

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК (ИЯИ РАН)

УДК 537.591.8

Номер гос.
Регистрации 01201179990

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИЯИ РАН,

_____ В.А. Матвеев
«___» _____ 2012 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

выполненной в рамках Федеральной Целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы», лот 6 «Проведение исследований с использованием уникальных объектов научной инфраструктуры (включая обсерватории, ботанические сады, научные музеи и др.) по основным направлениям реализации Программы» (шифр 2011-1.8-518-006) по теме: «Совершенствование комплекса установок Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (УСУ-БПСТ) и экспериментальные исследования различных типов излучений природного происхождения, включая распределение радиоактивности в теле человека»

Государственный контракт от 12 мая 2011г. № 16.518.11.7072

Этап четвертый

Обобщение и оценка результатов исследований
(итоговый)

Научный руководитель,
к. ф.-м. н.

_____ А.С. Лидванский

«___» _____ 2012 г.

2012

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работ Лидванский А.С., зав. лаб., к.ф.м.н.

Исполнители:

Кузминов В. В., зав. отделом, д.ф.м.н.

Петков В.В., зав лаб., к.ф.м.н.

Алиханов Ибрагим Алиевич, н.с., к.ф.м.н.

Гаврилюк Юрий Михайлович, н.с.

Гангапшев Альберт Мусаевич, н.с., к.ф.м.н.

Казалов Владимир Владимирович, инж.-исслед., к.ф.м.н.

Гапоненко Александр Николаевич, м.н.с.

Лапа Александр Владимирович, лаборант

Гежаев Али Мугазимович, ст. инж.-эксп.

Кучмезов Азрет Мухарбиевич, стажер

Жантудуева Джамия Ануаровна, аспирант

Демкин Руслан Дмитриевич, эл. сл. бр.

Жаховский Валентин Федорович, сл. по РОО бр.

Логинов Сергей Евгеньевич, эл.-газосв. бр.

Махов Сафарби Султанович, сл. по РОО бр

Жемухов Мухамед Кужбиевич, фрезер. б р.

РЕФЕРАТ

Отчет 49 страниц, 15 рисунков, из них 4 фотографии, 2 таблицы, 2 приложения.

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, РАДИОАКТИВНЫЙ ФОН, НИЗКОФОНОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ, МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЯ

Объект исследования или разработки. Объектом разработки является стенд для измерений малых концентраций радиоактивных элементов в живом организме. Объектами исследования являются фоны естественной радиоактивности, конструкционных материалов и воздуха в низкофоновых лабораториях, а также характеристики создаваемого стенда и возможности внедрения метода в медицинские исследования и медицинскую практику.

Цель работы. Получение новых знаний и развитие экспериментальной базы УСУ для предоставления научно-исследовательским организациям новых эффективных методов и средств проведения исследований, включая изучение природных излучений и исследование распределения малых радиоактивных примесей в образцах разного происхождения и теле человека с получением результатов мирового уровня. Развитие комплекса экспериментальных установок УСУ-БПСТ и создание стенда для низкофоновых измерений распределения естественных и слабоактивных искусственных радиоактивных изотопов в теле живого организма с целью выявления в организме зон с аномальной концентрацией таких изотопов.

Результаты работы. На этапе № 4 (начиная с 1 июля 2012 г.) выполнены следующие работы:

1. Проведены отладочные измерения.
2. Составлена окончательная редакция методики основных измерений.
3. Проведены измерения радиоактивного фона тела человека.
5. Проведена оценка полученных результатов .
- 6 Составлен заключительный отчет.

Содержание

1. Введение.....	5
2. Результаты работ выполненных на первом и втором этапах	11
3. Краткий обзор работ выполненных на третьем этапе.....	21
4. Результаты работ на 4 этапе	26
4.1 Проведение отладочных измерений	26
4.2. Составление окончательной редакции методики основных измерений	27
4.3. Проведение основных измерений радиоактивного фона тела человека	28
4.4 Проведение оценки полученных результатов	35
4.5. Подготовка заключительного отчета о НИР	37
5. Заключение	39
6. Литература	42
7. Приложение 1. Список публикаций.....	44
8. Приложение 2. Методика основных измерений	46

1. Введение

Целью выполнения НИР является проверка возможностей и чувствительности метода измерения в низкофоновых условиях пространственного распределения естественных и слабоактивных искусственных радиоактивных изотопов в теле живого организма. Ставится задача выявления в организме зон с аномальной концентрацией таких изотопов. Широкую известность получил факт накопления радиоактивного стронция в костной ткани. Однако экспериментальные данные об этом были получены путем сжигания останков живых организмов и анализа радиоактивности пепла. Возможность проведения прямого анализа живого организма, в такой постановке до сих пор никем не рассматривалась. Хотя как только были созданы сцинтилляционные детекторы большого объема лауреат Нобелевской премии Ф. Райнес [1] предлагал использовать их для определения полной концентрации изотопа ^{40}K в организме человека. Однако реализована эта идея не была, хотя низкофоновые исследования в последнее время развиваются довольно динамично.

В течение последних нескольких десятилетий во всем мире был создан ряд подземных низкофоновых лабораторий для фундаментальных и прикладных физических исследований. В 2000 г для координации этих исследований в Европе была организована международная коллаборация CELLAR (Collaboration of European Low-Level Underground Laboratories). Эта коллаборация включает восемь лабораторий и одна из целей их объединения состоит в реализации идеи переносного детектора (travelling detector) для абсолютной калибровки фоновых условий в разных лабораториях. Тематика исследований в этих лабораториях весьма широка: от исследования и отбора образцов материалов для детекторов редких событий в физических экспериментах до исследования и паспортизации продуктов питания и строительных материалов.

В то же время, не так редки стали события, когда, вследствие аварий на ядерных объектах (сравни давнюю катастрофу в Чернобыле или недавнее цунами в Японии и повреждения атомных электростанций Фукусима-1 и других) большие массы людей оказываются подвержены воздействию радиоактивных изотопов, которые имеют возможность накапливаться в тканях тела. Для контроля процесса восстановления организма человека после таких аварий желательно было бы иметь установки для исследования распределения радиоактивных нуклидов в тканях. И еще прежде проведения таких обследований надо как следует изучить фоновое распределение радиоактивных элементов в теле и его возможные флуктуации.

Для получения ответа на вопрос о возможности построения картины распределения естественных радиоактивных элементов в теле человека по результатам измерений излучений от их распада требуется создать соответствующий измерительный низкофоновый стенд, что и является главной целью настоящей НИР. Упрощенно стенд представляет ложе из низкофоновых материалов, на котором находится тестируемый индивид. Сверху и снизу необходимо разместить два низкофоновых детектора. Для исследовательских целей наиболее подходящими являются сцинтилляционные детекторы на основе NaI(Tl) или CsI(Tl). Регистрирующая аппаратура должна обеспечивать режимы сбора сигналов отдельно от каждого детектора и в совпадении. Сканирование всего тела осуществляется параллельным перемещением детекторов с заданным временным и пространственным шагом. Для достижения необходимого уровня чувствительности измерений весь комплекс вместе с обследуемым человеком с целью снижения фона должен быть защищен от космических лучей и излучений от окружающей среды. На этапе исследований для этих целей может быть использована одна из готовых подземных низкофоновых лабораторий БНО ИЯИ РАН, предназначенная для проведения подготавливаемых экспериментов по поиску двойного бета-распада различных изотопов. При проведении измерений воздух внутри лаборатории

должен очищаться от ^{222}Rn , цепочка распадов от которого также создаёт естественный фон.

В декабре 2008 года в Баксанской В нейтринной обсерватории ИЯИ РАН было завершено создание и осуществлён ввод в эксплуатацию уникальной подземной низкофоновой лаборатории глубокого заложения НЛГЗ-4900.

Лаборатория расположена на расстоянии 3700 метров от входа в горизонтальные штольни подземного комплекса Обсерватории в горной выработке размерами 6 x 6 x 40 м³. Толща горы над лабораторией соответствует 4900 метров водного эквивалента. Горные породы снижают поток космических лучей в $\sim 10^7$ раз. В состав лаборатории входят две смежные низкофоновые комнаты и шесть обычных рабочих помещений со стенами из листовой стали. Стены, двери, полы и потолки низкофоновых комнат изготовлены из 250 мм полиэтилена + 1мм Cd +150 мм высокочистого Pb (внутренний слой). Полные массы защитных материалов равны соответственно 30 т, 1т и 190 т. Наружные и внутренние поверхности комнат облицованы стальным листом толщиной 3 мм. Размеры внутреннего защищённого рабочего объёма составляют 2.5 x 2.5 x 3.3 м³. Потоки γ -квантов и нейтронов от распадов природных долгоживущих радиоактивных элементов в горных породах, окружающих лабораторный зал, снижены в рабочем объёме низкофоновой комнаты в сотни раз. Устранение в большом рабочем помещении космических лучей и излучений естественных радиоактивных элементов от окружающей среды, являющихся главными источниками фона детекторов ионизирующих излучений, открывает новые перспективы в исследованиях чрезвычайно редких ядерно-физических процессов с использованием массивных мишеней.

Лаборатория оборудована всеми необходимыми для нормального функционирования средствами: электроэнергия, холодная вода, канализация, телефонная и оптическая связь, вентиляция, подъёмные механизмы, подъездные и внутренние рельсовые пути, вспомогательные помещения.

Общий внешний вид части лаборатории представлен на фотографии
Рис.1.



Рис. 1. Общий вид вспомогательных и низкофоновых комнат.

Условия, созданные в НЛГЗ-4900, позволяют организовать проведение исследований эффектов, возникающих в живых организмах в условиях сверхнизких уровней радиоактивных излучений; выполнить измерения распределения естественных радиоактивных элементов в организме человека. Информация, полученная в результате решения последней задачи, даёт возможность установить точный перечень естественных радиоактивных элементов в теле человека, активность этих элементов и их распределение по объёму тела, уровень внутреннего фонового облучения и может послужить основой для создания нового метода обследования человеческого организма.

