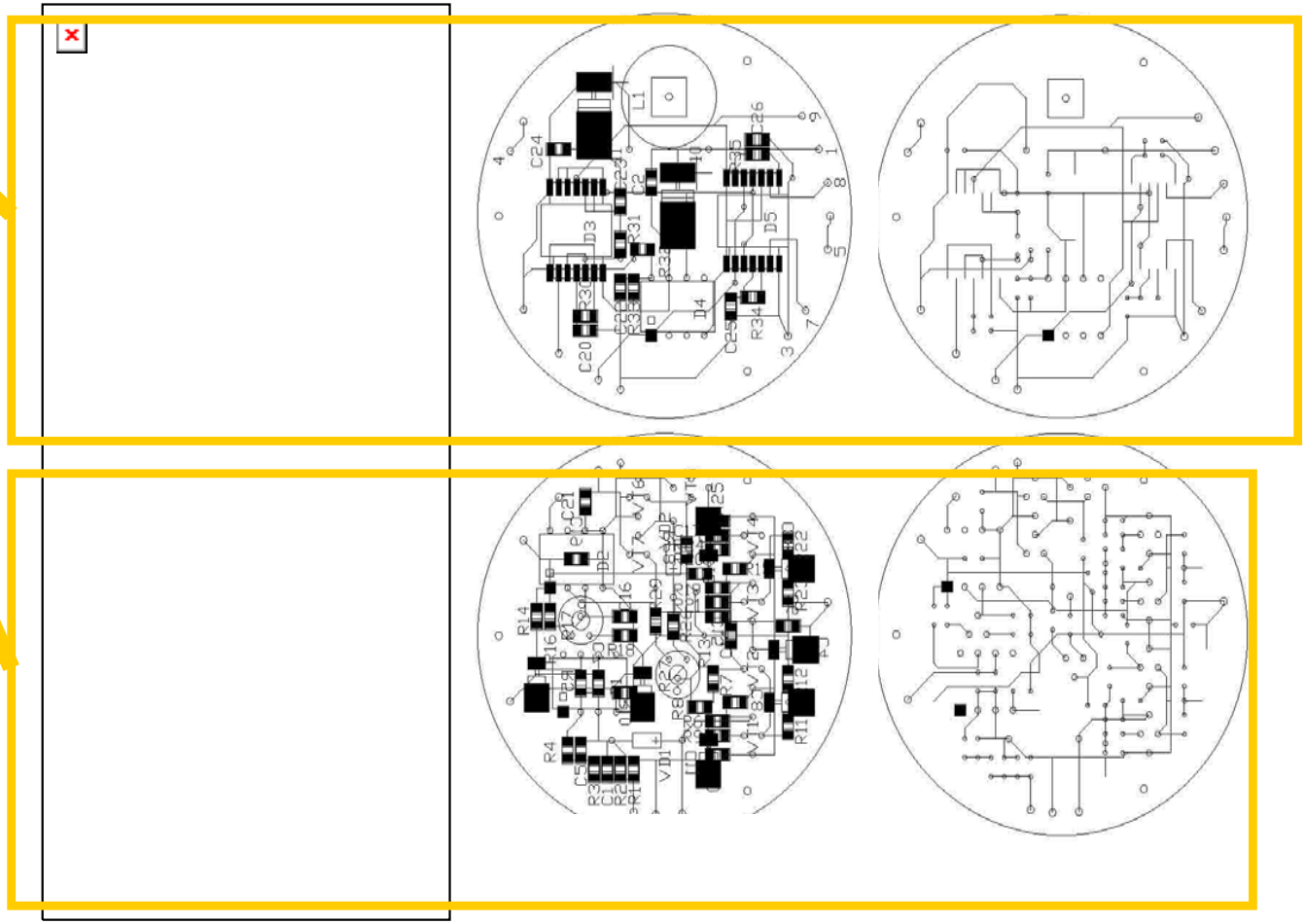


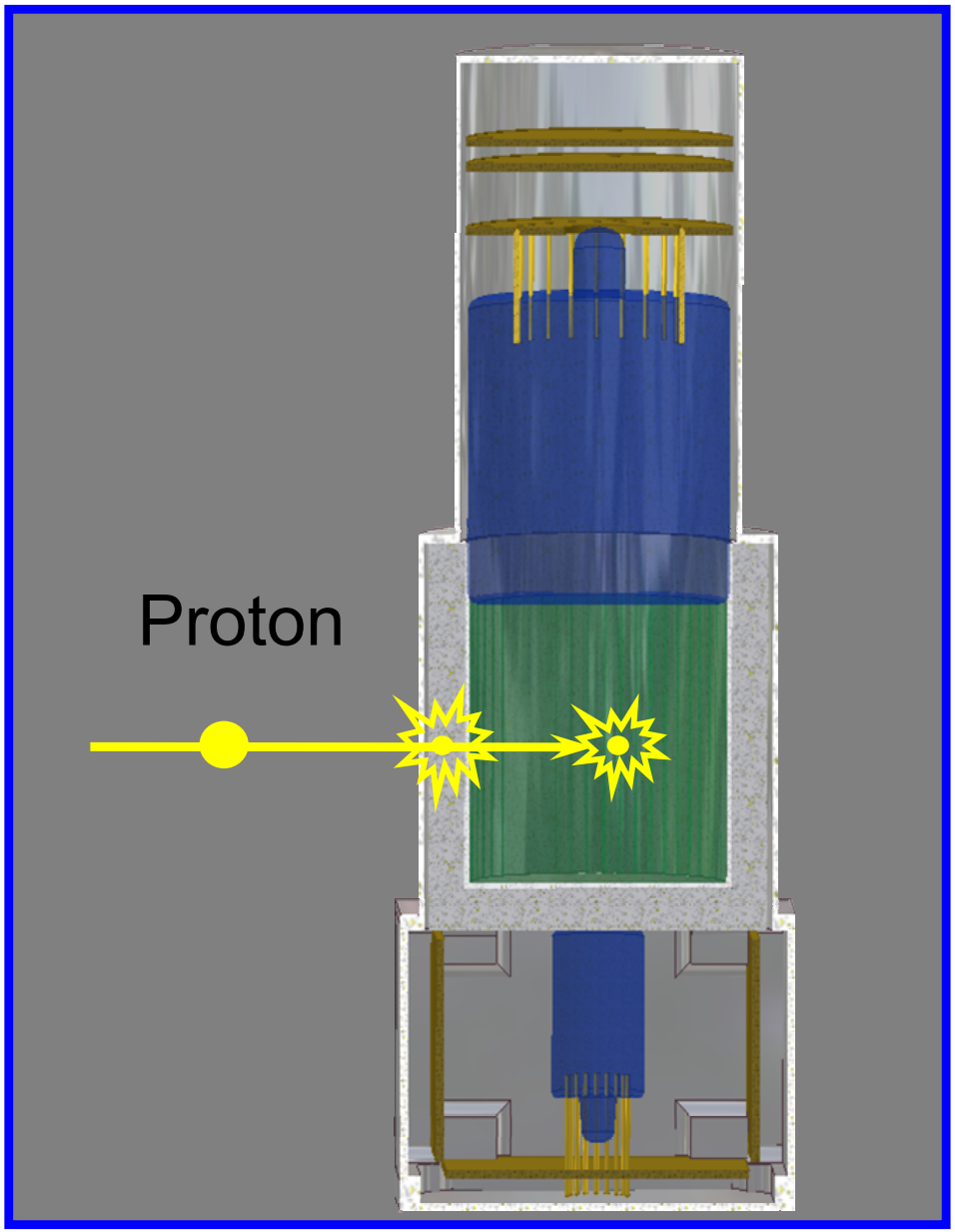
Схема разделения нейтронного и гамма-сигналов:

развока плат





Нейтронный спектрометр: отклонение протонов КЛ



Разделение фоновых протонов космических лучей от протонов отдачи осуществляется с помощью схемы антисовпадения основанной на пластиковом сцинтилляторе, окружающим кристалл стильбена со стороны открытого неба

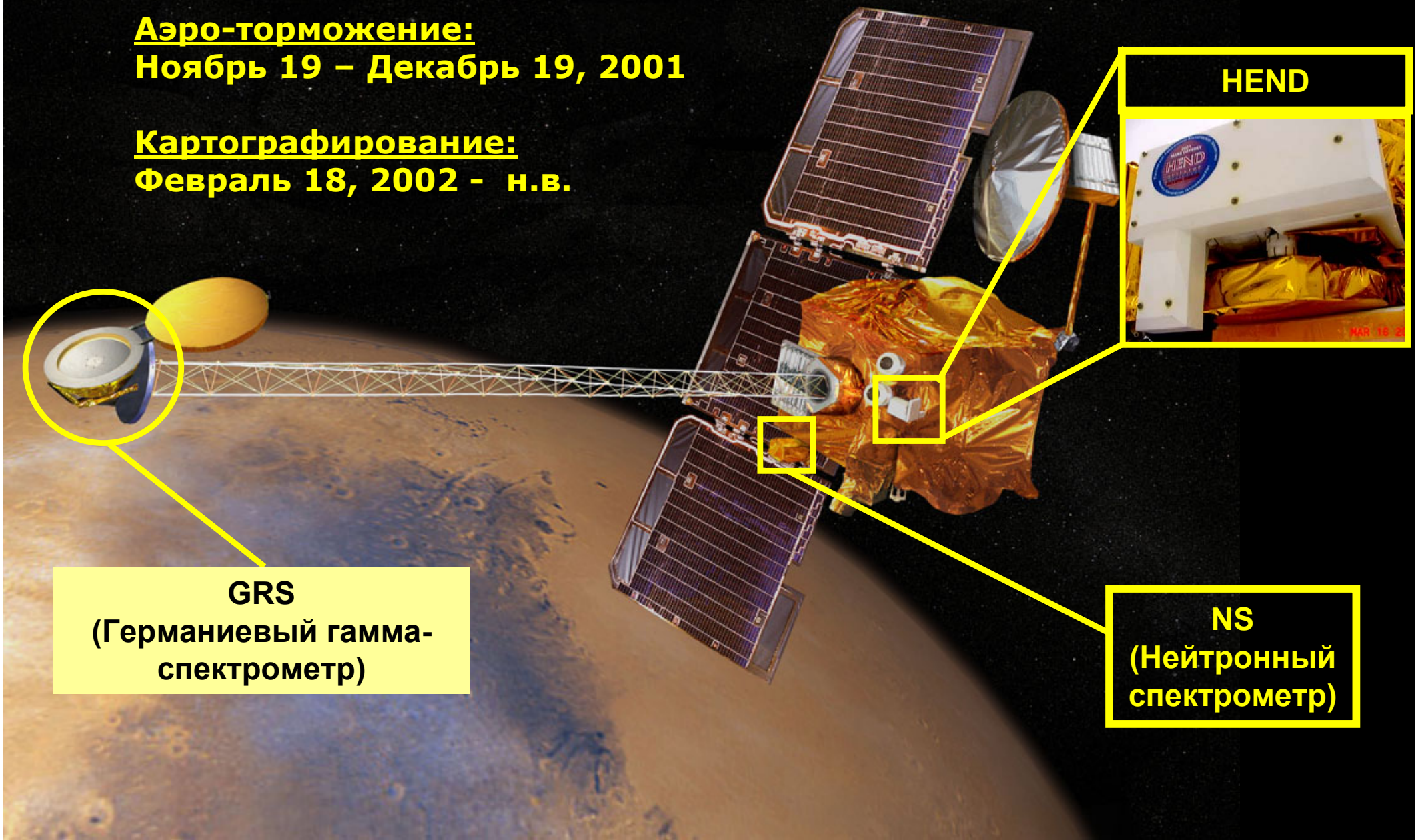
Эксперимент ХЕНД
Основные результаты

2001 Mars Odyssey

Круиз:
Май 2 – Сентябрь 24, 2001

Аэро-торможение:
Ноябрь 19 – Декабрь 19, 2001

Картографирование:
Февраль 18, 2002 - н.в.



