

# Проектирование и результаты экспериментальных испытаний прототипов детекторов установки KLOD

В. Н. Болотов,<sup>1</sup> Г. И. Бритвич,<sup>2</sup> Ю. П. Гуз,<sup>2</sup> А. И. Макаров,<sup>1,\*</sup> А. П. Останков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерных исследований РАН

<sup>2</sup>ГНЦ «Институт физики высоких энергий»

Проектируемая установка KLOD предназначена для обнаружения и исследования ультра-редкого распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ , его предсказанная по Стандартной модели вероятность  $Br = (3.0 \pm 0.6) \times 10^{-11}$ . Рассмотрено проектирование и испытание прототипов важнейших детекторов установки: вето-системы распадного объема и пучкового вето-калориметра. Показана возможность предложенного пучкового вето-калориметра выполнять регистрацию  $\gamma$ -квантов с высокой эффективностью при загрузке пучковыми нейтронами 300 МГц.

PACS numbers: 29.40.Vj, 13.20.Eb

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Распад  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ , обусловленный прямым нарушением СР-инвариантности, называется «золотой модой» распадов каонов [1]. Его вероятность в соответствии со Стандартной моделью (СМ) пропорциональна квадрату элемента  $\eta$  матрицы СКМ; измерение распада будет проверкой согласованности параметров СМ и проверкой существования «новой физики».

Стратегия эксперимента аналогична разработанной в проектах KAMI (FNAL) [2], E391a (KEK) [3] и KOTO (J-PARC) [4]. Характеристики эксперимента KLOD [5] в сравнении с этими проектами представлены в табл. 1.

Для подавления фонов от распадов каонов, прежде всего  $K_L^0 \rightarrow 2\pi^0$  и  $K_L^0 \rightarrow 2\gamma$ , будет активно использовано ограничение на поперечный импульс  $\pi^0$ :  $P_t < 120$  МэВ. Для этого пучок каонов должен иметь небольшой разброс по поперечному импульсу, т.е.

---

\* Electronic address: makarov@meson1.inr.ac.ru

должен быть достаточно узким. Возможность создания пучкового канала с требуемыми характеристиками показана в [6].

## 2. ПРОЕКТ УСТАНОВКИ KLOD

Установка КЛОД (схема на рис. 1) представляет собой помещенный в высокий вакуум распадный объем, окруженный со всех сторон детекторами. Регистрация 2-х фотонов с измерением их энергии и направления осуществляется передним (главным) калориметром. Для регистрации дополнительных частиц от фоновых распадов, например, фотонов от распада  $K_L^0 \rightarrow 2\pi^0$ , предназначена вето-система распадного объема. Для запрета заряженных частиц будет использован вето-голоскоп. Для регистрации потерянных через отверстие главного калориметра фотонов в конце установки на пучке расположится пучковый вето-калориметр. Его задача — высокая эффективность регистрации фотонов при как можно более низкой эффективности регистрации пучковых нейтронов.

## 3. РАСПАДНАЯ ВЕТО-СИСТЕМА

Один из важнейших детекторов — вето-система, окружающая распадный объем. Учитывая то, что она будет составлять основную часть стоимости установки, ее естественно выполнить в виде сэмплинг-структуры (чередующихся слоев конвертера и активного вещества).

Детектор должен обеспечивать высокую эффективность регистрации фотонов: уровня неэффективности  $10^{-6}$  можно достичь для  $\gamma$  энергий  $\gtrsim 1$  ГэВ, что требует глубины калориметра  $\gtrsim 18 X_0$ . Для меньших энергий возможности ограничены ростом сечений фотоядерных взаимодействий и сэмплинг-эффектом, который начинает доминировать при энергиях  $< 100$  МэВ. Чтобы сократить влияние последнего, а также получить возможность регистрации фотонов с энергиями до 1 МэВ, важно выбрать как можно более «рыхлую» структуру детектора.

В качестве основного варианта мы рассматриваем модули типа «шашлык», содержащие 300 слоев из (свинцовой пластины 0.3 мм и сцинтилляционной пластины 1.5 мм), обеспечивая ячейке размерами  $(100 \times 100 \times 560)$  мм<sup>3</sup> длину  $15.9 X_0$ . Светосбор

осуществляется спектросмещающими волокнами. Модули этой конструкции [7] производятся серийно в ИФВЭ; были произведены и протестированы несколько модулей, модифицированных в соответствии с нашими требованиями:

- форма модуля в виде «лесенки» (см. рис. 2) при последовательном расположении модулей позволяет избежать любых возможных зазоров в распадной системе;
- в последней трети детектора толщины свинцовых пластин удвоены, чтобы обеспечить полную длину  $18X_0$ .