Поскольку уровень собственного радиоактивного фона детектора и низкофоновой защиты является определяющим фактором в достижении планируемой чувствительности, важнейшим этапом подготовки эксперимента является исследования радиоактивной чистоты различных образцов материалов, планируемых к использованию и отбор наилучших. Информация о содержании радиоактивных изотопов в материалах и отдельных биологических образцах может быть получена на двух уникальных сверхнизкофоновых установках БНО ИЯИ РАН. Одна из них содержит три полупроводниковых детектора из сверхчистого германия (установка 4HPGe).

Установка расположена в помещении низкофоновой лаборатории на глубине 660 м в.э., где фон космических лучей снижен в ~ 2000 раз. Лаборатория в своей конструкции содержит элементы низкофоновой защиты. Её стены облицованы низкорadioактивным бетоном толщиной 50 см на основе дунита – ультраосновной породы с низким содержанием естественных радиоактивных элементов. Объём рабочего помещения (4x4x3 куб. м.) отделён от бетонных стен, потолка и пола засыпкой из дунитового щебня. Такая конструкция обеспечила снижение гамма-фона в 200 раз по сравнению с голой выработкой. В рабочем помещении размещена низкофоновая защита, состоящая из 8 см борированного полиэтилена + 23 см Рb + 12 см Си. В центре медного блока защиты имеется прямоугольная полость размерами 30x30x30 куб.см, в которой расположены головные части трёх сверхнизкофоновых полупроводниковых детекторов из сверхчистого германия. Масса каждого детектора около 1 кг. Защитные кожухи сделаны из высокочистой электролитической меди. Детекторы охлаждаются через хладопроводы, выходящие наружу защиты и опущенные в сосуды Дьюара с жидким азотом. Два детектора изготовлены из германия, обогащённого по Ge-76 до 87% и один – из германия природного состава (установка 4HPGe). Установка находится под землёй с 1992 года.

Вторая установка (СверхНизкофоновый гЕрманиевый Гамма–спектрометр (СНЕГ) расположена в новом отдельном лабораторном помещении НЛГЗ-4900. В качестве детектора использован четвёртый ППД из установки 4НРGe. Защита состоит из 8 см полиэтилена + 1 мм кадмия + 15 см свинца + 18 см меди марки М0Б. Материалы находились в подземных условиях более 15 лет. Исследуемые материалы загружаются в рабочую полость снизу с помощью лифтового устройства. Объём образца – до ~1 л.

Обе установки при массе образца 4 кг и времени измерений 1200 час. обладают чувствительностью к массовому составу примеси в основном веществе на уровне 10^{-11} г/г по ^{238}U , 10^{-10} г/г по ^{232}Th и 10^{-12} г/г по ^{40}K , являющейся уникальной в мировой практике.

Наличие двух установок, расположенных на разной глубине, даёт возможность оценить эффекты, создаваемые остаточным потоком космических лучей и определить их потенциальную опасность для основных измерений. Одновременно удваиваются измерительные возможности. Кроме основных низкофоновых материалов предполагается также исследовать радиоактивную загрязнённость воды из местных источников, природных материалов и грунтов, биологических материалов, строительных материалов, продуктов питания и т.д.

Оценка радиоактивной чистоты исследуемого материала получается на основе анализа спектра фона ППД, накопленного за время ~1000 час, когда исследуемый образец массой 1-5 кг размещён в полости защиты непосредственно возле детекторов. Импульсы с ППД анализируются многоканальным анализатором и их амплитуда записывается в память компьютера. Для записи полной формы импульсов применяются современные платы цифровых осциллографов. В этом случае появляется возможность проведения анализа формы и отбраковки ложных импульсов.

Аттестацию первичных фоновых характеристик лабораторных помещений на разной глубине залегания предполагается выполнить с помощью переносных детекторов двух типов. Для измерения гамма-фона

использован специально изготовленный низкофоновый сцинтилляционный детектор на основе кристалла NaI(Tl) 80x250 мм. Для измерения потока тепловых нейтронов использован детектор средней площади (~6 кв. дм), построенный специально для этих целей по технологии детекторов большой площади на сцинтилляторе ZnS(Ag) +Li⁶F.

2. Результаты работ выполненных на первом и втором этапах

Для достижения запланированных результатов в мае-декабре 2011 года были проделаны следующие работы:

2.1. Завершены измерения фоновых характеристик помещений новой подземной низкофоновой лаборатории НЛГЗ-4900. Измерен фон γ -излучения, фон тепловых нейтронов, содержание радиоактивного ^{222}Rn в воздухе и вклад в фон излучений от распада его дочерних продуктов. На спектрометре СНЕГ, расположенном в отдельном помещении НЛГЗ-4900, в кратковременных измерениях были проверены полученные ранее данные об уровнях радиоактивности свинца, меди и стали и получено подтверждение высокой радиоактивной чистоты обследованных образцов. Уровень радиоактивного фона низкофонового бокса и всей установки в целом был определён с помощью специально созданного вспомогательного тестового сцинтилляционного детектора (ВТСД), описанного ниже. На спектрометре 4HPGe (низкофоновая камера НИКА на глубине 660 м в.э.) проведены измерения радиоактивности сцинтиллятора PbWO_4 и порошка $^{40}\text{CaCO}_3$, предназначенного для изготовления сцинтилляционных кристаллов $^{100}\text{Mo}^{40}\text{CaO}_4$ в коллаборации AMORE.

2.2. Для проведения основных измерений распределения по объёму тела человека активности естественных радиоактивных изотопов была разработана концепция оптимального детектора. В этот период представлялось, что детектор должен обеспечить высокую эффективность поглощения γ -излучения в диапазоне энергий 0.3-2.7 МэВ и возможность определения координаты точки поглощения частицы (позиционную чувствительность). Последнее свойство позволяет проанализировать распределение точек поглощения на разных глубинах в сцинтилляторе и определить, в принципе, конфигурацию излучающего объекта. Предполагалось, что таким требованиям может, в первом приближении,

удовлетворить сцинтилляционный детектор с полной площадью $50 \times 175 \text{ см}^2$, составленный из 14 монокристаллических пластин $7 \times 25 \times 25 \text{ см}^3$ сцинтиллятора CsI(Tl), просматриваемых с большой грани матричной сборкой фотоприёмников. Размер площади отдельной фото-ячейки предполагался равным $4.2 \times 4.2 \text{ см}^2$. Анализ распределения по площади матрицы амплитуд импульсов, зарегистрированных от одного события, может, в принципе, позволить определить все три координаты точки поглощения частицы. При изучении возможностей приобретения сцинтилляционных детекторов с такими размерами было установлено, что они производятся за пределами России. Ближайшим и наиболее известным предприятием является Институт монокристаллов НАН Украины, расположенный в г. Харькове. Стоимость одной пластины оценена в $\sim 20000\$$. Стоимость электроники для одной пластины (36 каналов) оценивается в такую же сумму. Таким образом, один детектор может стоить $\sim 40000\$$ ($\sim 1\,200\,000$ руб). Для получения уверенности в оправданности таких затрат было решено провести все предварительные оценочные измерения с помощью Вспомогательного Тестового Сцинтилляционного Детектора (ВТСД).

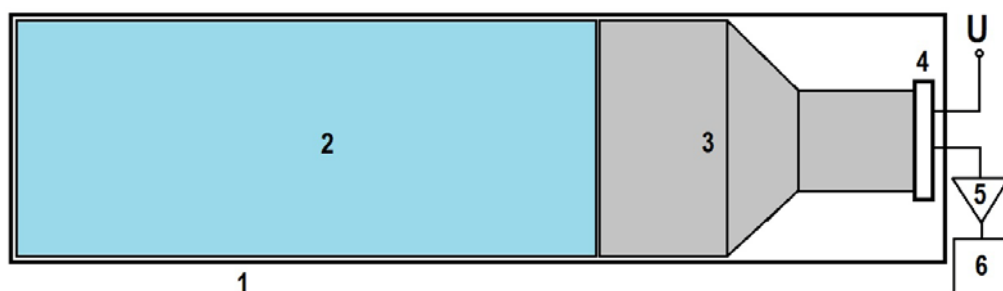


Рис. 2. Схематическое продольное сечение ВТСД. 1 – корпус; 2 – кристалл NaI(Tl) 80x250 мм; 3 – ФЭУ-110; 4 – делитель; 5 – ЗЧУ; 6 – регистратор.

2.3. Для изготовления ВТСД был использован низкофоновый кристалл NaI(Tl) диаметром 80 и высотой 250 мм, упакованный в закрытый с одного торца нержавеющей цилиндрический кожух с максимальными размерами

$d=91$ и $h=267$ мм. Выходное окно толщиной 12 мм изготовлено из оптического кварца. Кристалл хранился в подземных условиях ~ 20 лет.

Схематический чертёж сечения детектора приведён на Рис.2. Кристалл (2) с прикреплённым фотоумножителем ФЭУ-110 (3), делителем (4) и уплотняющими распорками из оргстекла вставлен в цилиндрический кожух (1) $d=102$ и $h=500$ мм из нержавеющей стали. Кожух закрыт нержавеющей крышками. На крышке со стороны фотоумножителя установлены высоковольтный и сигнальный разъёмы. На ФЭУ подаётся напряжение $\sim (-1300)$ В. Сигнал снимается с анода зарядочувствительным предусилителем (5) и подаётся на регистрирующее устройство (6).