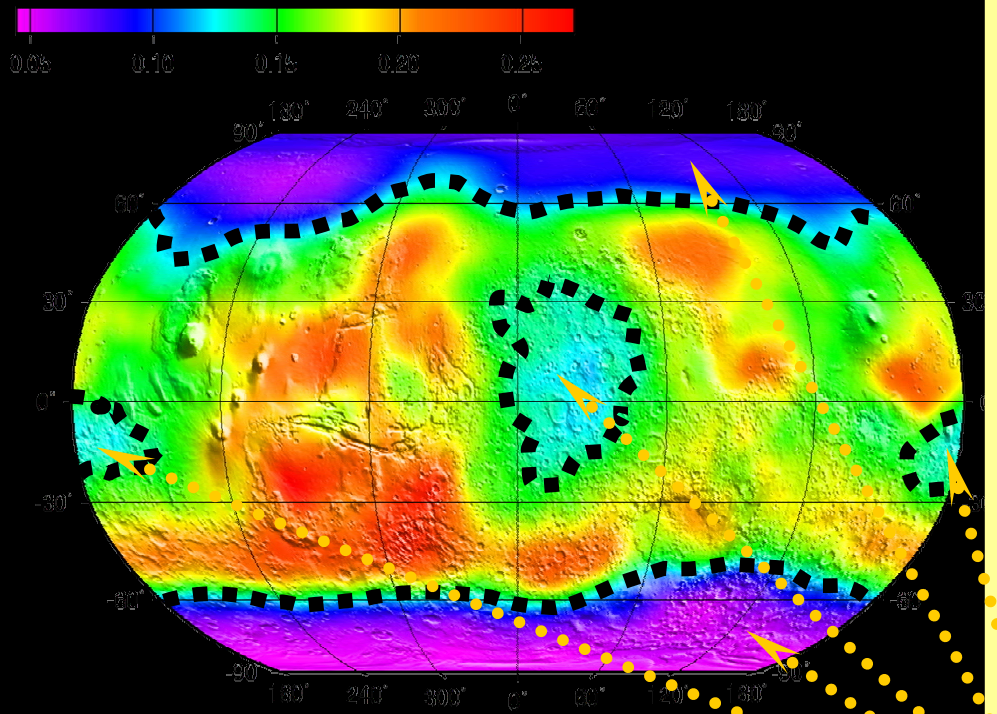
HEND

GRS
(Германиевый гамма-спектрометр)

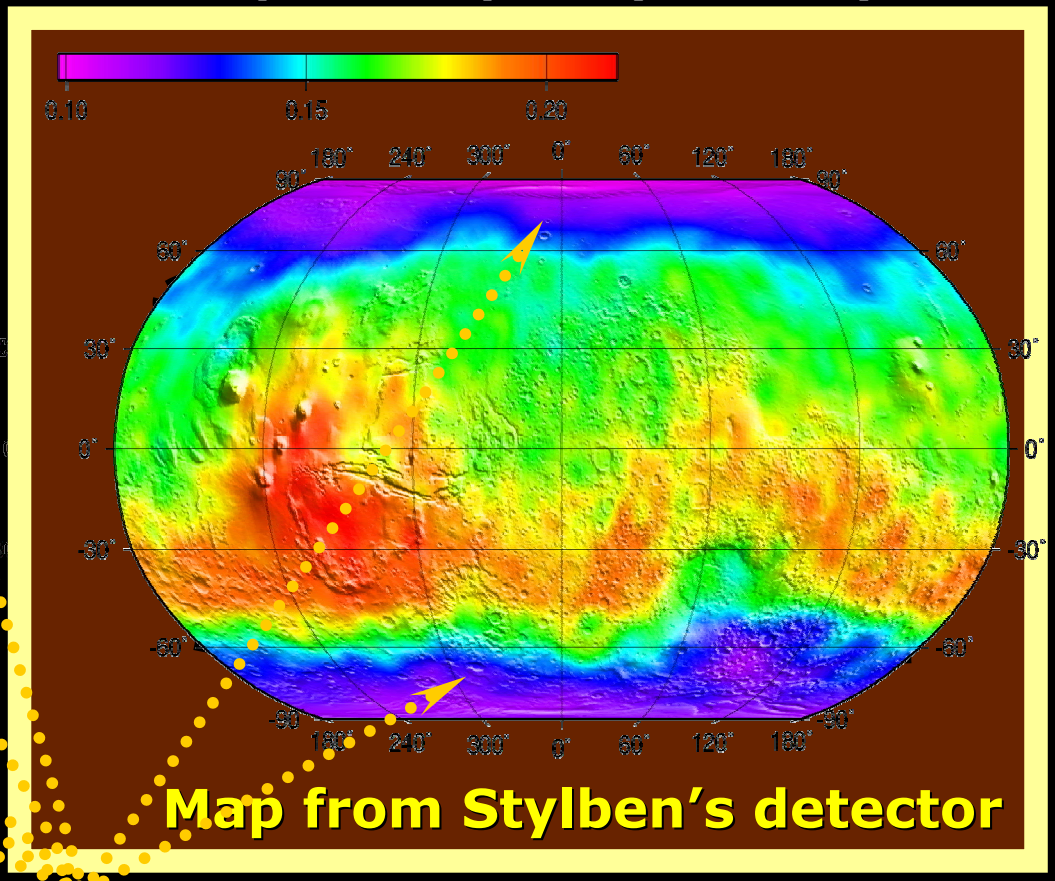
NS
(Нейтронный спектрометр)

НАБЛЮДЕНИЕ НЕЙТРОННОГО АЛЬБЕДО МАРСА В РАЗНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ДИАПАЗОНАХ

Эпитепловые нейтроны



Быстрые нейтроны (E>2 MeV)



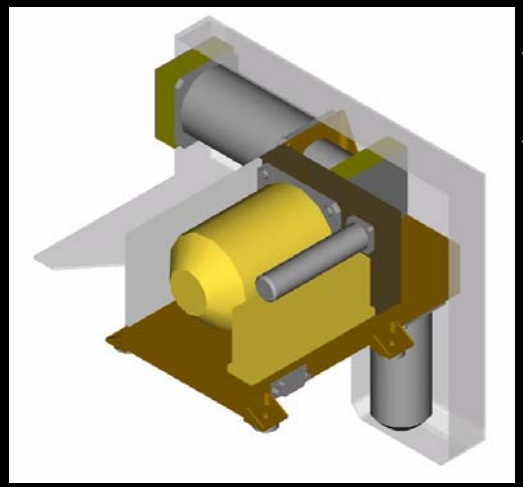
Водосодержащие области

Models testing machine

$$\chi^2 = \sum_{i=1-5} \frac{(C_i - M_i)^2}{\sigma_i^2}$$

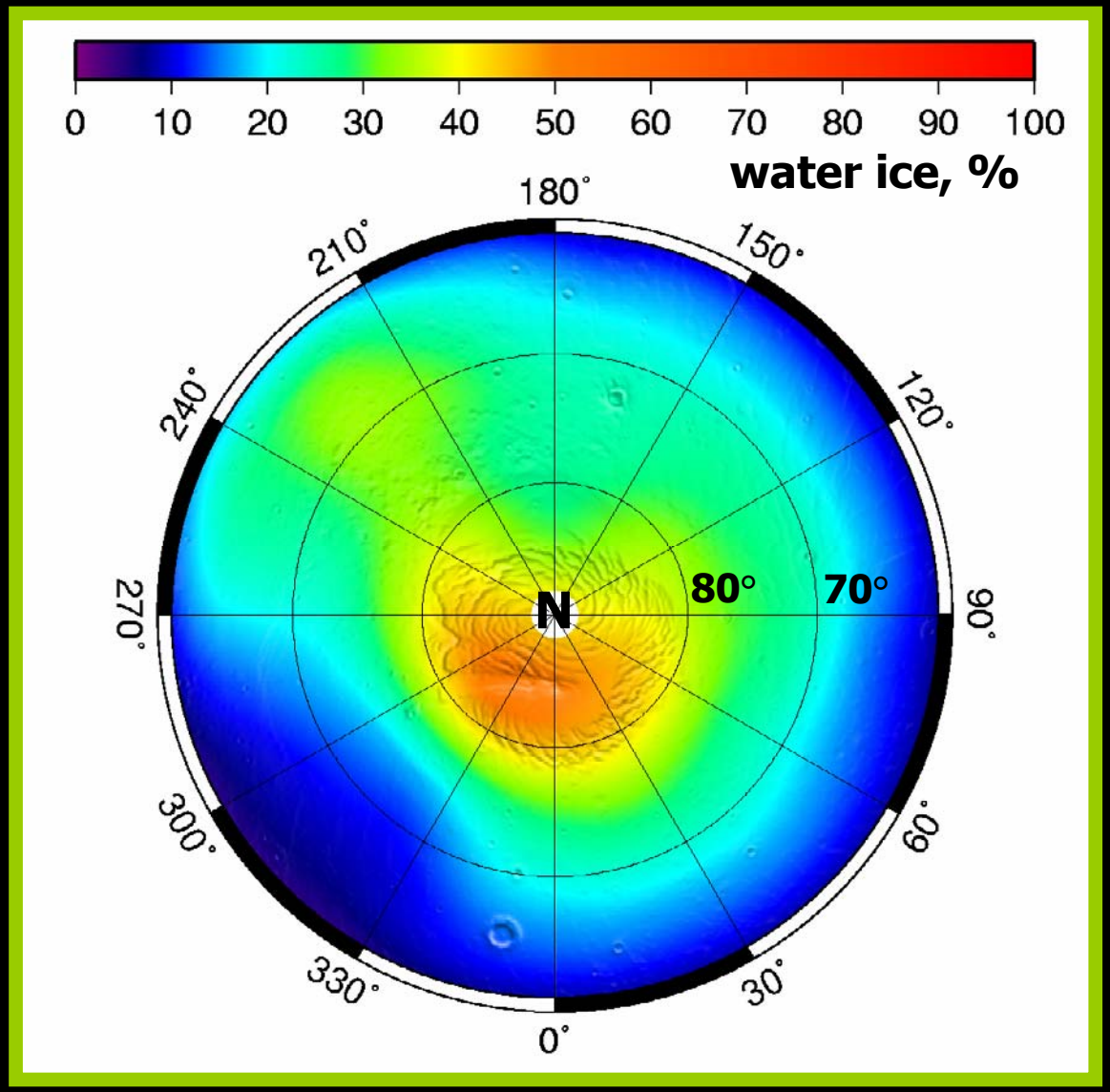
(C_i , σ_i^2)

(M_i)