Произведенные модули протестированы на вторичных пучках ускорительного комплекса У-70 ИФВЭ, в том числе, для проверки внесенных в конструкцию изменений. Основные результаты следующие:

- модули позволяют уверенно детектировать, давая 3.5 фотоэлектрона на 1 сцинтилляционную пластину;
- световойход составляет 10 фотоэлектронов на 1 МэВ;
- измеренное разрешение составляет 1.5% для электронов с энергией 10 ГэВ, что согласуется с ранее измеренной зависимостью  $\sigma_E/E = 3\%/\sqrt{E} + 1\%$ ;
- нелинейность отклика составляет  $\approx 3\%$ .

Таким образом, представляется возможным детектировать фотоны с низкими энергиями до  $\sim 1$  МэВ.

#### 4. ПУЧКОВЫЙ ВЕТО-КАЛОРИМЕТР

Пучковый вето-калориметр (ПВК) — маленький, но важный детектор, который должен работать в условиях очень высокой загрузки нейтронами — 300 МГц. При этом неправильная регистрация нейтронов как  $\gamma$ -квантов даст вклад в «мертвое время» установки, чем больше эффективность регистрации нейтронов — тем меньше полный акцептанс установки. Даже если ПВК отодвинут на 3.5 м от главного калориметра, 20% распадов  $K_L^0 \rightarrow 2\pi^0$  имеют прошедший через отверстие главного калориметра фотон, попавший в ПВК. Более того, в 2% распадов  $K_L^0 \rightarrow 2\pi^0$  оба  $\gamma$  от 1  $\pi^0$  попадают в ПВК; впрочем, в таких событиях  $\gamma$ -кванты имеют довольно жесткий спектр (рис. 3).

Необходимо достичь неэффективность регистрации каждого  $\gamma$ -кванта около  $10^{-3}$  для энергий, по крайней мере,  $\gtrsim 1$  ГэВ, и желательно для среднего диапазона энергий 0.25–1 ГэВ (не хуже  $10^{-2}$ ). Учитывая наличие относительно мягких пучковых  $\gamma$ -квантов, вероятно, должен быть выставлен порог регистрации  $\approx 0.25$  ГэВ.

Для подавления регистрации нейтронов мы планируем использовать метод двойного светосбора — сцинтилляционного и черенковского, т.е. считывания одновременно сцинтилляционных и чистых пластиковых волокон в одном детекторе. Поскольку только частицы со скоростью  $\beta$  выше порога дают черенковский сигнал в среде, отношение черенковского и сцинтилляционного сигнала для электромагнитных и адронных ливней должно быть разным. Сообщалось [8], что таким образом неэлектромагнитная компонента адронных ливней может быть подавлена в 5 раз. Не только полное отношение, но и поведение отношения двух сигналов в поперечном и продольном направлениях различно [9], что также может быть использовано для режекции ливней  $\gamma$ -квантов от нейтронов.

#### 4.1. Моделирование пучкового вето-калориметра методом Монте-Карло

Моделирование Монте-Карло (при помощи программы GEANT4) выполнено для калориметрической структуры, соответствующей 200 одинаковым слоям, расположенных вдоль линии пучка. Каждый слой содержит свинцовую пластину толщиной 0.3 мм, слой сцинтилляционный волокон  $\varnothing 1$  мм и аналогичный слой прозрачных пластиковых волокон. Таким образом волокна сгруппированы с сегментацией и в продольном, и поперечном направлениях.

Были смоделированы события с  $\gamma$ -квантами в диапазоне (0.125, 0.25, ..., 4) ГэВ и (0.5–15) ГэВ для нейтронов. Найденное для  $\gamma$  энергетическое разрешение равно  $5.5\%/\sqrt{E}$  по сцинтилляционному сигналу и  $7.6\%/\sqrt{E}$  по черенковскому. Эти данные хорошо согласуются с данными для аналогичных калориметрических структур (см., напр., [10]).