2.4. Для выбора оптимального накопителя были проверены эксплуатационные характеристики многоканальных анализаторов амплитуд импульсов АИ-1024 (автономное устройство) и «МАЭСТРО» (компьютерная плата), а также платы цифрового запоминающего осциллографа (ЦОС) ЛА-н20-12РСІ, встроенной в персональный компьютер (ПК). Было установлено, что измерение рабочих и фоновых характеристик ВТСД в наземном помещении и незащищённом подземном помещении возможно только с помощью анализаторов амплитуд импульсов (АИ), поскольку они имеют относительно малое «мёртвое» время и обеспечивают практически без потерь регистрацию импульсов при скоростях счёта фона ~ 1500 с⁻¹. При этом вклад импульсов неионизиционного происхождения (пробои, наводки) в полные спектры фона пренебрежимо мал. Плата типа «МАЭСТРО» оказывается предпочтительнее, поскольку устанавливается параллельно плате ЦОС в одном ПК. При этом один измеритель на базе ПК обеспечивает измерение больших скоростей счёта с помощью АИ и малых скоростей счёта с помощью ЦОС. «Мёртвое» время ЦОС оказалось таким, что максимальная скорость сбора событий с записью полной формы не превышает ~ 70 с⁻¹. При этом регистрация скоростей ~ 1500 с⁻¹ происходит с большими потерями. Восстановление полной скорости счёта путём нормировки на «живое» время приводит к большим ошибкам вычисленных значений. Однако, как показала

практика, регистрация импульсов с помощью АИ не позволяет простыми методами получить временной ход скорости счёта, поскольку спектр пишется целиком в один буфер памяти. Для получения временного хода необходимо создавать дополнительную программу, задающую дискретизацию полного времени наблюдения на интервалы выбранной длительности и повторяющуюся автоматическую запись накопленных за интервал спектров. Кроме этого при регистрации событий при низком фоне относительная доля неионизационных импульсов может быть заметной. Для её устранения может быть применён способ дискриминации по форме импульса. Этот способ легко реализуется при анализе формы импульсов, записанных с помощью ЦОС. Поэтому для записи информации от ВТСД при малых скоростях счёта оптимальным оказывается именно ЦОС. Таким образом, универсальное регистрирующее устройство на базе ПК должно включать плату АИ и плату ЦОС.

2.5. Рабочие характеристики ВТСД проверялись с помощью γ -излучения калибровочных источников ^{137}Cs (662 кэВ) и ^{22}Na (511 кэВ, 1275 кэВ). Рабочее напряжение U на ФЭУ подбиралось таким, чтобы амплитуда импульсов на выходе зарядочувствительного преусилителя (ЗЧУ) без дополнительного усилителя была достаточной для их регистрации в заданном диапазоне амплитудных каналов АИ. На Рис. 3 приведены спектры от этих источников: а) ^{137}Cs ; б) ^{22}Na , снятые при напряжении $U = -1300$ В с помощью платы «МАЭСТРО». Разрешение линии 662 кэВ оказалось равным 17.6 %, линии 1275 кэВ – 13.5 %. На Рис. 4 для такой калибровки приведены нормированные на 1 час спектры фона ВТСД, снятые в различных условиях:

- 1) фон в незащищённом подземном помещении камеры НЛГЗ-4900 (полное время измерения 52 мин.);
- 2) фон в низкофоновой комнате со стенами из 250 мм полиэтилена + 1мм Cd +150 мм высокочистого Рb (внутренний слой) (полное время измерения 1276 мин.);

3) фон в дополнительной медной защите толщиной 10 см внутри низкофоновой комнаты (полное время измерения 8390 мин.).

На рис.5 приведены спектры фона, полученные в результате обработки формы импульсов, записанных с помощью ЦОС:

1) фон в низкофоновой комнате в дополнительной медной защите толщиной 10 см (полное время измерения 5420 мин.);

2) фон в низкофоновой комнате (полное время измерения 940 мин.). На последнем спектре видны пики γ -линий от распада ^{214}Bi (609 кэВ, 1120 кэВ+..., 1765 кэВ), являющегося дочерним продуктом распада ^{222}Rn . Как видно из Рис.5, спектр 1, дополнительная медная защита их существенно подавляет.

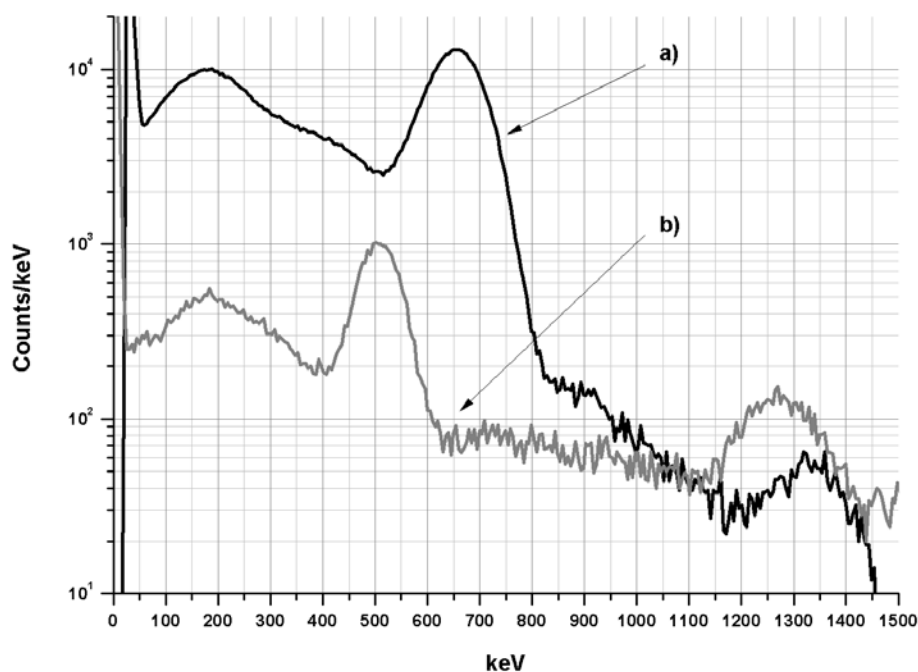


Рис. 3. Спектры калибровочных источников ^{137}Cs - (a) и ^{22}Na - (b).

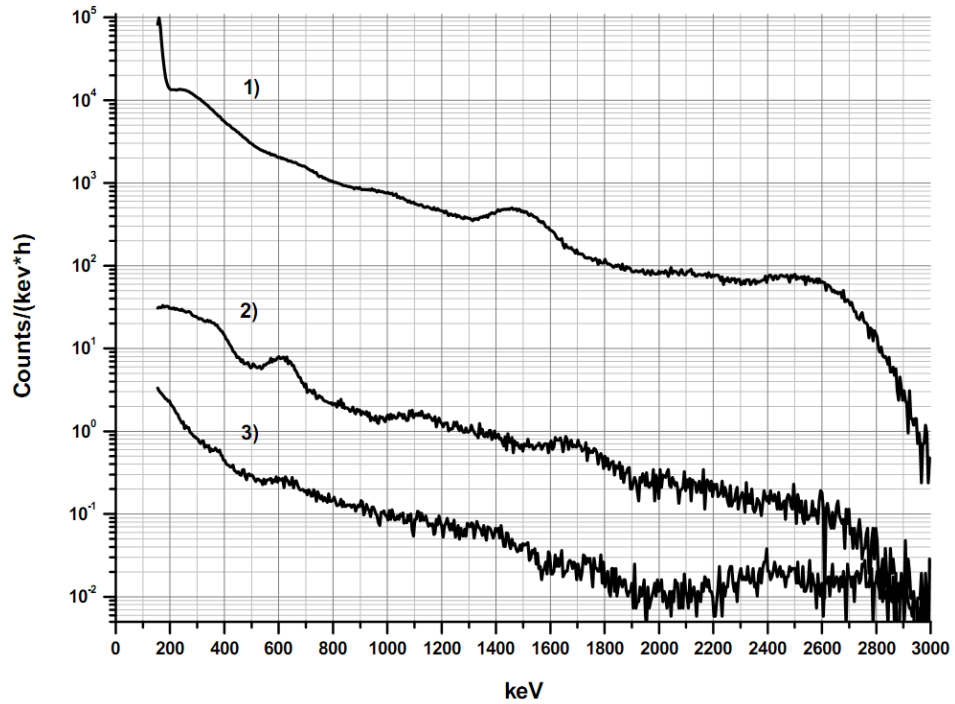


Рис. 4. Спектры фона ВТСД в разных условиях (Регистратор – «МАЭСТРО»): 1) фон в незащищённом подземном помещении камеры НЛГЗ-4900; 2) фон в низкофоновой комнате; 3) фон в н.ф. комнате в дополнительной медной защите.

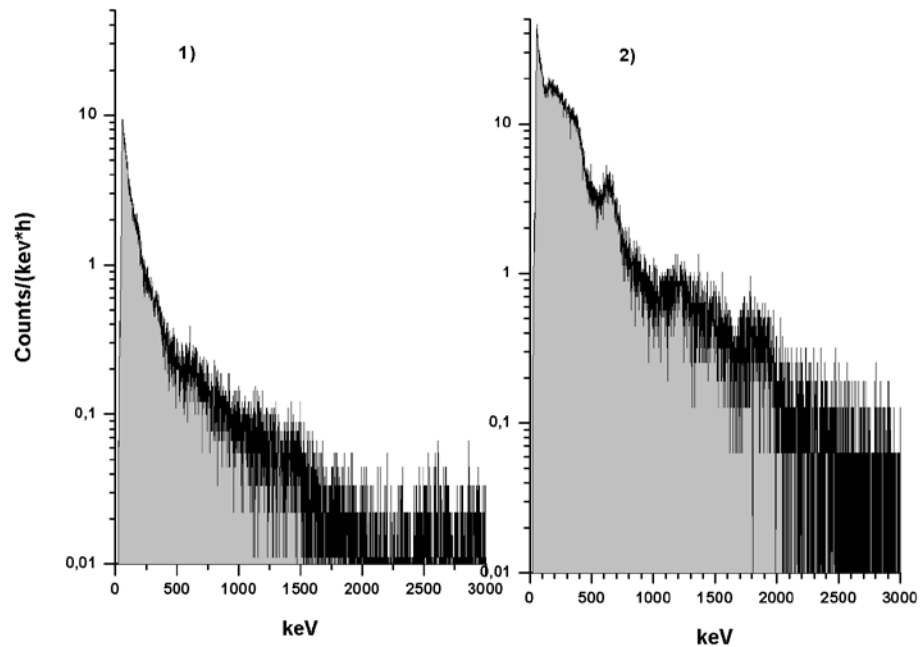


Рис. 5. Спектры фона по данным обработки формы импульсов (Регистратор – ЦОС): 1) фон в низкофоновой комнате в дополнительной медной защите; 2) фон в н.ф. комнате.