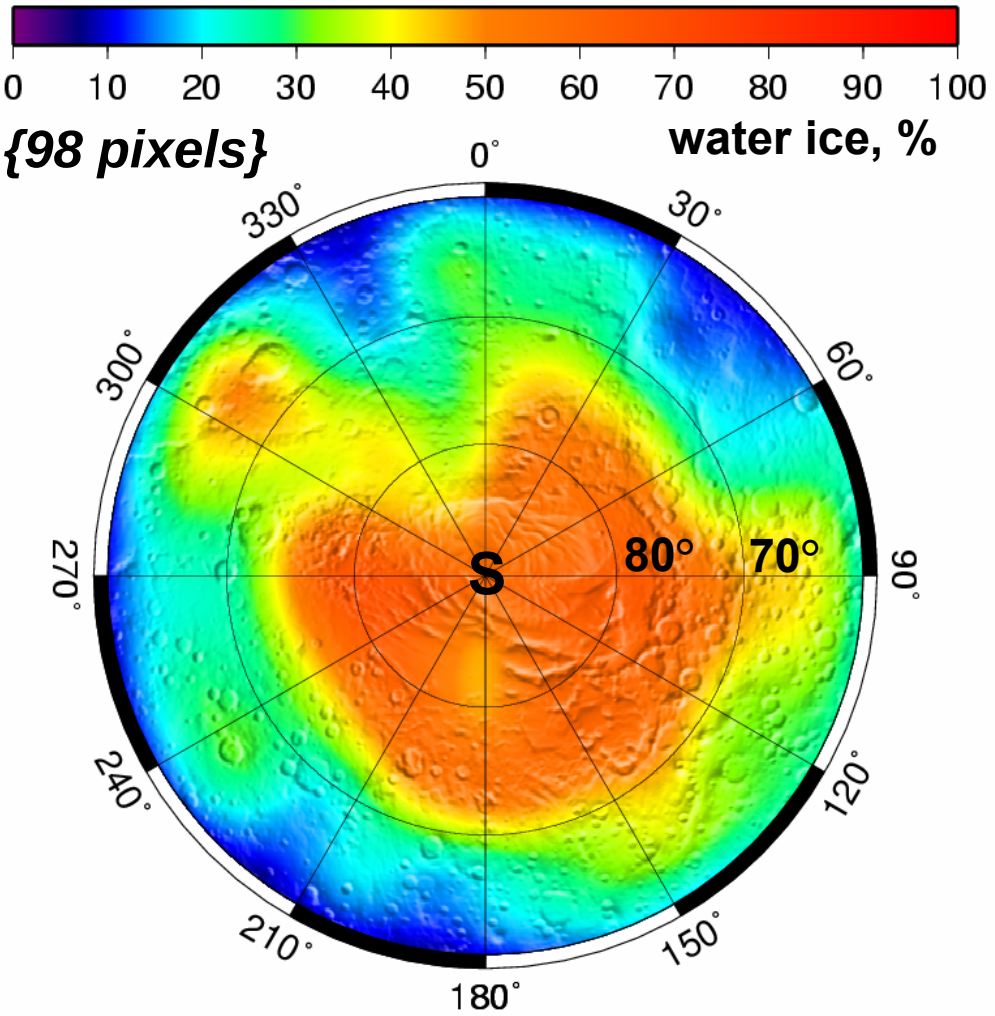


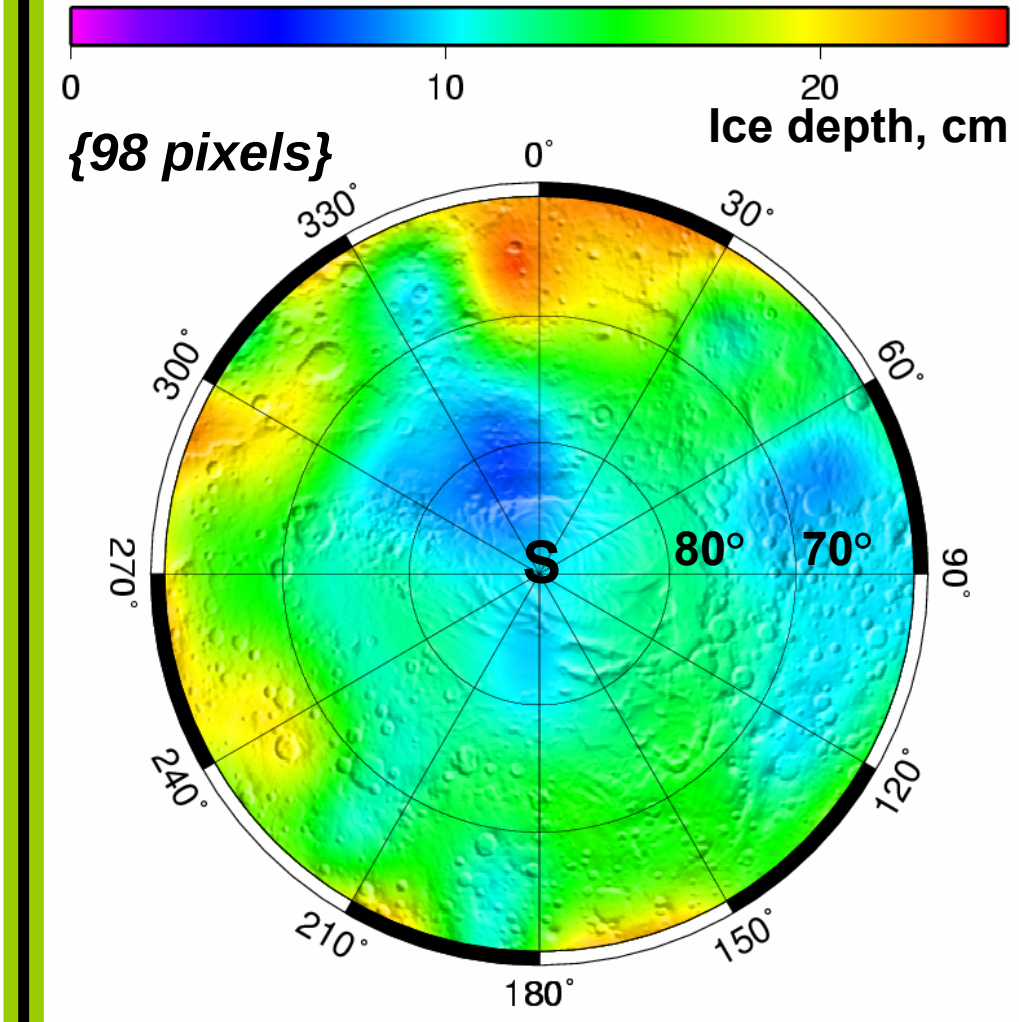
Testing model & MCNPX code

Северная полярная область

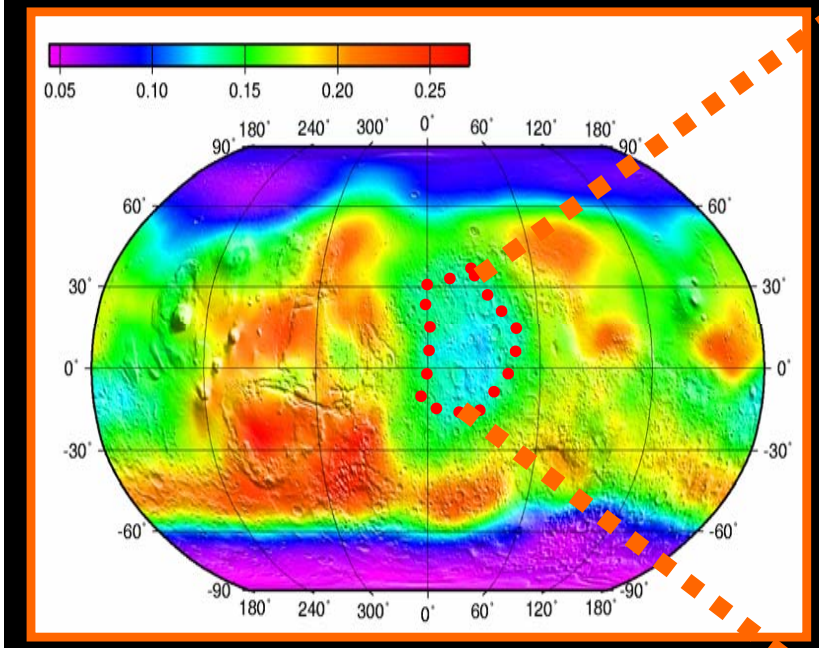


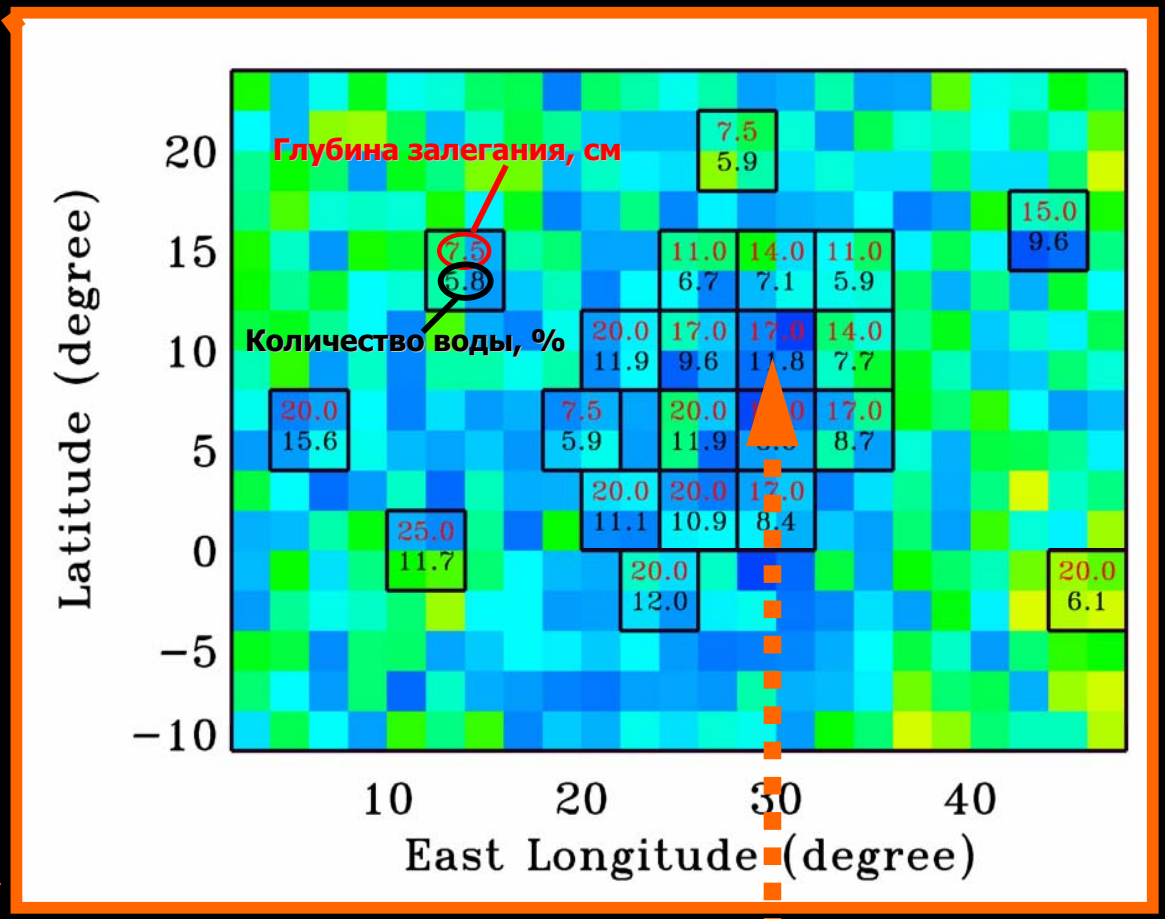
Южная полярная область





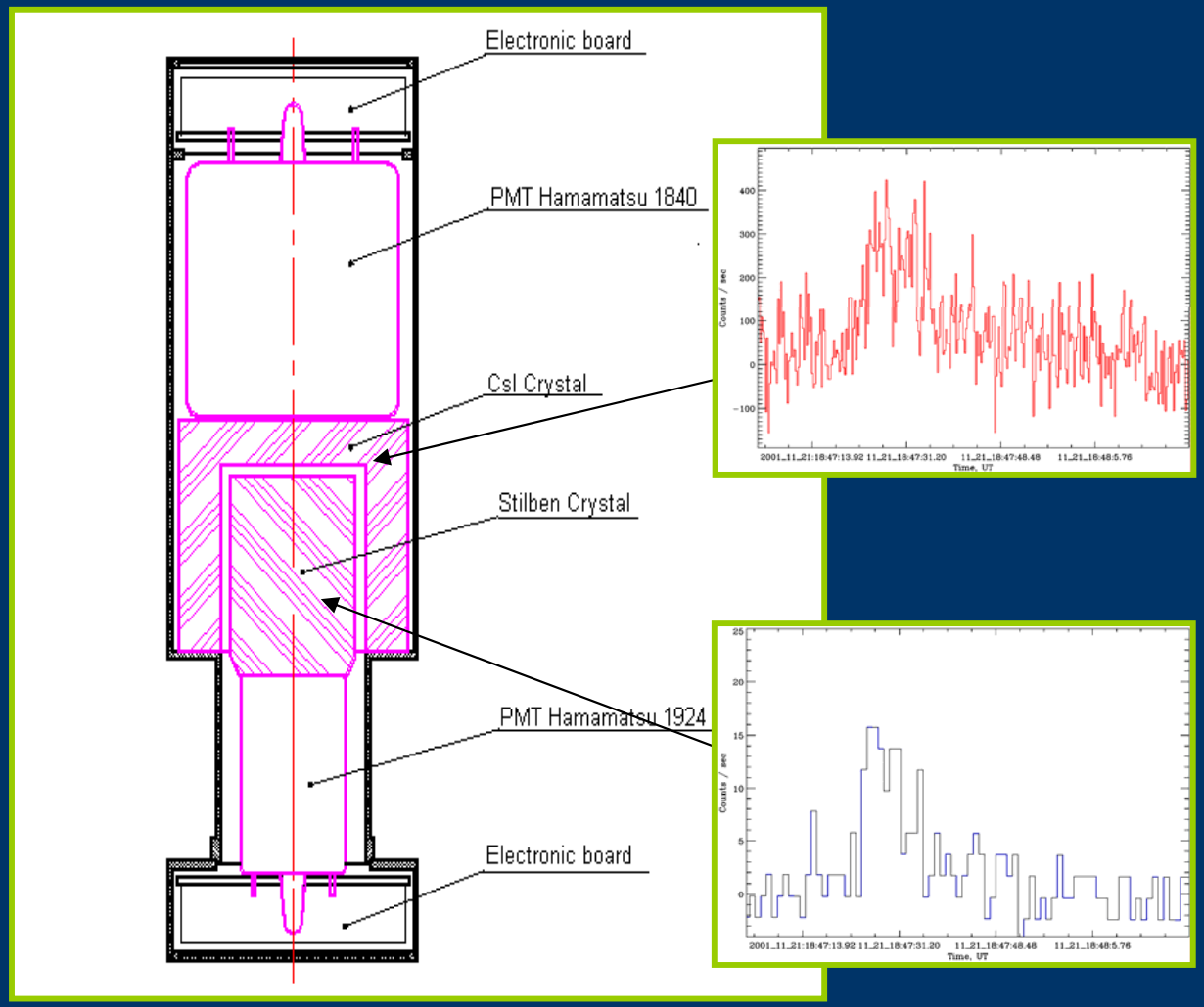
Экваториальные районы Марса





Содержание воды > 12%