Черенковский  $E_{ch}$  и сцинтилляционный  $E_{sc}$  сигналы нормированы по ливням от  $\gamma$ -квантов, давая таким образом для отношения  $R = E_{ch}/E_{sc}$  среднее  $R = 1$ . Распределение  $R$  имеет гауссовскую форму с параметром  $\sigma_R = 8.1\%/\sqrt{E[\text{ГэВ}]} \oplus 2.8\%$ . Отличия в поведении отношения  $R$  для  $\gamma$ -квантов и нейтронов, показывающие подавление черенковского сигнала в адронных ливнях, изображены на рис. 4.

Для режекции  $\gamma/n$  разработан алгоритм, представляющий собой упрощенную реализацию доступных критериев отбора:

- критерий начала ливня, отбирающий ливни, начинающиеся в первых ячейках ( $\sim 3X_0$ ) калориметра как электромагнитные;
- критерий по отношению  $R$ : идентификация ливней с  $R$  в пределах  $1 \pm C(E_{sc}) \cdot \sigma_R(E_{sc})$  как электромагнитных, где  $C(E)$  выбрана в зависимости от требуемой эффективности регистрации для каждого  $E$ ;
- критерий формы ливня и плотности сигнала, в данном случае количество ячеек  $N$  с энерговыделением выше порога должно удовлетворять условию  $N > const.$

В табл. 2 представлены неэффективности регистрации отдельного фотона и фотона при наличии ливня от 1 нейтрона, смоделированного с учетом известного спектра пучка. Для этого алгоритма эффективность неправильной идентификации нейtronов как  $\gamma$  равна 35% с учетом спектра пучка. Поскольку естественно ожидать существенное улучшение результатов при полном использовании информации о продольном и поперечном развитии ливня, эти исследования дают надежду решить проблему идентификации потерянных  $\gamma$ -квантов с небольшой ( $\lesssim 0.1$ ) потерей акцептанса установки.

#### 4.2. Прототип пучкового вето-калориметра

На основе результатов моделирования спроектирован и произведен прототип ПВК (см. рис. 5). Конструкция произведенного калориметра подобна описанной в пред. пункте, но содержит только 100 одинаковых слоев (0.3 мм свинца и 1 мм пластиковых волокон и сцинтилляционной пластины 1.5 мм), расположенных вдоль линии пучка. (Вместо сцинтилляционных волокон используется пластина). Сцинтилляционный свет считывается спектросмещающими волокнами, проложенными в канавке в центре каждой пластины. Пластиковые волокна с 20 слоев в продольном направлении и 17 волокон в поперечном направлении собираются в пучки  $\sim \varnothing 20$  мм, считываемые ФЭУ; аналогично, спектросмещающие волокна с каждой пластины из 20 слоев в продольном направлении собраны на другой ФЭУ. Таким образом, полный прототип содержит 25 ячеек, сгруппированных в матрицу  $5 \times 5$ , считываемых всего 50 ФЭУ. Размер прототипа  $1 R_M \times 2 R_M \times 7.5 X_0$  (в параметрах электромагнитных ливней).

Прототип ПВК протестирован на вторичных пучках ускорительного комплекса У-70. Целью измерений было измерить основные характеристики устройства, такие, как световыхход, однородность, угловая зависимость световыххода и т.д. Основные результаты этих тестов:

- измеренная однородность отклика устройства лучше  $\pm 5\%$  в обоих поперечных к линии пучка направлениях;
- черенковский световыхход от одной ячейки (20 слоев) при угле  $45^\circ$  составил 10 фотоэлектронов на минимально ионизирующую частицу;
- сцинтилляционный световыхход превышает черенковский в  $\sim 5 - 10$  раз;
- как ожидается на основании данных моделирования, измеренный максимум черенковского световыххода достигается при угле  $45^\circ$ . Зависимость световыххода от угла соответствует числовой аппертуре использованных пластиковых волокон;
- отсутствует угловая зависимость полного сцинтилляционного световыххода.

Результаты этих измерений будут использованы в нормировке параметров моделирования Монте-Карло и, возможно, внесения изменений в конструкция окончательного варианта ПВК. Для доказательства того, что предложенный детектор способен удовлетворить требованиям эксперимента, прототип будет протестирован в сеансах 2009–2010 гг. на пучке вторичных частиц с возможностью идентификации типа частицы ( $K^+$ ,  $e^+$ ,  $\pi^+$ ).

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой работе показана возможность создания двух основных детекторов с требуемыми для осуществления эксперимента KLOD характеристиками. В частности, продемонстрирована плодотворность использования идеи двойного светосбора для детектора, работающего в сложных фоновых условиях. Работа не охватывает всей деятельности коллaborации: прежде всего, опущены работы по проектированию и моделированию главного калориметра, выполненные группой ОИЯИ.