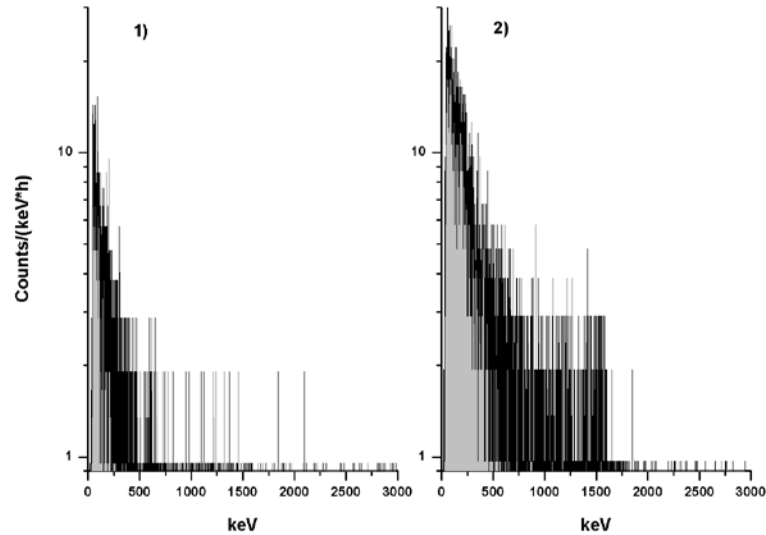


Рис. 6. Спектры фона ВТСД в разных условиях (Регистратор – ЦОС):

- 1) фон пустой «ванны»;
- 2) фон от головы человека, лежащего в «ванне».

Для оценки возможностей метода в реальных условиях внутри низкофоновой комнаты было собрано ложе типа «ванна» со стенами из ~8 см меди. Размеры открытой сверху прямоугольной полости равны 30x60x150 см. Между длинными бортами «ванны» перпендикулярно им расположен ВТСД в медной защите толщиной ~10 см, открытой снизу. ВТСД был расположен в торце «ванны» над местом, где при измерениях с человеком будет находиться голова. Был измерен фон детектора без человека (Рис. 6, спектр 1; полное время измерения – 63 мин.) и с человеком (Рис. 6, спектр 2; полное время измерений 62 мин.). Скорости счёта фона, соответствующие спектрам Рис. 4 и 5, приведены в Табл. 1. Для измерений с «МАЭСТРО» энергетический интервал равен 0.15-3.00 МэВ, для ЦОС – 0.02-3.00 МэВ. Для создания комфортных условий размещения человека требуется уложить на медь мягкую теплоизолирующую низкофоновую подстилку. В результате измерений на ВТСД в медной защите было установлено, что туристическая подстилка (каремат) не даёт видимого вклада в фон и может быть использована при низкофоновых измерениях.

Таблица 1. Фоновая скорость детектора в разных условиях (c^{-1}).

Регистрирующее устройство →	«МАЭСТРО»	ЦОС
Условия измерений ↓	Интервал 0.15-3.0 МэВ	Интервал 0.02-3.0 МэВ
1. Незащищённое помещение НЛГЗ-4900	1244±5	-
2. Защищённая н.ф. комната	3.47±0.07	2.27±0.07
3. п.2+10 см Си	0.25±0.08	0.24±0.05
4. «Ванна» без человека	-	0.47±0.06
5. «Ванна» с человеком	-	1.57±0.04

Избыточная скорость счёта при измерениях с регистратором «МАЭСТРО» в (п.2) связана с присутствием неионизирующего шума в начальных каналах от неустановленного источника. Фотография «ванны» и детектора без человека приведена на Рис. 7, с человеком – на Рис. 8.

**Рис.7.** Фото «ванны» и детектора.**Рис. 8.** Фото установки с испытуемым.

2.6. Как видно из сравнения результатов измерений фона «ванны» без образца и с образцом, помещение в «ванну» испытуемого увеличивает скорость счёта в ~три раза. На соответствующем спектре видно, что часть этого вклада создаётся излучением с энергией 1.46 МэВ от распада ^{40}K , входящего в состав естественного калия в число химических элементов, составляющих живой организм. При интерпретации полученного результата следует иметь в виду, что часть фона без образца может создаваться распадами радона в свободном объёме «ванны». В измерениях с образцом этот воздух вместе с радоном вытесняется телом и вклад собственного фона

установки в общую скорость уменьшится. В настоящее время влияние этого фактора не определено и полученное соотношение (эффект +фон)/фон можно считать нижней оценкой. При замене сцинтиллятора NaI(Tl) на CsI(Tl) для тех же размеров кристалла можно ожидать увеличения скорости счёта в ~ 1.5 раза, т.е. до $\sim 2.5 \text{ с}^{-1}$. За 1 час измерений будет получена статистика $\sim 10^4$ событий для образца площадью $\sim 200 \text{ см}^2$ или $\sim 50 \text{ см}^2 \text{ час}^{-1}$. При данном рассмотрении не учитывается изменение общего количества вещества из-за переменных размеров и плотности участка тела, находящегося в поле зрения ВТСД. Кроме этого ожидается, что на других участках тела может происходить существенное увеличение скорости счёта из-за увеличения содержания в специфических тканях захваченных радиоактивных изотопов. Полученная величина загрузки в настоящее время представляется достаточной для подтверждения первоначальных ожиданий и продолжения работы по созданию детектора большой площади для выполнения дальнейших исследований.

В ходе выполнения основных и вспомогательных работ п.2.1. были подготовлены и опубликованы четыре препринта ИЯИ РАН.

3. Краткий обзор работ выполненных на третьем этапе

Для достижения запланированных результатов в январе-июне 2012 г. были проделаны следующие работы:

С целью организации постоянного мониторинга потока тепловых нейтронов из грунта в подземной лаборатории НЛГЗ-4900 были подготовлены четыре сцинтилляционных детектора тепловых нейтронов площадью $\sim 0.5 \text{ м}^2$ каждый. Конструкция детектора, аналогичная описанной в работе [2], изображена на Рис. 9.

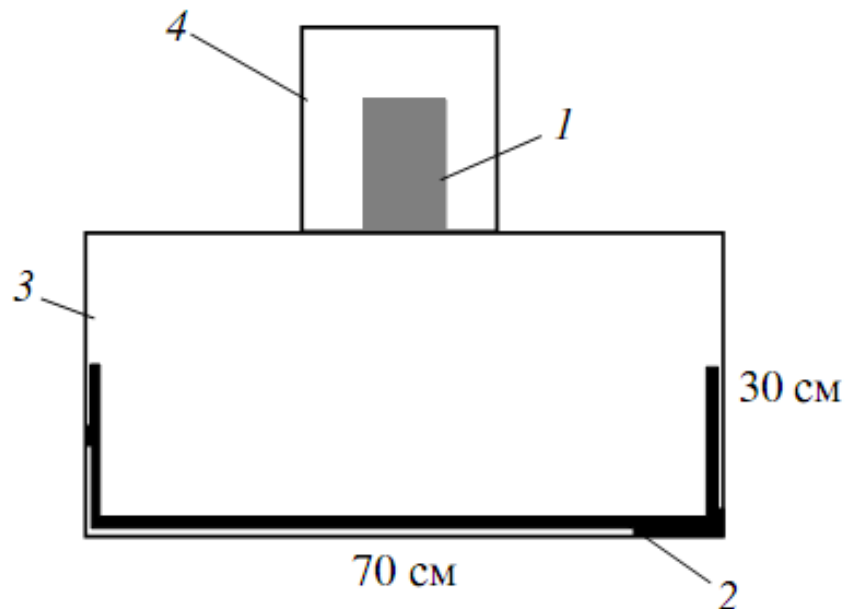


Рис. 9. Конструкция сцинтилляционного детектора тепловых нейтронов. 1 – фотоумножитель (ФЭУ), 2 – слой сцинтиллятора $\text{ZnS(Ag)+}^6\text{LiF}$, 3 – прямоугольный светонепроницаемый алюминиевый контейнер, 4 – стальной светонепроницаемый кожух.

Основные характеристики сцинтиллятора были исследованы нами с помощью тестового детектора на предыдущих этапах работы над Контрактом и изложены в публикации [3]. Детекторы установлены попарно друг над другом в двух этажерках. Импульсы снимаются с анода ФЭУ зарядочувствительным предусилителем (ЗЧУ) и их форма записывается

многовходовым цифровым осциллографом NI 5105 (ЦОС) в память персонального компьютера (ПК). Запуск ЦОС в режим записи осуществляется от любого из детекторов с помощью сигнала с выхода сумматора. Для управления режимом работы регистрирующей установки разработана специальная программа, описанная в п. 3. Перед началом работы установки в целом были проведены измерения амплитудных и фоновых характеристик каждого детектора по отдельности. Для измерения амплитудной характеристики на дно каждого детектора под ФЭУ устанавливался окном вверх сцинтилляционный кристалл NaI(Tl) размерами $d=60$ мм, $h=60$ мм. Он облучался γ -квантами с энергией 662 кэВ от источника ^{137}Cs . Импульсы подавались на вход осциллографа. Амплитуда импульсов для разных значений питающего высокого напряжения регистрировалась по экрану осциллографа и заносилась в таблицу. По таблице для каждого детектора выбиралось рабочее напряжение, при котором амплитуды импульсов соответствовали одной величине, выбранной в качестве стандартной. После этого каждый детектор по отдельности был помещён в низкофоновый контейнер лаборатории НЛГЗ-4900 и при заданном рабочем напряжении в течение ~ 100 час был измерен его собственный фон. Затем под детектор устанавливался самодельный нейтронный источник, описанный в [2], и измерялся суммарный эффект. Анализ различных распределений, полученных в результате обработки массивов оцифрованных импульсов, позволит определить область параметров, соответствующих эффекту от нейтронов.