Гамма-детекторы прибора HEND



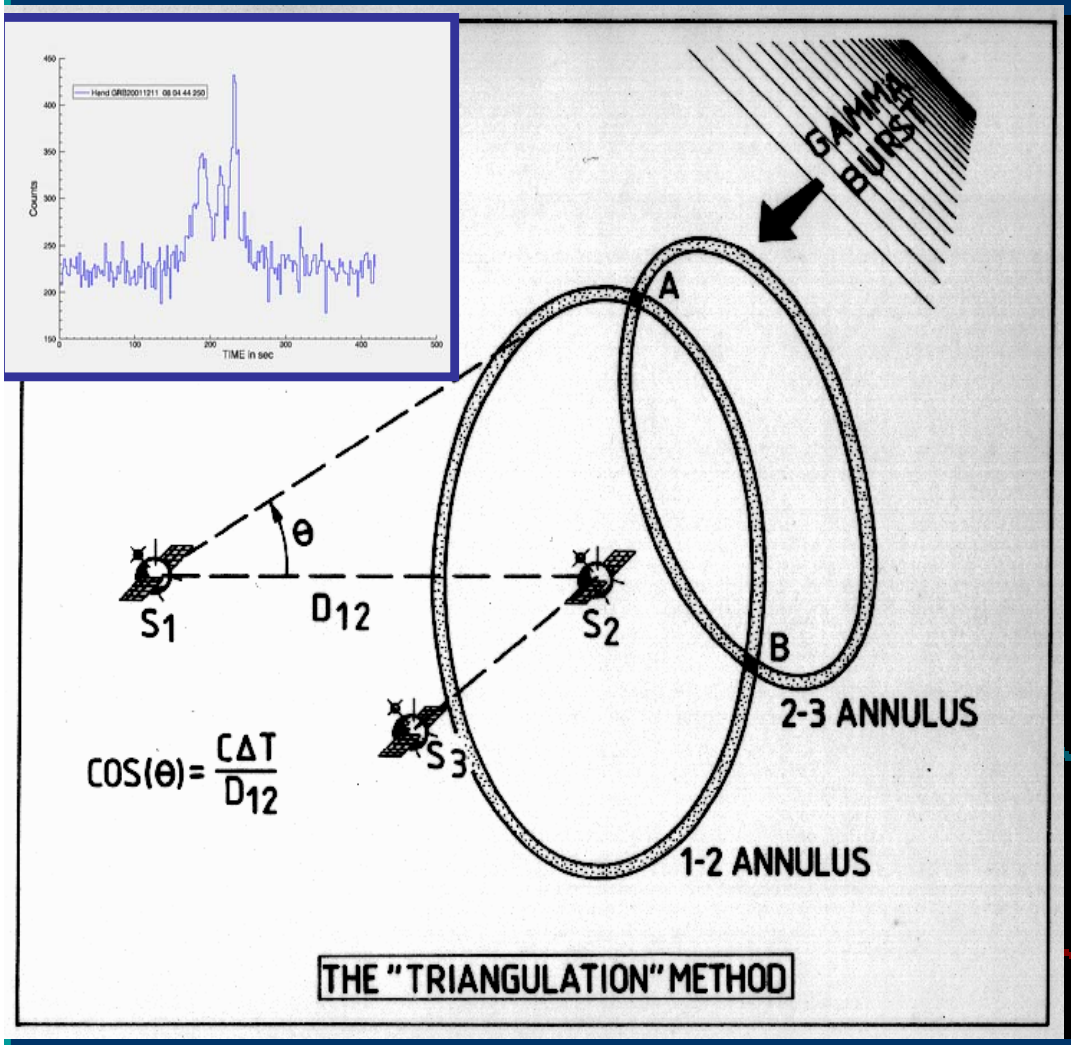
Размер кристалла CsI:
- **высота 5,5 см**
- **внешний диаметр 5,5 см**
- **толщина стенки 1 cm**

Временное разрешение:
0,25 с, 1 с

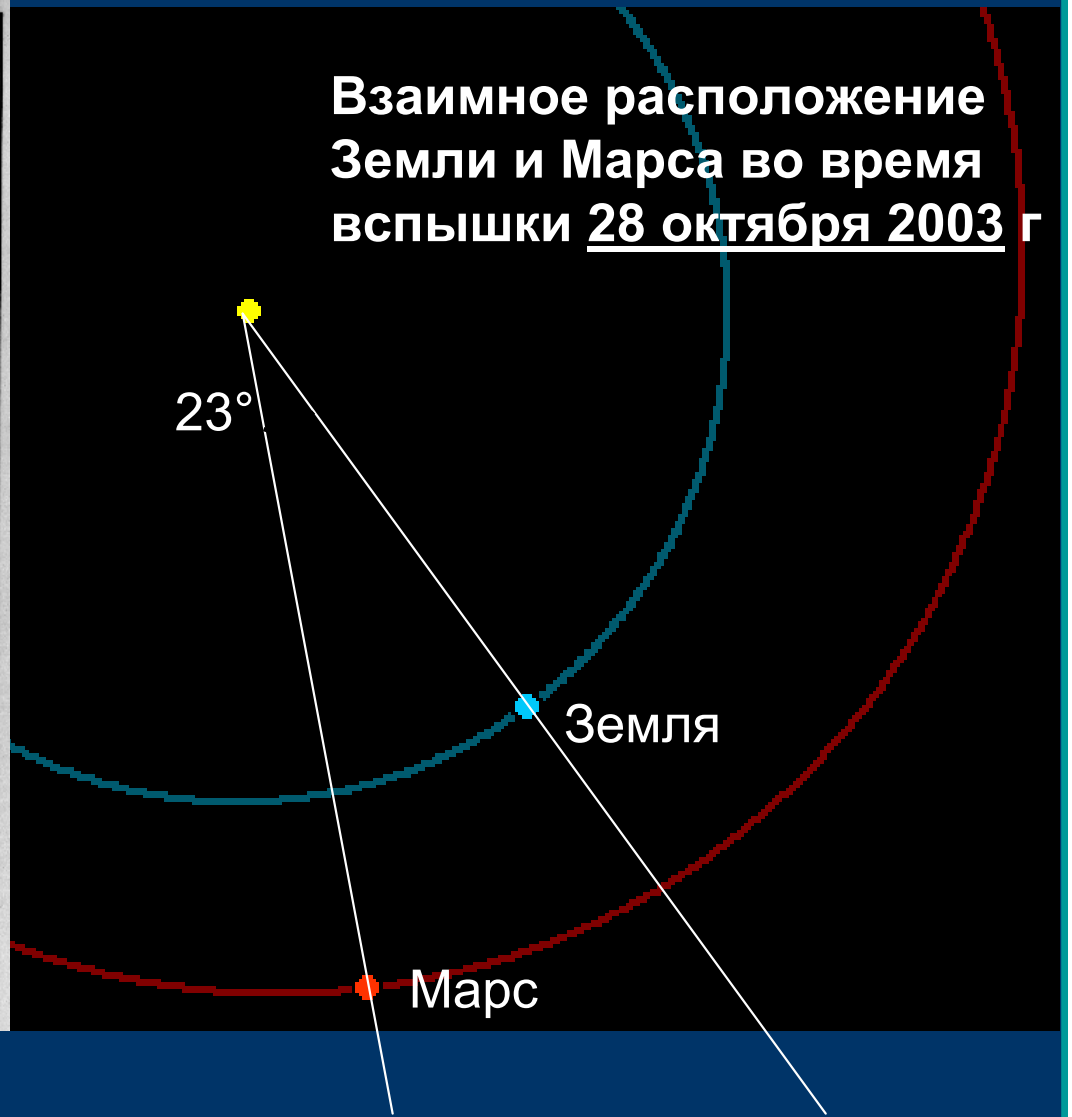
Энергетический диапазон:
30 кэВ – 1 МэВ (0,25 с)
60 кэВ – 2 МэВ (1 с)
в 16 энергетических каналах