Авторы выражают признательность всем членам коллaborации за помощь и обсуждение данной работы.

Работа поддержана грантами РФФИ №№06-02-16065, 08-02-00808.

---

1. L. Littenberg, Phys. Rev. **D39**, 3322 (1989).
2. KAMI Collaboration. A proposal for a Precision Measurement of the Decay  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  and Other Rare Processes at Fermilab Using the Main Injector — KAMI. <http://ktev.fnal.gov/public/kami/kami.html> (2001)
3. T. Inagaki *et al.*, KEK-E391 Proposal 1996, KEK-Internal **96-13** (1996); K. Abe *et al.*, KEK Preprint **2000-89** (2000).
4. Proposal for  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  Experiment at J-Parc, [http://j-parc.jp/NuclPart/Proposal\\_0606\\_e.html](http://j-parc.jp/NuclPart/Proposal_0606_e.html) (2006).
5. Г. И. Бритвич и др., Препринт №2007-08, ИФВЭ (Протвино, 2007).
6. Ф.Н. Новоскольцев, А.П. Останков, Препринт №2004-52, ИФВЭ (Протвино, 2004).
7. G. S. Atoian *et al.*, Nucl. Instr. And Meth. **A531**, 467 (2004).
8. N. Akchurin *et al.*, Nucl. Instr. And Meth. **A399**, 202 (1997).
9. N. Akchurin *et al.*, Nucl. Instr. And Meth. **A536**, 29 (2005); **A548**, 336 (2005).
10. D. Babusci *et al.*, Nucl. Instr. And Meth. **A332**, 444 (1993).

## KLOD experiment development and detector prototype testing

V. Bolotov,<sup>1</sup> G. Britvich,<sup>2</sup> I. Gouz,<sup>2</sup> A. Makarov,<sup>1,\*</sup> A. Ostankov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute for Nuclear Research of RAS

<sup>2</sup> State Research Center "Institute of High Energy Physics"

\* E-mail: makarov@meson1.inr.ac.ru

KLOD experimental setup is intended to find and study ultra-rare decay  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ . Its probability, calculated by the Standard Model, is  $Br = (3.0 \pm 0.6) \times 10^{-11}$ . Research and development of the setup and its detectors, especially, modules of main veto-system and in-beam-veto calorimeter are overviewed in this paper. The ability of in-beam-veto calorimeter to fullfil our requirements on high  $\gamma$  detection efficiency in the presence of 300 MHz neutron flux is shown.

	KOPIO	KAMI	E391A	J-Parc (1)	J-Parc (2)	KLOD
Телесный угол пучка	500 $\mu$ стер	0.41 $\mu$ стер	12.6 $\mu$ стер	9 $\mu$ стер	2 $\mu$ стер	12.6 $\mu$ стер
$K_L^0$ /сброс (на установке)	$2.6 \cdot 10^8$	$6.2 \cdot 10^7$	$3.3 \cdot 10^5$	$8.1 \cdot 10^6$	$4.4 \cdot 10^7$	$5.4 \cdot 10^7$
Вероятность распада	$\approx 16$ (8)%	15 %	2.7 %	3.6 %	6%	4.8%
Время набора	$3 \cdot 10^7$ сек	$2 \cdot 10^7$ сек	6 месяцев	$3 \cdot 10^7$ сек	$3 \cdot 10^7$ сек	100 дней
Число событий (по СМ)	96	88	0	3.5	133	11
Сигнал/фон	2	4.6	0	1.4	4.8	3

Таблица 1. Сравнение эксперимента KLOD с другими проектами

	0.125 ГэВ	0.25 ГэВ	0.5 ГэВ	1 ГэВ	2,4,8 ГэВ
неэффективность	0.29	$1.4 \cdot 10^{-2}$	$3.7 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	0
$\sim$ в присутствии 1n	0.23	$3.7 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	0

Таблица 2. Неэффективность регистрации ПВК  $\gamma$ -квантов различных энергий.