Новая установка для Регистрации Тепловых Нейтронов («ТРИТОН») позволяет с хорошей статистической точностью построить длительный временной ряд значений потока тепловых нейтронов из скального грунта. Анализ такого ряда дает возможность уточнить представления о процессах, влияющих на скорость генерации нейтронов в грунте. Кроме этого, размещение детекторов друг над другом на известном расстоянии позволяет провести поиск гипотетических Заряженных Реликтовых Чёрных Дыр,

приходящих на детекторы с направлений, близких к вертикальным. Эффект от ЗРЧД ожидается в виде задержанных на несколько десятков микросекунд сигналов с обоих детекторов в этажерке.

3.2. С целью сохранения работоспособности низкофонового спектрометра «СНЕГ», входящего в состав УСУ, была проведена процедура восстановления вакуума в контейнере полупроводникового детектора. Работа на спектрометре была остановлена на ~ 10 дней. После вакуумирования уровень шумов существенно снизился и рабочие характеристики восстановились.

3.3.1. Для управления режимом накопления и «on-line»-визуализации информации на установке ТРИТОН разработана специальная программа. Программа включает в себя: 1) блок команд управления запуском ЦОС в режим цифровой записи импульсов по каналам 1-4 при появлении импульса в канале 5, куда подаётся сумма сигналов с четырёх детекторов; 2) блок команд записи цифровой информации от каналов 1-4 в память ПК; 3) блок команд быстрого просмотра записанной информации и получения значения амплитуды сигнала в канале сработавшего детектора; 4) блок команд построения индикаторных амплитудных спектров и распределения по времени скорости счёта. Дополнительно создана «off-line»-программа обработки накопленной цифровой информации. Программа позволяет строить различные спектры и распределения для импульсов, отобранных с заданными параметрами формы и амплитуды из полного набора данных.

3.3.2. В среде GEANT 4 создан модельный программный образ большого прямоугольного сцинтилляционного кристалла NaI(Tl) /CsI(Tl)/ размерами 70300×300 мм, рассматриваемого в качестве возможного детектора γ -излучения от распада радиоактивных изотопов в теле человека. Предполагается, что создаваемая программа позволит получить характеристики распределения интенсивности фотонов от регистрируемой частицы по ячейкам матричного фоторегистратора, размещённого на большой грани кристалла. Планируется изучить зависимость характеристик

этого распределения от координаты и характера взаимодействия γ -кванта, параметров кристалла и отражателя.

3.4. В результате осмысления опыта работы с моделью измерительного СТЕНДА, изготовленной на этапе 2 выполнения работ по проекту, была разработана конструкция СТЕНДА, позволяющая выполнить все необходимые тестовые измерения с использованием уже имеющегося сцинтилляционного детектора с низкофоновым кристаллом NaI(Tl) 80×250 в соответствии с уточнённой методикой. Схематический вид конструкции приведён на Рис. 10. В состав СТЕНДА входит медная низкофоновая защиты в виде ванны со стенками толщиной ~ 75 мм и размерами внутренней полости $600 \times 1800 \times 300$ мм. Вдоль длинных сторон снаружи ванны на опорах устанавливаются связанные между собой рельсовые направляющие, на которые устанавливаются ролики передвижной платформы. На платформе

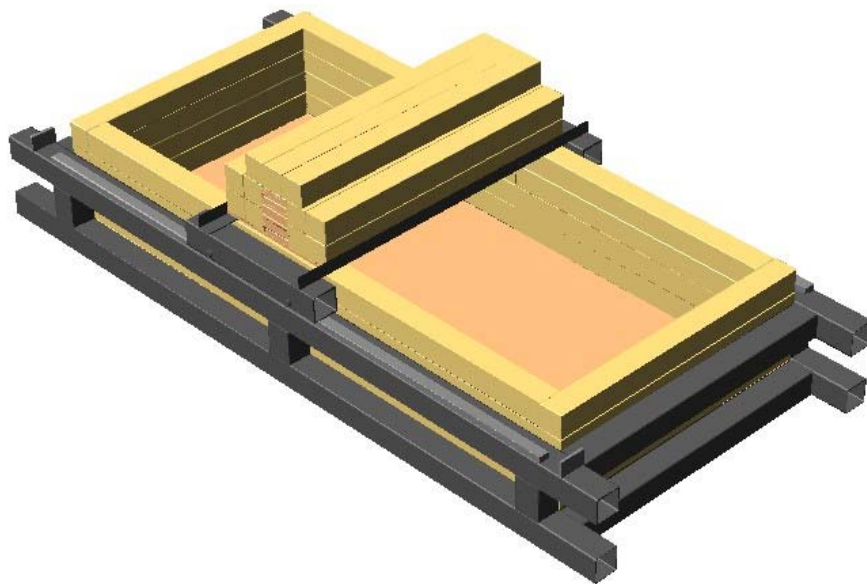


Рис. 10. Схематический вид конструкции низкофонового стенда для измерения радиоактивности тела человека.

размещается детектор и окружающая его медная защита. Сборка на платформе может перемещаться в нужное место над обследуемым участком тела человека. Прочность стенок ванны обеспечивается их креплением к рельсовой сборке. Конструкция была изготовлена из подручных материалов

и испытана. Было получено подтверждение эксплуатационной пригодности. Одновременно были окончательно определены возможные размеры медных деталей, тип и полная масса меди, требующейся для изготовления СТЕНДА вместо временно приспособленных медных деталей от других установок лаборатории. Если взять в качестве стандартного медный брусок размерами 75×75×900 мм, то его масса равна 45.208 кг. На изготовление дна ванны потребуется 16 брусков (723.33 кг), на боковые стены – 20 брусков (904.16 кг), на торцевые стены – 10 брусков (452.08 кг), на защиту детектора ($d = 100$ мм) – 10 брусков (2+2+4+1+1 – 452.08 кг), итого 56 штук. Полная масса меди - 2531.7 кг. Наименьшим содержанием радиоактивных примесей обладает медь марки М0Б. Согласно ответу на наш запрос стоимость указанных выше брусков из такой меди в ООО «УГМК-ОЦМ» составляет 717 600 руб/т без НДС и доставки. Стоимость меди М1, которая может иметь несколько большее содержание радиоактивных примесей, составляет с НДС 414 496 руб/т. согласно сайту www.ocm.ru/ru/business/production/price. В конечном итоге заключен договор на приобретение ~1 т меди М0Б.

3.5.1. В Обсерваторию обратилась фирма ОАО «ФОМОС-МАТЕРИАЛС» с запросом на проведение измерений радиоактивной чистоты ряда образцов компонентов шихты и готовых кристаллов $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$. Оформлен договор на проведение запрошенных измерений.

3.5.2. В соответствии с программой договора о сотрудничестве на УСУ были выполнены измерения радиоактивной чистоты различных материалов и детектора с рентгеновским ППД, составившие основу магистерской диссертации «Низкофоновая установка для измерения малых уровней активности» студента физического факультета КБГУ Конова Мурата Залимхановича, предполагаемой к защите в июле 2012 г.

4. Результаты работы на 4 этапе

4.1. Проведение отладочных измерений

4.1.1. В соответствии с найденным на третьем этапе работы конструктивным вариантом оформления защитной измерительной «ванны», предназначенной для размещения исследуемого субъекта, была проведена закупка части необходимого для её изготовления материала. При проведении торгов на покупку меди М0б в виде прутка 75x75x900 мм заявку на поставку подала только фирма ООО «ПСР». В её предложении вместо меди марки М0б обозначен германский аналог МКМ Cu OF M1T. Поскольку основным критерием выбора исходной марки меди являлся параметр радиоактивной чистоты, перед окончательным оформлением Договора для снятия нашей обеспокоенности по просьбе руководства фирмы были проведены измерения радиоактивной чистоты меди предлагаемой марки. Измерения образца массой 3150 г проводились в течение 300 час. на низкофоновом спектрометре 4НРGe, входящем в состав УСУ. В результате измерений были установлены только пределы на активность естественных радиоактивных элементов ^{40}K ($\leq 2.3 \cdot 10^{-3}$ Бк/кг), ^{208}Tl ($\leq 1.1 \cdot 10^{-4}$ Бк/кг), ^{214}Bi ($\leq 5.5 \cdot 10^{-4}$ Бк/кг), свидетельствующие о том, что р.а. чистота обследованной меди не хуже, чем у меди М0б [^{40}K ($\leq 1.1 \cdot 10^{-3}$ Бк/кг), ^{208}Tl ($\leq 2.5 \cdot 10^{-4}$ Бк/кг), ^{214}Bi ($\leq 1.1 \cdot 10^{-3}$ Бк/кг)]. Было дано письменное согласие на замену марки меди. В пределах выделенной суммы заключен Контракт на поставку 1125 кг меди МКМ Cu OF M1T (25 прутков).

4.1.2. Поскольку за период выполнения работ по четвёртому этапу целевая медь ещё не поступила, «ванна» СТЕНДА была изготовлена на базе полностью готового «проектного» каркаса с использованием плит листовой меди, снятых на время с работающих низкофоновых установок. Общий вид собранного изделия показан на рис.11.



Рис. 11. Фотография защитной «ванны» СТЕНДА.