Непрерывная дорожка данных

Мониторирование космических гамма-всплесков для их последующей локализации



Стереоскопическое наблюдение солнечных вспышек

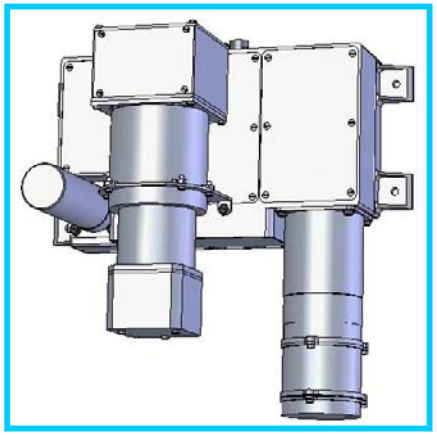


Применение сцинтилляционных гамма-детекторов

Нейтронный спектрометр

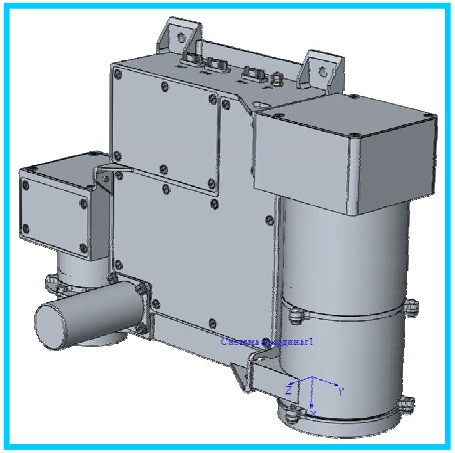
+

Гамма-спектрометр



НС ХЕНД

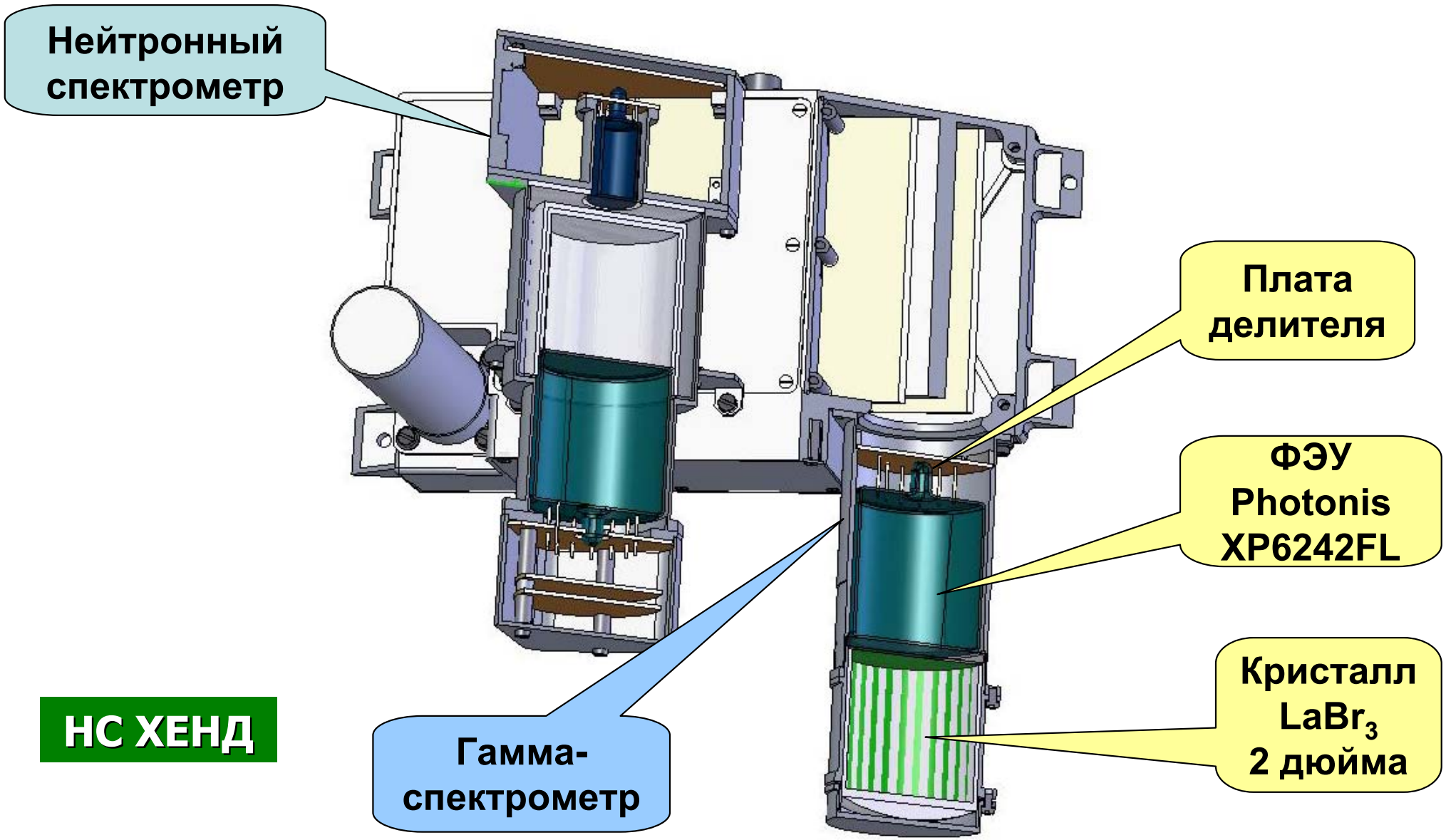
Начало: 2002
Запуск: Октябрь 2009
Начало научных измерений: 2010



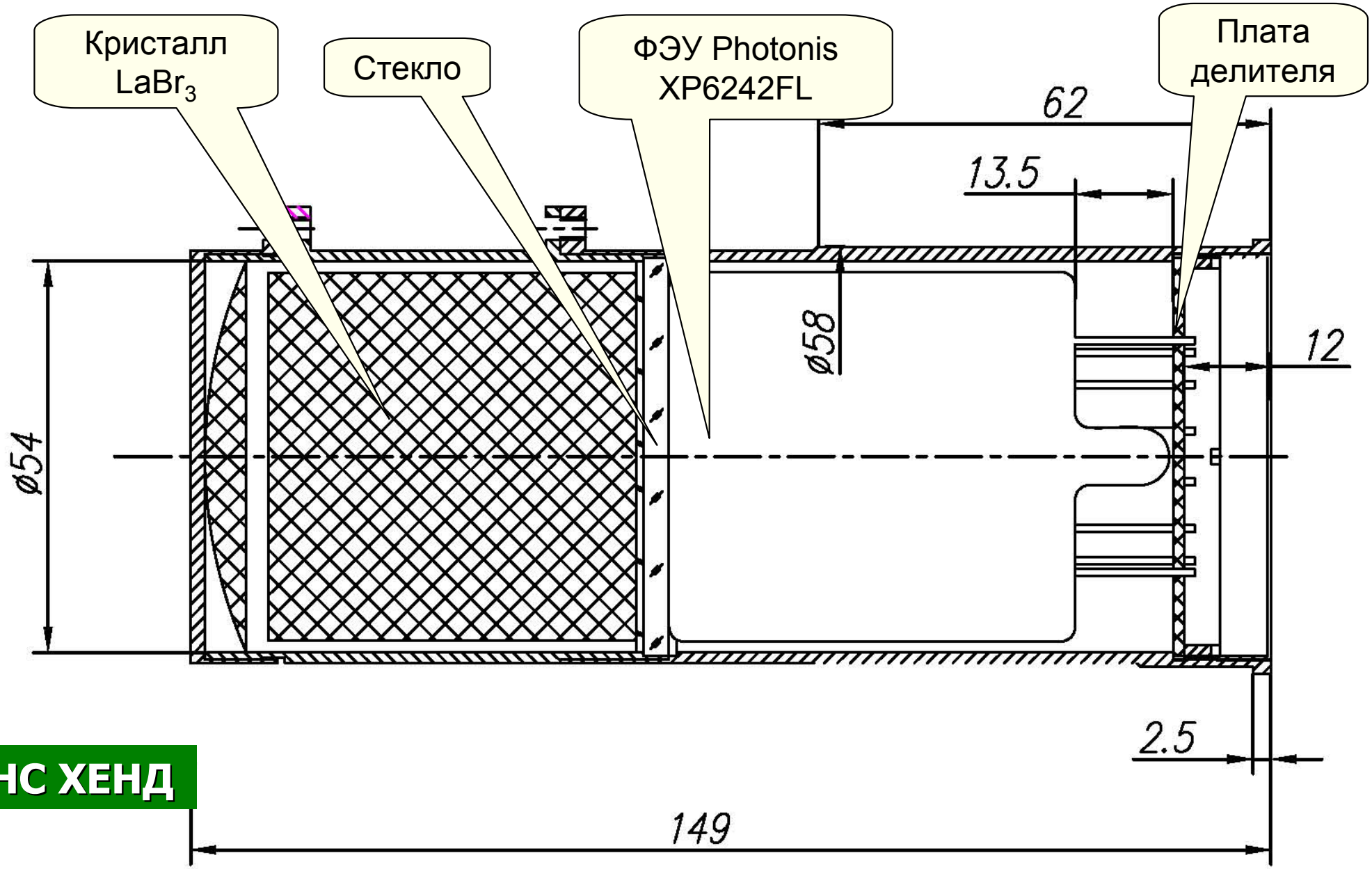
МГНС

Начало: 2002
Запуск август 2014
Начало научных измерений: 2020

Гамма-спектрометр прибора НС ХЕНД: расположение сцинтиблока



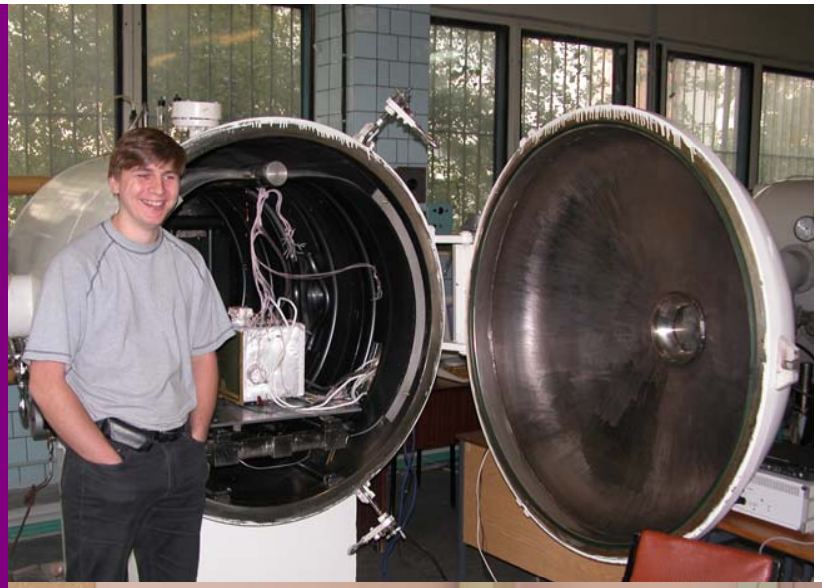
Гамма-спектрометр прибора НС ХЕНД: конструкция сцинтиблока