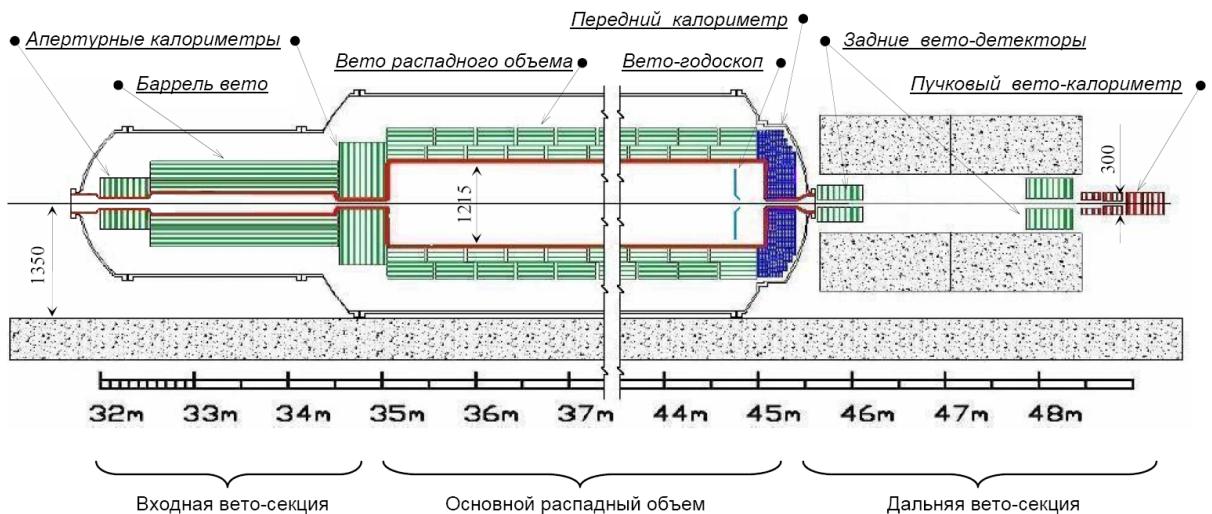
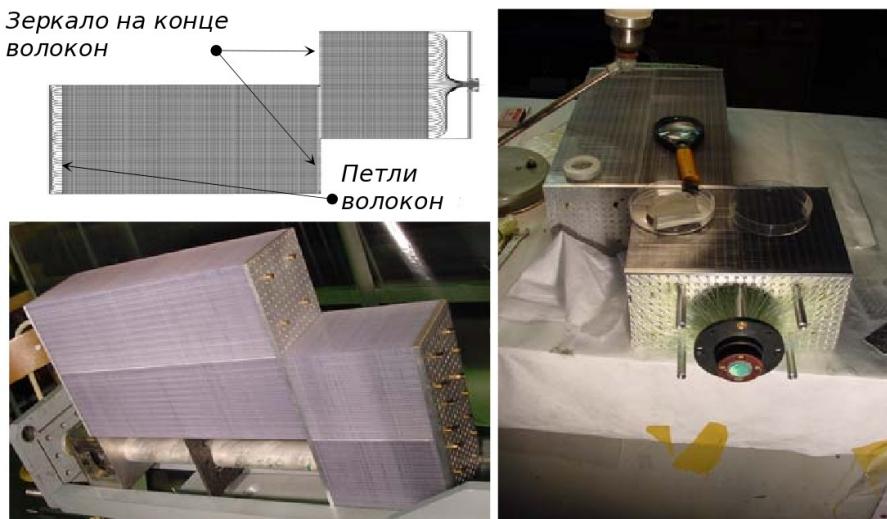
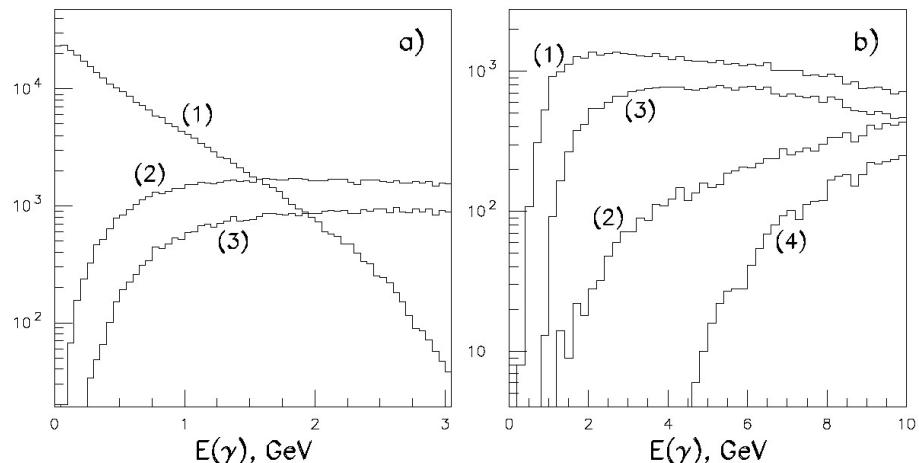