Предварительное измерение фоновых характеристик ВТСД, размещённого в медной защите на платформе каретки над пустой «ванной», дало скорость счёта $0.205 \pm 0.001 \text{ с}^{-1}$ в интервале 0.05-3.0 МэВ и показало хорошее совпадение полученных значений с лучшей величиной уровня фона, достигнутой на проверочном этапе 2.5. ВТСД лежит на медном листе толщиной 8 мм.

4.2. Составление окончательной редакции методики основных измерений

На основании результатов полученных на предыдущих этапах (см. отчет за третий этап и краткие описания результатов в пунктах 2 и 3 настоящего отчета) была составлена окончательная методика основных измерений (см. Приложение 2). После этого были проведены основные измерения радиоактивного фона испытуемого. Имеется в виду, что, в отличие от пробных измерений предыдущего этапа, результаты измерений

(энергетические спектры в разных точках) были подвергнуты тщательному анализу.

4.3. Проведение основных измерений радиоактивного фона тела человека

Основные измерения по программе работ проводились в соответствии с «Методикой проведения исследовательской стадии измерений естественных уровней».

Схематическое расположение человека во время измерений показано на Рис. 12.

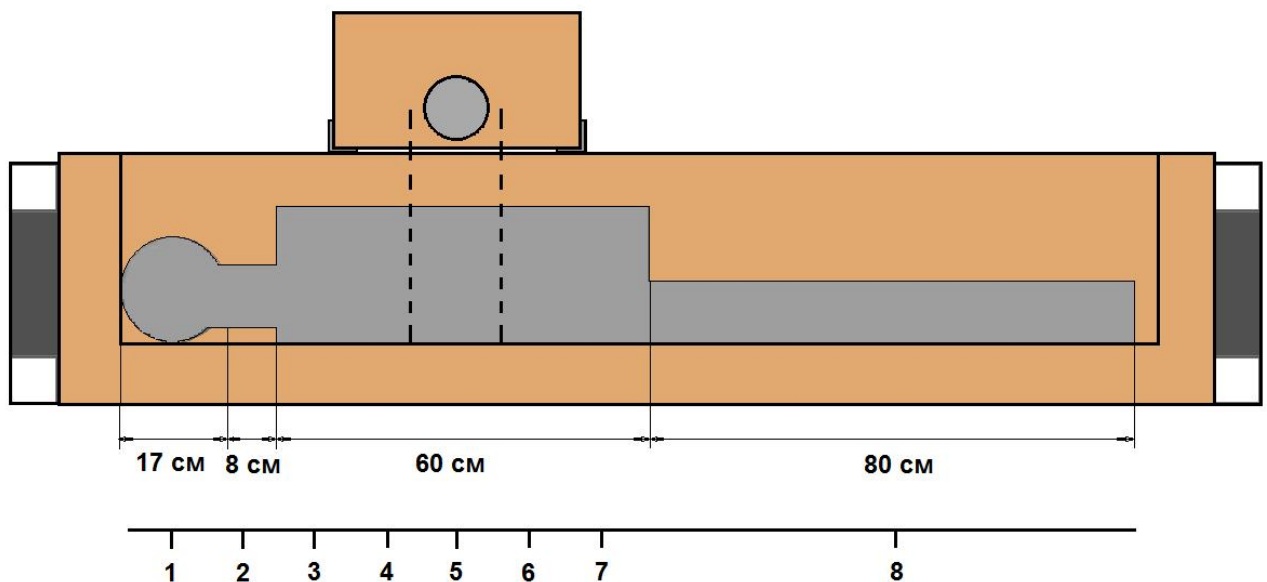
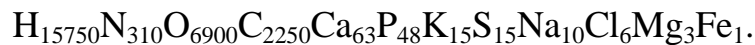


Рис. 12. Схематический вид продольного сечения «ванны» с модельным человеком.

Был измерен фон участков (образцов): 1. «голова» (полное время измерений 165 мин.), 2. «щитовидка» (150 мин.), 3. «верхняя часть груди» (115 мин.), 4. «сердце» (70 мин.), 5. «печень» (75 мин.), 6. «кишечник» (85 мин.), 7. «таз» (90 мин.), 8. «колени» (70 мин.), 9. «фон ванны без человека» (4220 мин. или 70.3 час.). Во время измерения фона головы руки испытуемого были расположены вдоль тела, при измерениях участков 2-7 руки были подняты в положение «за головой». При таких условиях тело

испытуемого может быть модельно представлено в виде Шар (голова) + цилиндр $\text{Ø}10 \text{ см}$, $h \text{ 8 см}$ (шея) + параллелепипед $60\text{см} \times 34\text{см} \times 22\text{см}$ (туловище) + параллелепипед $80 \text{ см} \times 20 \text{ см} \times 10 \text{ см}$ (ноги). Тогда объём модели (V_m) равен $V_m = 2.57 \text{ л} + 0.63 \text{ л} + 44.88 \text{ л} + 16.00 \text{ л} = 64.08 \text{ л}$. Было также принято, что средняя плотность биологической ткани ρ постоянна по объёму модели и равна 1 кл^{-1} . Состав ткани задан в соответствии с эмпирической формулой финского химика Лаури Суоранта:



Амплитудные спектры образцов 1-9, приведённые к времени измерений 1 час., показаны на Рис. 13. Статистическая обеспеченность данных в амплитудном спектре отдельного измерения относительно невысока, что затрудняет визуальную идентификацию присутствующих γ -линий. Однако видно, что спектры имеют близкие формы. Для улучшения статистики спектры образцов 3-7 были просуммированы. Суммарный спектр приведён на Рис. 14. На нём ясно различаются линии 186 кэВ (^{226}Ra ; $\eta = 3.28 \text{ \%/распад}$ [4]) и 1460 кэВ (^{40}K ; $\eta = 10.7 \text{ \%/распад}$ [5]).

В спектре также можно различить слабую линию 609 кэВ (^{214}Bi ; $\eta = 46.1 \text{ \% / распад}$ [4]). Параметр η представляет выходу γ -квантов на один распад соответствующего изотопа.

Для определения площадей пиков этих линий (n_{γ}) в спектрах различных образцов использована следующая процедура. Были выбраны энергетические «окна» (ΔN_O), в которые попадают не менее 95% площади соответствующего пика с учётом энергетического разрешения. Просуммированы все события, попавшие в «окно» ($n_{\gamma} + n_{\Pi} + n_{\Phi}$). Слева (ΔN_L) и справа (ΔN_{Π}) от каждого «окна» выбраны прилегающие энергетические интервалы, на которых находятся средние скорости счёта m_L и m_R , соответственно.

В предположении, что спектр фона в области пика линейно спадает от среднего значения в левом интервале до значения в правом интервале,

рассчитывается площадь (n_{Π}) фоновой подложки под пиком ($n_{\Pi} = m_R \cdot \Delta N_O + (m_L - m_R) \cdot \Delta N_O / 2 = (m_L + m_R) \cdot \Delta N_O / 2$) и вычитается из суммарной скорости счёта в исследуемом «окне». Из полученного значения ($n_{\Sigma} + n_{\Phi}$) вычитается определённая аналогичным образом скорость счёта (n_{Φ}) пикау -линии в соответствующем «окне» спектра образца «9» (фон «ванны»).

Были выбраны следующие диапазоны энергий:

- 1) 186 кэВ → левый интервал 105-120 кэВ, «окно» 121-250 кэВ, правый интервал 251-270 кэВ;
- 2) 609 кэВ кэВ → левый интервал 480-500 кэВ, «окно» 501-720 кэВ, правый интервал 721-760 кэВ;
- 3) 1460 кэВ кэВ → левый интервал 1200-1260 кэВ, «окно» 1261-1700 кэВ, правый интервал 1701-1800 кэВ.

Результаты вычислений приведены в Таблице 2, в которой также представлены значения эффективности регистрации излучения соответствующего участка тела и геометрический фактор «g» для этого участка. Геометрический фактор равен отношению объёма обследуемого участка модельного тела в полосе шириной 15 см к полному объёму модели. Параметр используется при вычислении удельных активностей в качестве нормирующего делителя, корректирующего, в первом приближении, различия в объёмах обследованных участков тела. Величина удельной активности (A) в единицах [Бк/кг] рассчитывалась по формуле $A = n_{\Sigma} / (3600 \cdot \varepsilon \cdot \eta \cdot g \cdot V_m \cdot \rho)$. Полученные значения для соответствующих изотопов также приведены в Таблице 2.

Из сравнения данных для конкретного выделенного изотопа на разных участках тела видно, что: 1) на достигнутом уровне статистики удельная активность отдельного изотопа в пределах одной статистической ошибки одинакова на разных участках тела; 2) наблюдается нарушение равновесия между активностью материнского ^{226}Ra и дочернего ^{214}Bi ; 3) активность ^{226}Ra в ~2 раза выше, чем активность ^{40}K .