НС ХЕНД

Гамма-спектрометр прибора НС ХЕНД: механические и климатические испытания

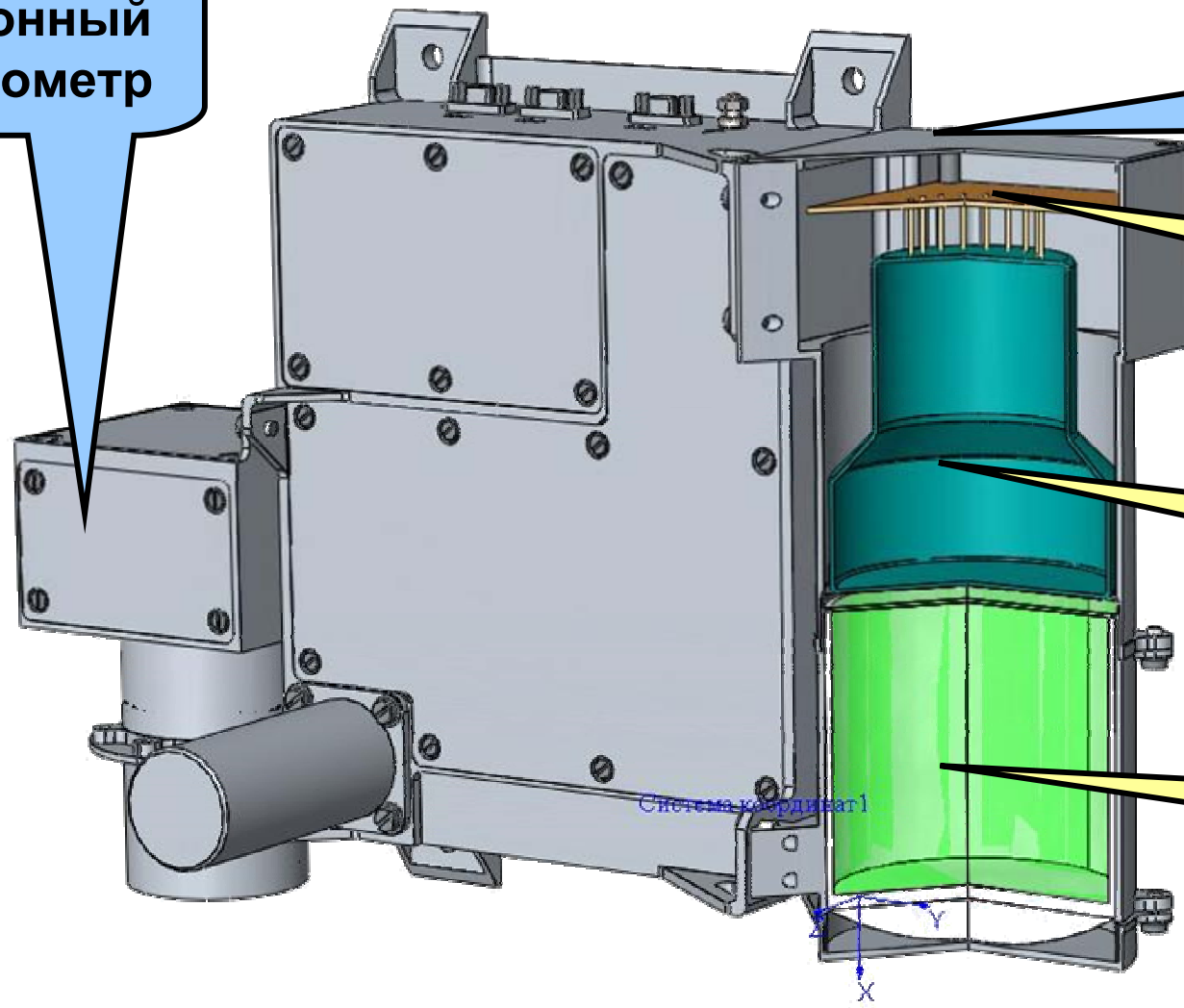
КЛИМАТИКА



МЕХАНИКА

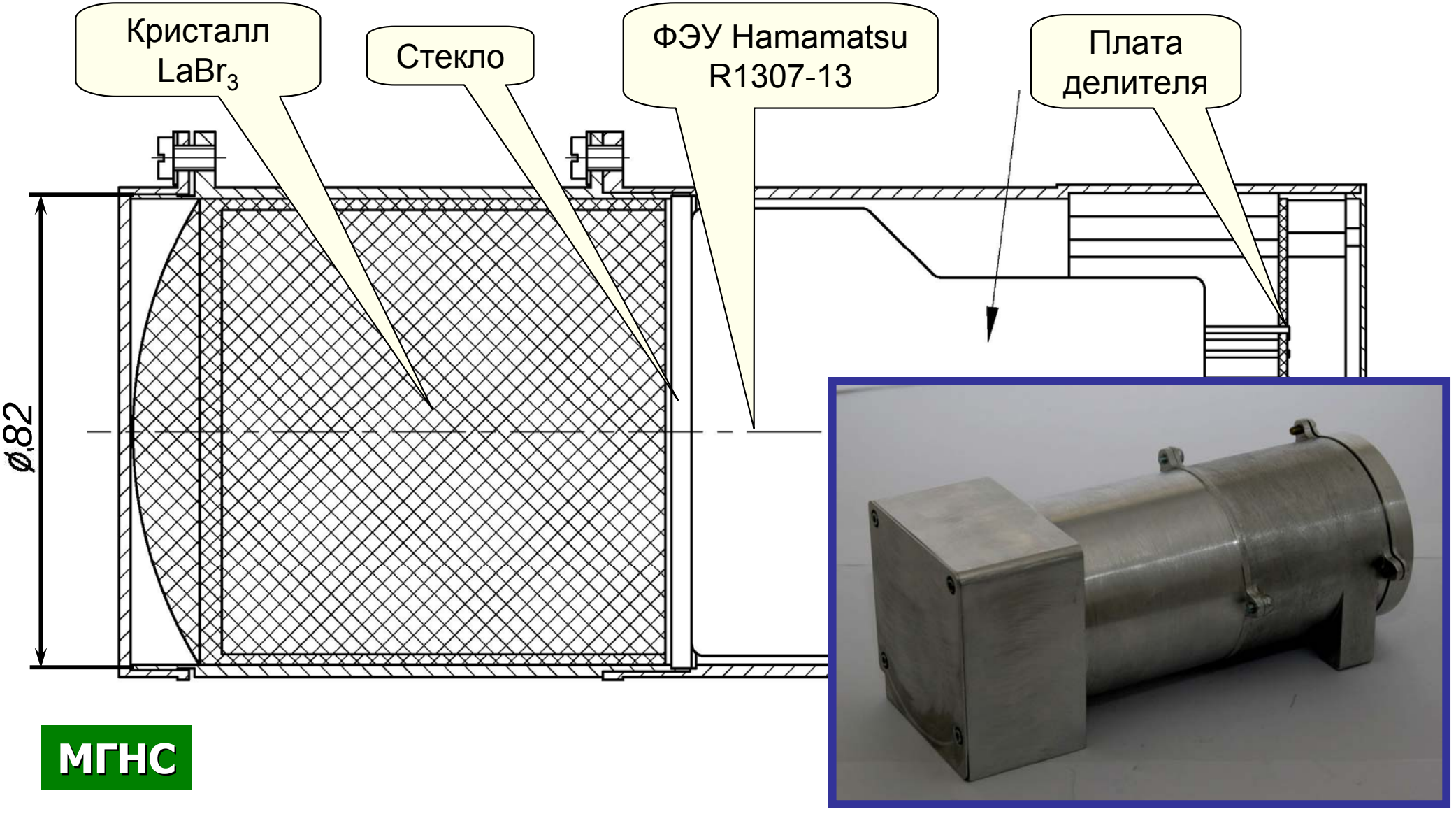
В октябре 2008 г. сцинтиблок гамма-спектрометра НС ХЕНД на основе кристалла $LaBr_3$ успешно прошел испытания на механические (удар и вибрация) и климатическое воздействия.

Гамма-спектрометр прибора МГНС: расположение сцинтиблока



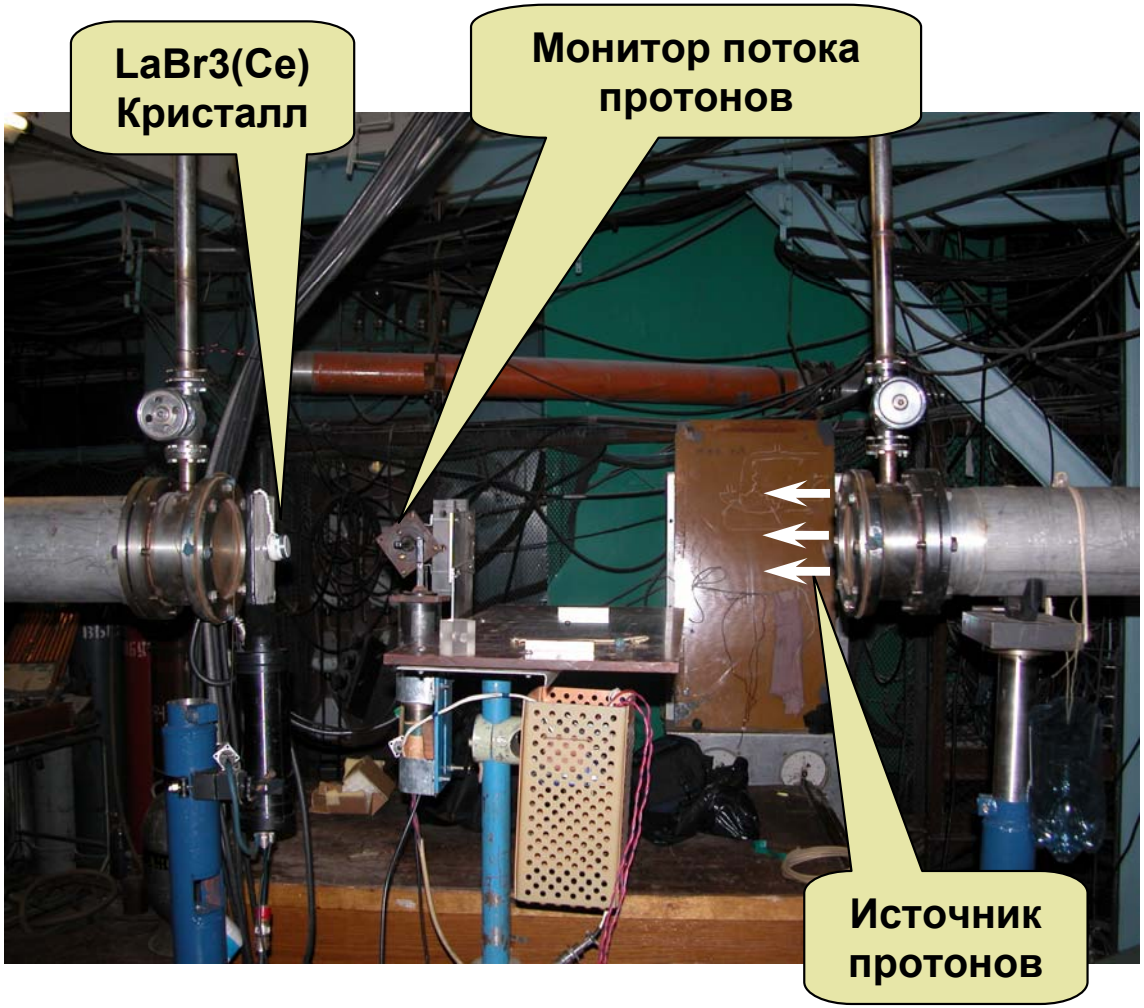
МГНС

Гамма-спектрометр прибора МГНС: конструкция сцинтиблока



МГНС

Гамма-спектрометр прибора МГНС: испытания на радиационную стойкость

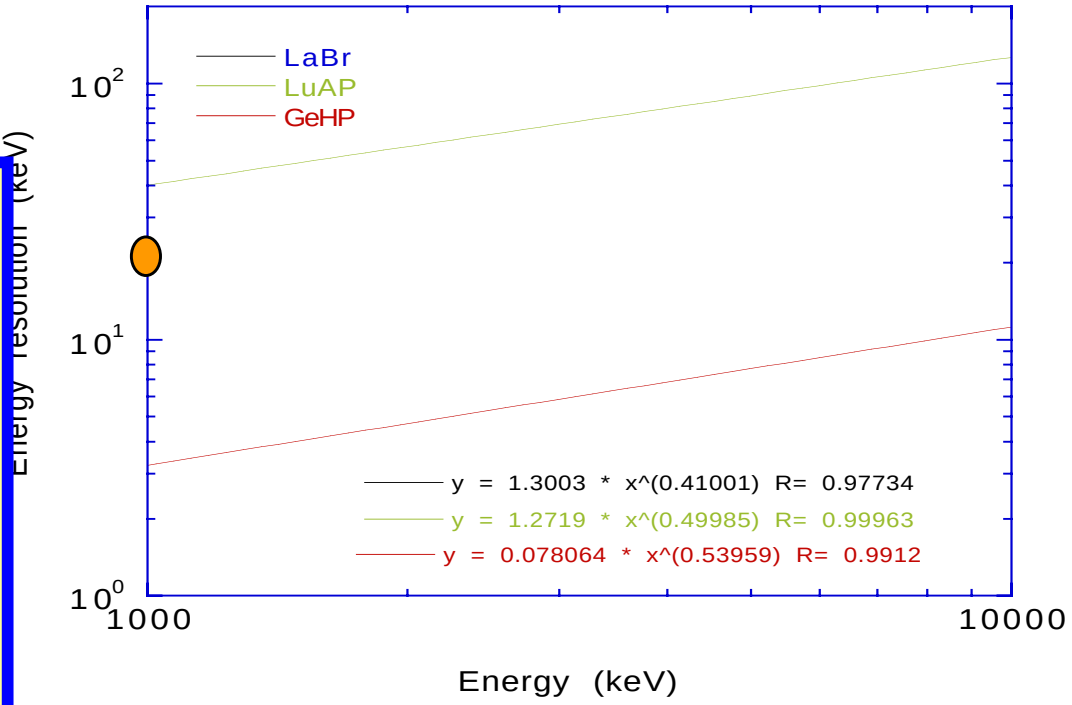


Испытания на радиационную стойкость кристалла $LaBr_3$ по отношению к частицам высокой энергии прошли успешно и кристалл был признан годным для использования в межпланетных миссиях в течении длительного времени.

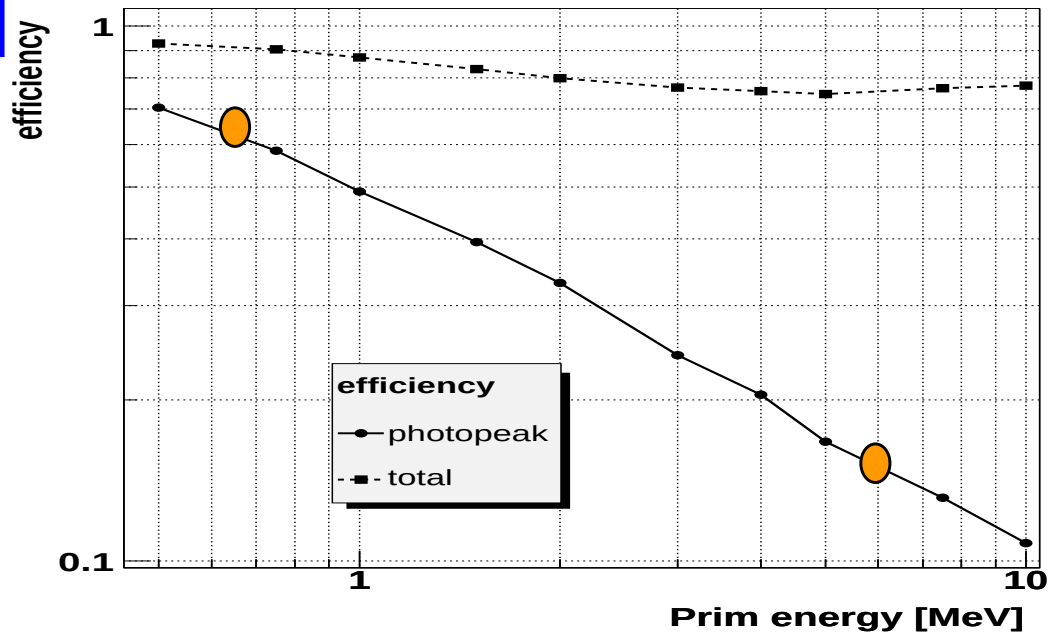
Radiation test of $LaBr_3$ crystal: successfully completed

Численное моделирование эффективности регистрации и энергетическог о разрешения для кристалла $LaBr_3$

(Оувенс и др).