Рис. 1. Схема установки KLOD



**Рис. 2.** Схема и фотографии произведенных модулей вето-системы распадного объема



**Рис. 3.** Спектры  $\gamma$ -квантов распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  при условии, что 2  $\gamma$  попали в главный калориметр: а)  $\gamma$ , попавший в распадную вето-систему (1), в отверстие главного калориметра (2), в ПВК (3); б) в случае 2  $\gamma$  в ПВК: энергия каждого  $\gamma$  (1) и их сумма (2), (3-4) — то же при условии, что 2 $\gamma$  от 1  $\pi^0$ .

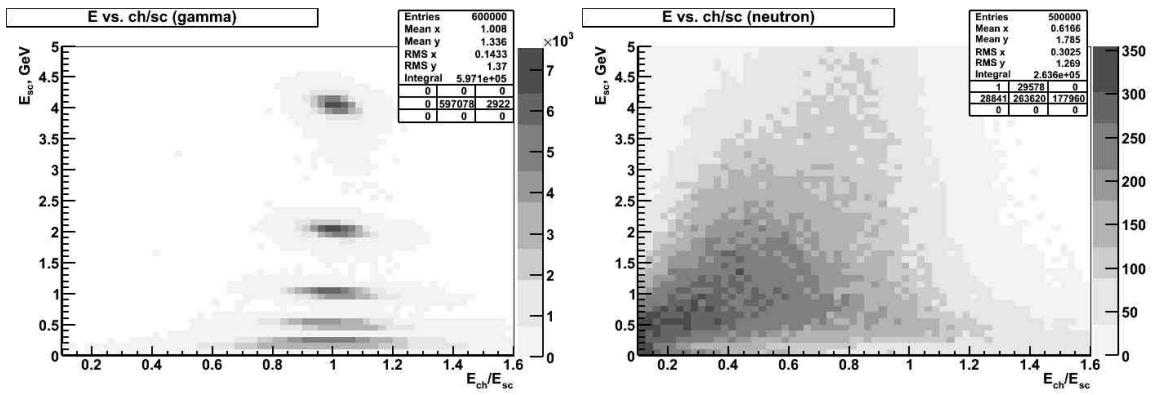


Рис. 4. Корреляции между  $R = E_{ch}/E_{sc}$  (ось X) и зарегистрированным сцинтилляционным сигналом  $E_{sc}$  (ось Y) для а)  $\gamma$ -квантов и б) нейтронов. Не показаны  $R < 0.1$ .

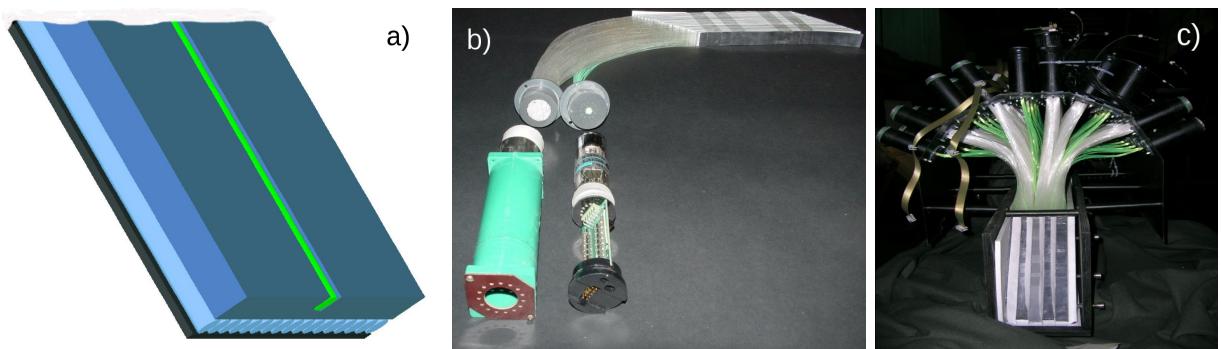


Рис. 5. а) Схема слоя ПВК (слева направо: свинцовая пластина, ряд пластиковых волокон, сцинтилляционная пластина со спектросмещающим волокном); фотографии б) ячейки, состоящей из 20-ти таких слоев и с) всего прототипа  $5 \times 5$  ячеек.