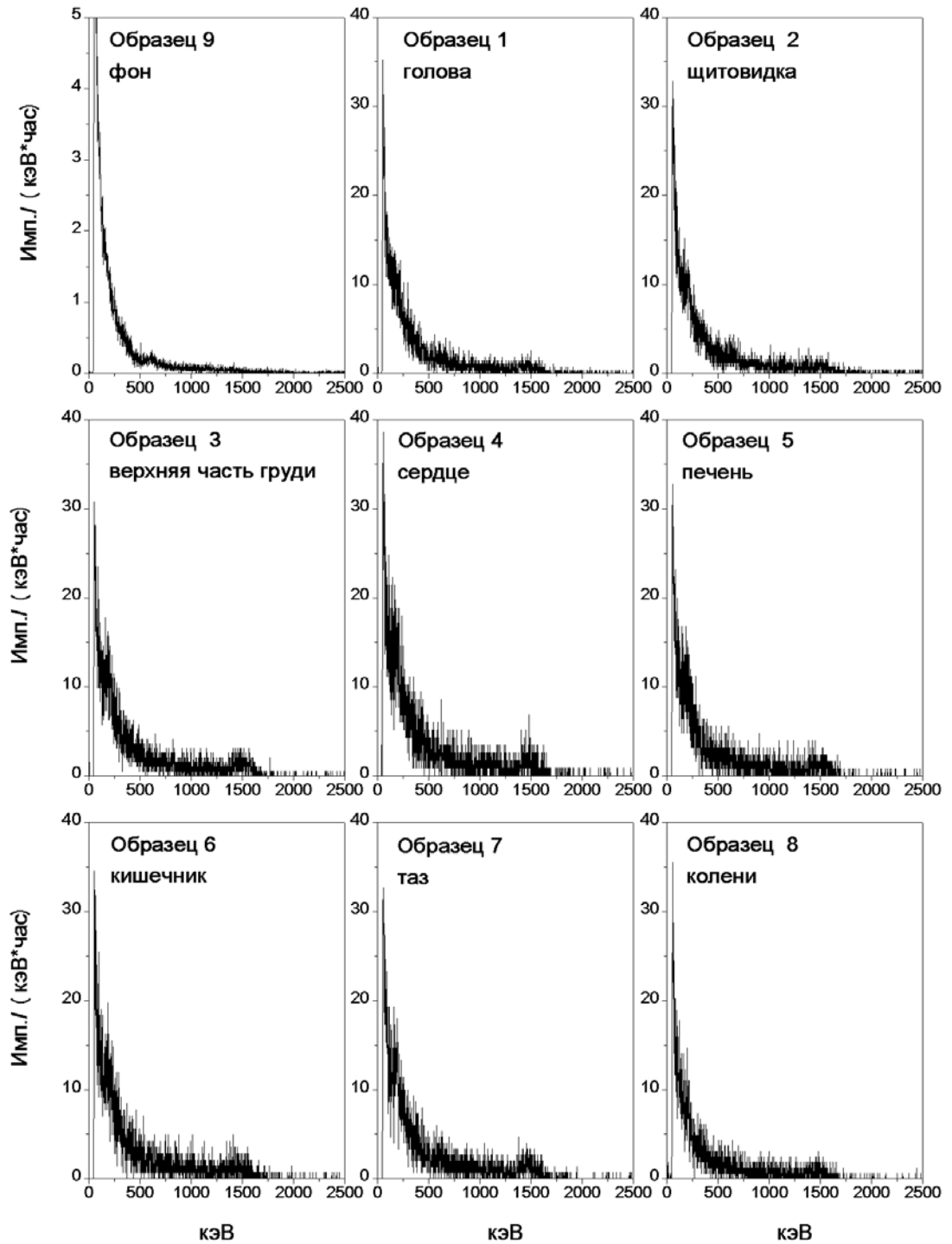


Рис. 13. Амплитудные спектры излучения от образцов «1»-«8» и спектр фона (образец «9»).

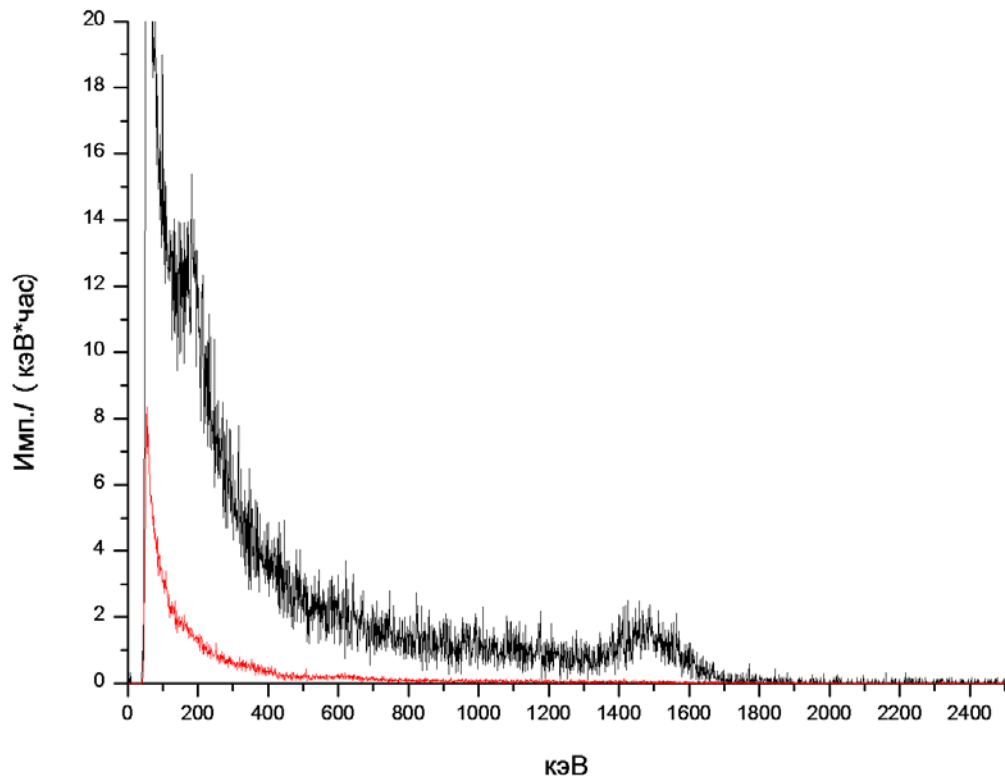


Рис. 14. Суммарный амплитудный спектр излучения от образцов «3»-«7» (верхняя кривая) и спектр фона (образец «9», нижняя кривая).

Для повышения точности оценки активности изотопов аналогичным образом был обработан суммарный спектр образцов «3»-«7». Были получены значения удельной активности (60 ± 25) Бк/кг (^{226}Ra), (-0.89 ± 0.65) Бк/кг (^{214}Bi) и (30.2 ± 2.3) Бк/кг (^{40}K). Исходя из удельной активности ^{40}K , учитывая период полураспада ($T_{1/2} = 1.26 \cdot 10^9$ лет [6]) и изотопный состав этого элемента (0.0118 % ^{40}K в естественном калии [6]), можно рассчитать полное количество калия в человеческом организме массой 64 кг. Получается величина, равная 61 г. В справочнике [7] приводится значение массовой доли калия в составе человеческого тела, равное 0.2%. Исходя из этой цифры, количество калия ожидается равным 128 г. Отличие в два раза можно объяснить неточным выбором ширины полосы обследуемого участка (15 см) при определении значений геометрического фактора «g». Возможно, что ширина завышена. Однако могут быть и другие (природные, физические)

причины такого отличия. На основные выводы отличие результатов в пределах фактора 2 влияния не оказывает. При необходимости значения удельной активности могут быть умножены на этот фактор.

Таблица 2. Скорости счёта γ -линий с энергиями 186 кэВ, 609 кэВ и 1460 кэВ от разных участков тела человека, эффективности регистрации (геометрический фактор (g)).

Образец	1	2	3	4	5	6	7	8	9(фон)
Энергия (кэВ), параметр↓	Скорость счёта, имп./час.								
<u>186 кэВ</u>	1213±35	1222±35	1339±37	1686±41	1244±35	1470±38	1442±38	1020±32	192±2
$n_{\alpha}+n_{\pi}+n_{\phi}$									
n_{π}	1124±130	1203±141	1196±140	1560±151	1144±130	1372±141	1320±141	1047±134	224±4
n_{α}	121±135	51±145	178±145	158±156	132±135	130±146	154±146	5±138	-32±4
ϵ	0.00152	0.00151	0.00189	0.00189	0.00189	0.00189	0.00189	0.00141	
^{226}Ra	337±376	76±217	71±58	63±62	53±54	52±58	62±58	10±280	
A (Бк/кг)									
<u>609 кэВ</u>	352±19	426±21	397±20	531±23	384±20	447±21	465±21	323±18	40.0±0.8
$n_{\alpha}+n_{\pi}+n_{\phi}$									
n_{π}	312±72	364±83	461±90	573±100	361±77	499±94	491±92	328±75	33.0±1.9
n_{α}	33±77	55±87	-71±94	-49±104	16±82	-59±96	-33±94	-12±77	7±2
ϵ	0.00148	0.00143	0.00182	0.00182	0.00182	0.00182	0.00182	0.00138	
^{214}Bi	6.7±15.7	6.2±9.8	-2.1±2.8	-1.4±3.1	0.5±2.4	-1.7±2.8	-1.0±2.8	-1.7±11.2	
A (Бк/кг)									
<u>1460 кэВ</u>	213±15	263±16	388±20	435±21	358±19	397±20	415±20	253±16	15.9±0.5
$n_{\alpha}+n_{\pi}+n_{\phi}$									
n_{π}	143±44	182±49	185±51	205±54	150±46	225±56	191±52	156±47	15.4±0.9
n_{α}	70±47	81±52	203±55	230±58	208±50	172±59	224±56	97±50	0.5±1.0
ϵ	0.00115	0.00106	0.00140	0.00140	0.00140	0.00140	0.00140	0.00101	
^{40}K	79±53	53±34	33±9	38±10	34±8	28±10	37±9	83±43	
A (Бк/кг)									
g	0.0312	0.0585	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.0468	-

Изотоп ^{214}Bi является дочерним продуктом распада ^{226}Ra в цепочке
 $[\dots \rightarrow ^{226}\text{Ra}(T_{1/2}=1608 \text{ лет, } \alpha\text{-распад}) \rightarrow ^{222}\text{Rn}(T_{1/2}=3.82 \text{ сут., } \alpha\text{-распад}) \rightarrow ^{218}\text{Po}(T_{1/2}=3.05 \text{ мин., } \alpha\text{-распад}) \rightarrow ^{214}\text{Pb}(T_{1/2}=26.8 \text{ мин., } \beta\text{-распад}) \rightarrow ^{214}\text{Bi}(T_{1/2}=19.9 \text{ мин., } \beta\text{-распад}) \rightarrow ^{214}\text{Po}(T_{1/2}=164.3 \text{ мкс., } \alpha\text{-распад}) \rightarrow ^{210}\text{Pb}(T_{1/2}=22.3 \text{ лет, } \beta\text{-распад}) \rightarrow ^{210}\text{Bi}(T_{1/2}=5.01 \text{ сут., } \beta\text{-распад}) \dots]$

распад) \rightarrow ^{210}Po ($T_{1/2}=138.4$ сут., α -распад) \rightarrow ^{206}Pb (стаб.)] [4] и в равновесии их активности одинаковы. В нашем случае по результатам для объединённой статистики образцов «3»-«7» активность ^{214}Bi на 95% уровне достоверности, не превышающая величины удвоенной статистической ошибки, равна 1.3 Бк/кг. Это значение в ~ 46 раз ниже активности ^{226}Ra . Столь большое различие можно объяснить наличием в живом организме эффективного механизма выведения из тканей изотопа ^{222}Rn , который является инертным газом. Эффект наблюдается впервые. Наличие этого эффекта многократно снижает уровень и риск облучения организма α -, β -, и γ -излучениями от распада внутренних радиоактивных изотопов, входящих в цепочку распадов ^{226}Ra .