$LaBr_3$



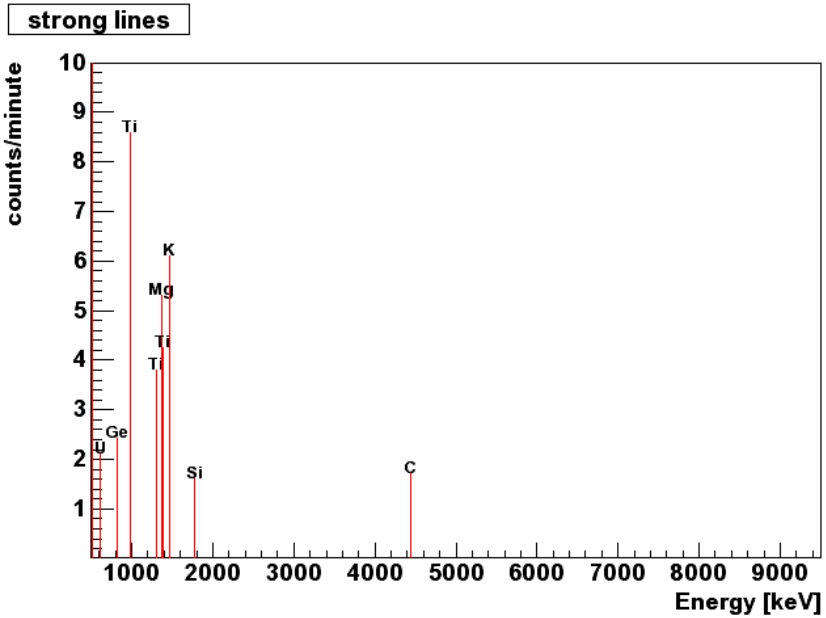
300 cm^2

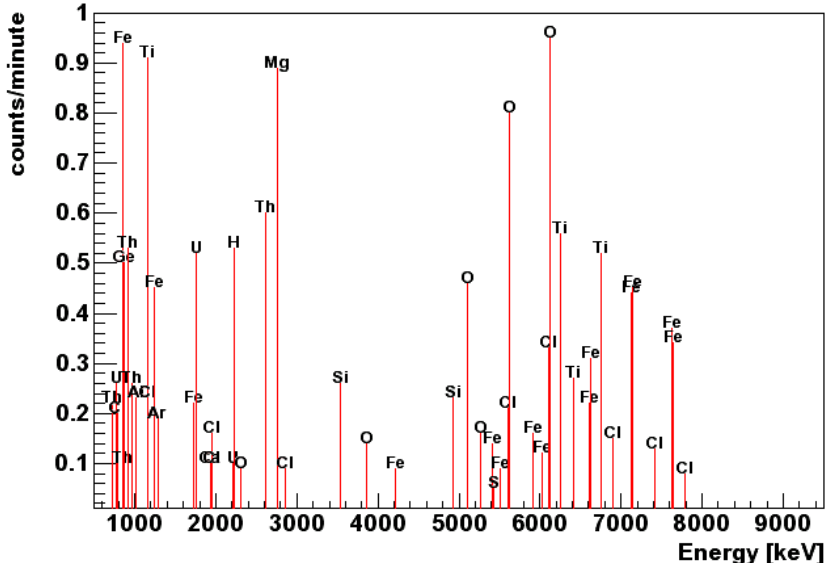
≈ 8 cm

Гамма-спектрометр прибора МГНС: расчет интенсивности линий

Яркие линии

Слабые линии

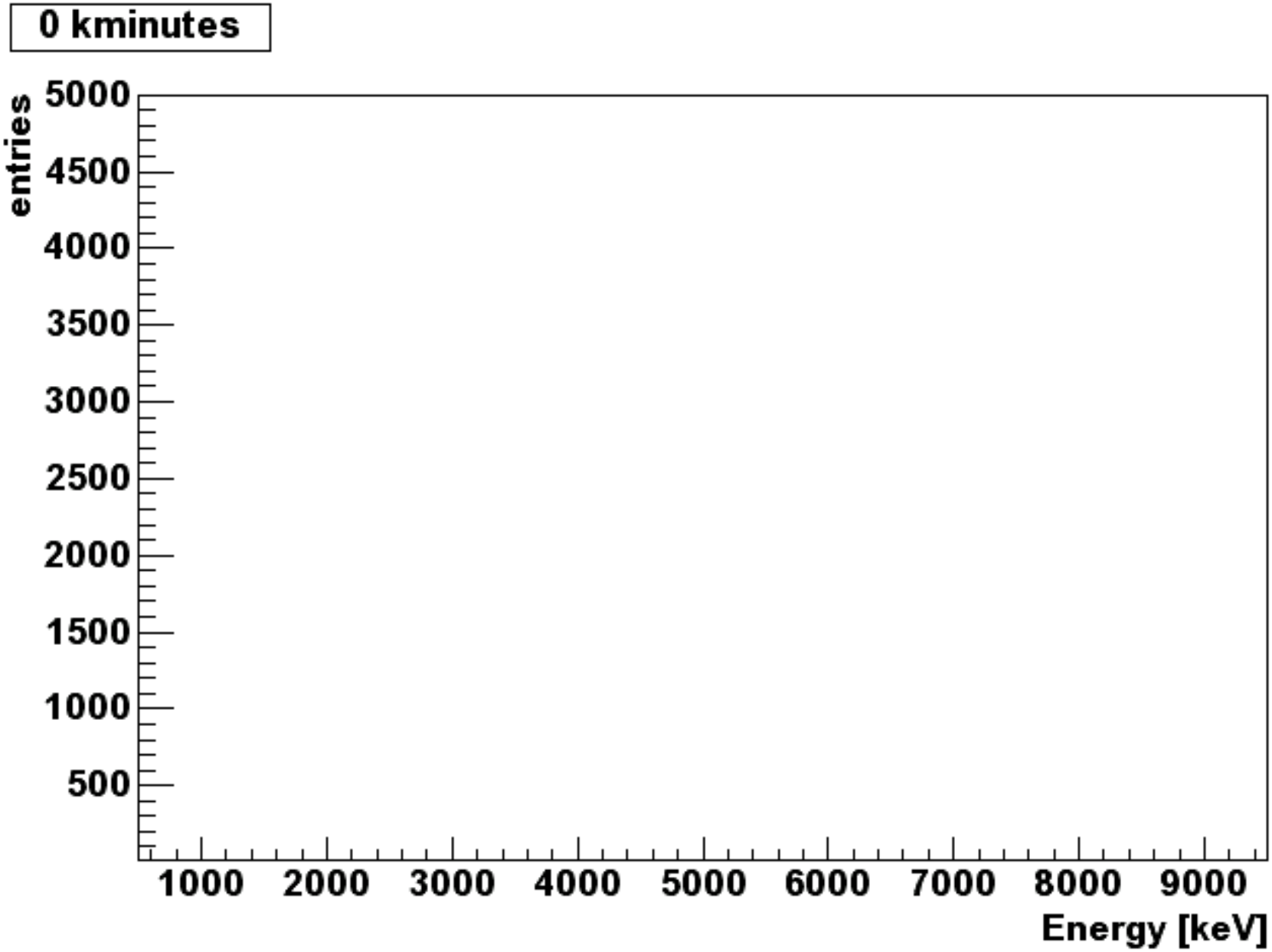




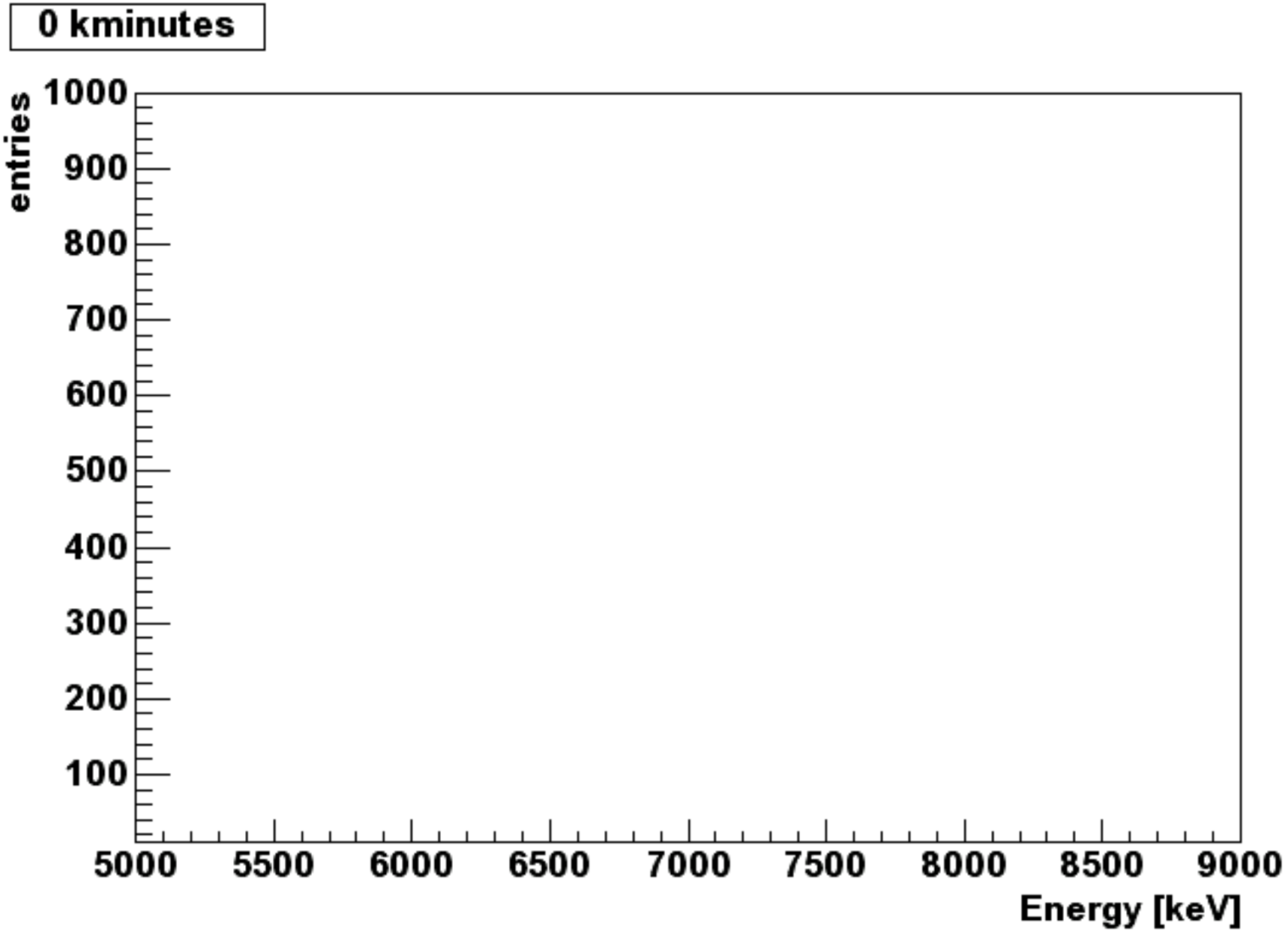
Расчет интенсивности гамма-линий основных породообразующих элементов поверхности Меркурия на высоте орбиты космического аппарата МПО БепиКоломбо. (А. Овенс и др.)

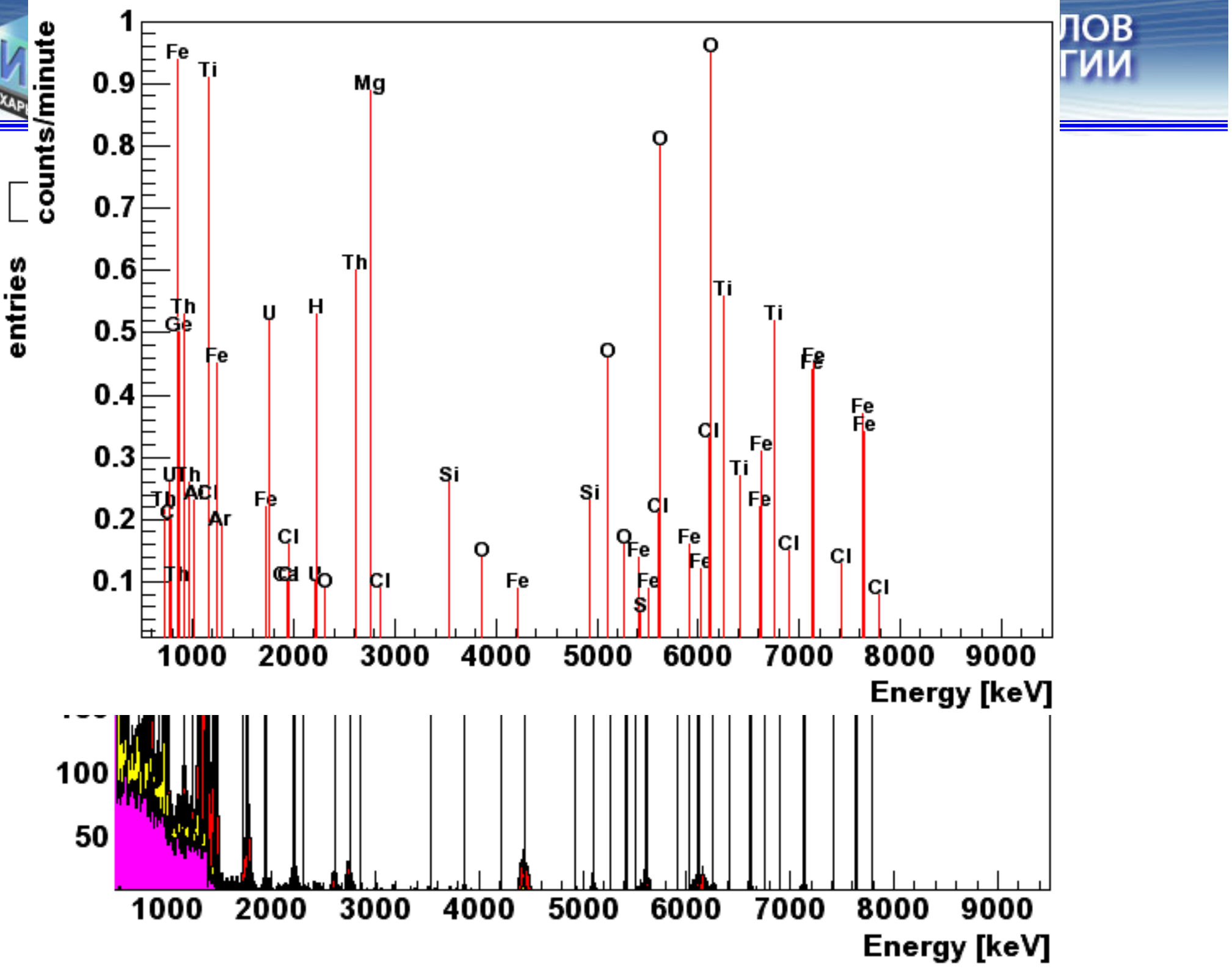
Weak lines

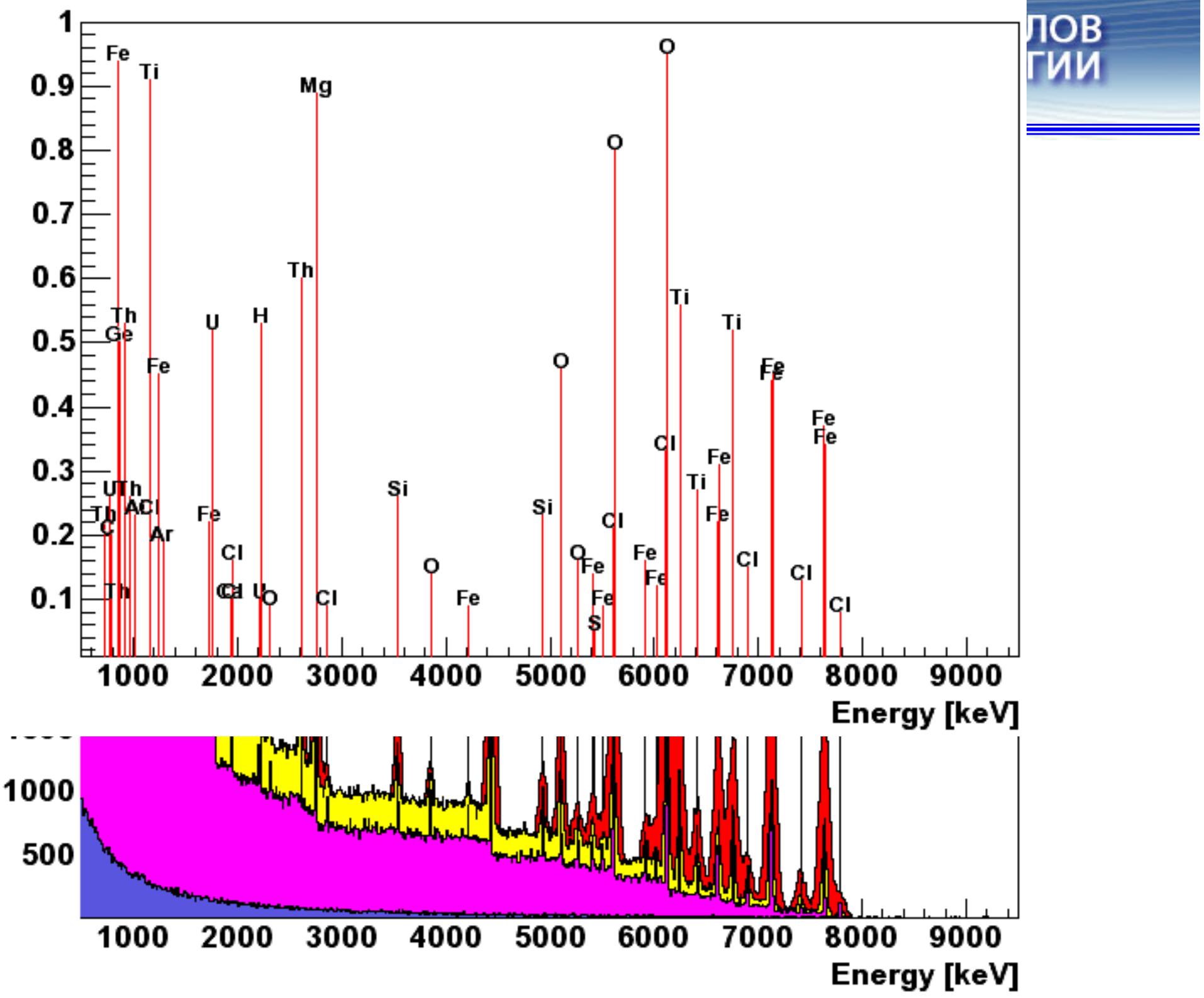
Гамма-спектрометр прибора МГНС: регистрация в детекторе



Гамма-спектрометр прибора МГНС: регистрация в детекторе




counts/minute
entries
Energy [keV]
Energy [keV]


counts/minute
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
Fe
Ti
Mg
O
Th
Ge
U
H
Si
Cl
Ar
Ca
S
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
8000
9000
Energy [keV]
1000
500
Energy [keV]

No.	Model Type	Comment
# 1	Chondrite Model (see Harmon, 1997)	Basic model ChM
# 2	Equilibrium Condensation Model (see Basaltic Volcanism Study Project, 1980)	Basic model ECM
# 3	Equilibrium Condensation Model with feeding zones (see Basaltic Volcanism Study Project, 1980)	Similar to ECM, may be interpolated from ECM
#4	Dynamically Mixed Model (see Basaltic Volcanism Study Project, 1980)	It differs from other models mainly by the absence of Fe and Ti
#5	Collisionally Differentiated Model (see Basaltic Volcanism Study Project, 1980)	It differs from other models mainly by the absence of Al, Fe, Ti, Th and U
#6	Vaporization Model (see Fegley, A.G.W. Cameron, 1987)	It is similar to the model #7 RRM
#7	Refractory-rich Model (see Goettel, 1988)	Basic model RRM
#8	Intermediate model (see Goettel, 1988)	May be interpolated between RRM and VRM
#9	Volatile-rich model (see Goettel, 1988)	Basic model VRM

Model	Na (%)	Mg (%)	Al (%)	Si (%)	O (%)	Ca (%)	Ti (%)	Cr (%)	Mn (%)	Fe (%)	K (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)
ChM	0.06	20.3	3.4	22.1	45.1	3.7	0.20	2.3	0.05	2.9	6900	3.4	12
ECM	-	24.2	5.1	19.1	45.0	6.2	0.29	0.0	0.0	0.04	-	5.3	19
RRM	-	20.9	8.8	15.2	43.8	10.9	0.43	-	-	-	-	-	
VRM	1.0	19.2	1.7	21.1	43.0	2.2	0.08	-	-	11.4	-	-	-
Moon	0.4	5.9	7.1	21.6	43.0	7.5	1.59	0.27	0.16	12.0	2700	-	-
Mars	2.4	4.1	5.5	21.2	42.0	4.7	0.54	0.14	0.03	15.2	6100	-	-
DR	~40	~6	~5	~1.5	~1.1	~5	~7	>2	>5	~40	~2.6	-	-

Картографирование полей нейтронного и гамма-излучения позволит провести сравнение элементного состава поверхностных минералов и радиоактивных элементов K, Th и U для Меркурия, Земли Луны. Марса и Фобоса.

Луна-10, -12
Аполо-15, -16
Лунный проспектор

Марс-5
Фобос-2

Наземные данные

Мессенджер

SELENE

Марс Одиссей

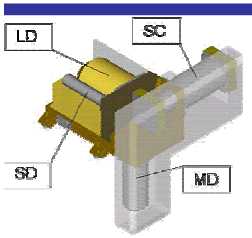
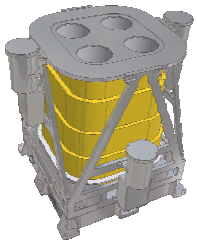
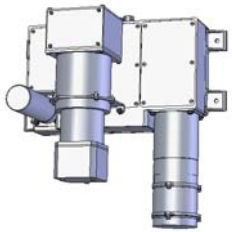
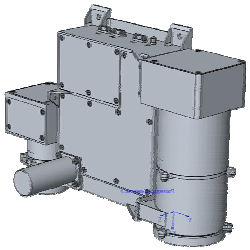
БепиКоломбо

ЛРО

Фобос-Грунт

ТЕКУЩИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ

ИКИ

			сцинтилляторы	нейтр. γ
	**ХЕНД**	**Начало:** 1997, **Запуск:** Апрель 7, 2001 **Начало научных измерений:** 2002	√	
	**ЛЕНД**	**Начало:** 2004, **Запуск:** Апрель 2009 **Начало научных измерений:** 2009	√	
	**НС ХЕНД**	**Начало:** 2002, **Запуск:** Октябрь 2009 **Начало научных измерений:** 2010	√	√
	**МГНС**	**Начало:** 2002, **Запуск:** Сентябрь 2013 **Начало научных измерений:** 2019	√	√