Полученному в данной работе значению удельной активности ^{226}Ra (60 ± 25) Бк/кг соответствует полная масса радия в теле человека массой 64 кг равная $1.05 \cdot 10^{-7}$ г. Предельно допустимое содержание (п.д.с.) радия в организме человека (~ 70 кг) составляет $1 \cdot 10^{-7}$ г (0.1 мкКи) [11]. Видно, что измеренное значение практически совпадает с п.д.с. Причин, приводящими к возникновению ситуации близкой к критической с позиции медицинских рекомендаций, может быть несколько. На содержание радия в организме протестированного человека могли повлиять его образ жизни, рацион питания, загрязнение лёгких компонентами дыма от выкуриваемых сигарет. Однако по этим параметрам испытуемый мало чем отличается от среднестатистического работника БНО ИЯИ РАН. В источниках питьевой воды, пищи и воздухе Приэльбрусья также до сих пор не отмечали повышенных уровней содержания радия и радона. Второй возможной причиной возникновения формально критической ситуации может оказаться само значение п.д.с. Если при его определении использовались косвенные методы обнаружения по γ -излучению дочернего ^{214}Bi , то в силу приведённых выше особенностей, касающихся радона, значение п.д.с. может быть существенно заниженным. Для выяснения истинных причин наблюдаемого совпадения значений требуются дополнительные исследования.

4.4. Проведение оценки полученных результатов.

В среде GEANT 4 проведено моделирование сцинтилляционного отклика на поглощённый γ -квант большого прямоугольного сцинтилляционного кристалла CsI(Tl) размерами $70 \times 300 \times 300$ мм, рассматриваемого в качестве возможного детектора γ -излучения от распада радиоактивных изотопов в теле человека. Получены распределения интенсивности сцинтилляционных фотонов по ячейкам (30×30 мм) матричного фоторегистратора, размещённого на большой грани кристалла (количество ячеек – $10(x_i - \text{строка}) \cdot 10(y_j - \text{столбец})$), в зависимости от координат (x, y, z) точки фотопоглощения γ -кванта с энергией ~ 1 МэВ. На данном этапе расчётов предполагалось, что все фотоны N_{ij} , вышедшие с поверхности ячейки (ij) регистрируются. Тогда полное количество вышедших фотонов будет равно $\sum_{ij} (N_{ij}) = N$. Безразмерный параметр $\varphi_{ij} = N_{ij}/N$ в пределах статистических погрешностей разыгранного числа вышедших сцинтилляционных фотонов и поправки на длину трека вторичного фотоэлектрона не зависит от энергии поглощённого γ -кванта. Проводится сравнительный анализ значений φ_{ij} и находится ячейка с максимальным значением. Строятся распределения (гистограммы) значений φ_{ij} по ячейкам строки и столбца, на пересечении которых находится найденный максимум. Полученные гистограммы аппроксимируются гладкими кривыми. Положение максимумов на этих кривых принимается за координаты (x, y) точки поглощения γ -кванта. Точность определения координаты по плоскости для центральных ячеек улучшается с 30 мм (размер ячейки) до 10 мм. Для γ -квантов, поглощённых у стенок, точность определения координаты в направлении, перпендикулярном стенке, ухудшается до размера ячейки. Для определения координаты (z) рассмотрена возможность использования процедуры сравнения значений величин $(\sum_j \varphi_{ij})^{\max} - (\sum_j \varphi_{ij})^{\min}$ и $(\sum_i \varphi_{ij})^{\max} - (\sum_i \varphi_{ij})^{\min}$ с библиотекой этих величин, рассчитанных для разных сочетаний значений (x, y, z) с шагом по каждой координате 5 мм. Расчёт показывает, что точность определённой таким образом координаты (z) достигает ~ 10 мм.

На Рис. 15 в качестве примера приведено распределение параметра φ_{ij} при поглощении γ -кванта в точке сцинтиллятора с координатами (150, 150, 35) мм.

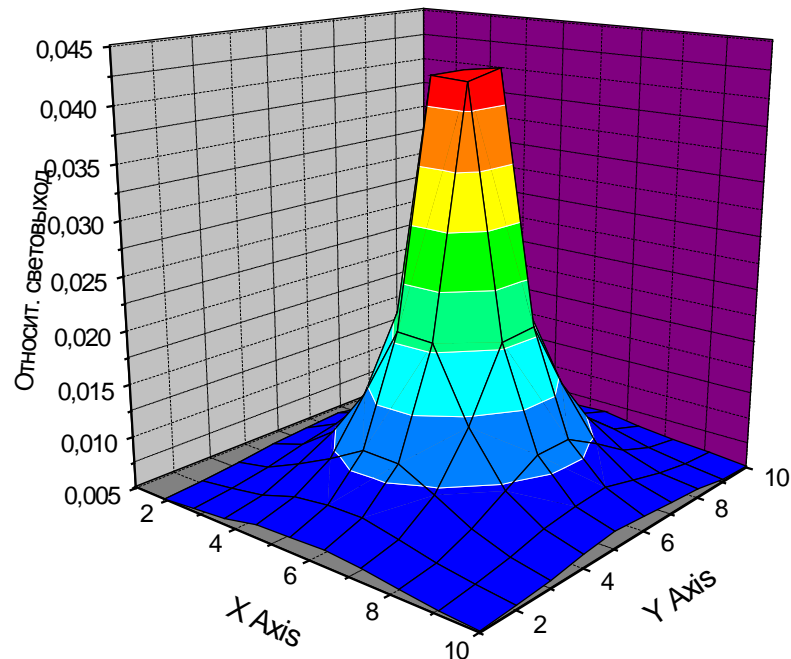


Рис. 15. Распределение параметра φ_{ij} по плоскости (x, y) при поглощении γ -кванта в точке сцинтиллятора с координатами (150, 150, 35) мм.

Как показано выше, основные γ -линии, излучаемые из организма, имеют энергии 186 кэВ и 1460 кэВ. Для детектирования первой линии достаточно детектора CsI(Tl) (плотность $4,5 \cdot \text{смг}^{-3}$ [8]) толщиной ~ 10 мм. При нормальном падении на такой толщине поглощается 85% излучения с энергией 186 кэВ и всего 10% с энергией 1460 кэВ [9]. Если для повышения эффективности регистрации γ -квантов с энергией 1460 кэВ увеличить толщину сцинтиллятора до 7 см (поглощение 49%), то одновременно в несколько раз увеличится фон в области 186 кэВ. Применение описанной выше методики для отбора событий, произошедших в первом сантиметре толщины сцинтиллятора, позволяет существенно снизить этот низкоэнергичный фон. Если ограничиться регистрацией линии 186 кэВ, то

для этой задачи могут быть использованы промышленные гамма-камеры [10], но изготовленные в низкофоновом исполнении.

Приведённых выше данных достаточно, чтобы оценить возможную скорость счёта линии 186 кэВ на единице поверхности детектора большой площади, приложенного непосредственно к поверхности тела обследуемого человека (например, испытуемый лежит на «бесконечном» в горизонтальной плоскости детекторе CsI(Tl) толщиной 20 мм). Оценка даёт значение ~ 3 отсчёт·см⁻²·час⁻¹. Предположим, что в распределении активности изотопа ²²⁶Ra по объёму тела имеются области с площадью проекции на обследуемую поверхность ~ 10 см², отличающиеся от соседних по поверхностной плотности потока γ -квантов на 10%. Тогда за ~ 5 час измерений такая область даст эффект $30 \cdot 5 = 150 \pm 12$ отсчётов (стат. ошибка 8.2%). Из сравнения оценок и допущений видно, что для области данной площади с аномальным потоком за указанное время измерений оценочный эффект может имитироваться статистическим разбросом результата. При сделанных предположениях за то же время измерений эффект на уровне 3 – стандартная статистическая ошибка) будет заметен для аномальной области большей площади (~ 100 см²).

В соответствии с заключёнными между БНО ИЯИ РАН и фирмой ОАО «ФОМОС-МАТЕРИАЛС» договорами на 2012-2013 гг. на низкофоновых спектрометрических установках УСУ проводились измерения радиоактивной чистоты ряда образцов компонент шихты и готовых кристаллов ⁴⁰Ca ¹⁰⁰MoO₄. Измерения продолжаются.

4.5. Подготовка заключительного отчета о НИР

В результате выполнения всех этапов НИР был создан, как и планировалось, стенд для измерения радиоактивности тела человека. Несколько неожиданным оказалось то, что уже первые измерения, проведенные на этом стенде, позволили получить очень важный физический

результат. Речь идет о гипотезе, сформулированной выше на основе анализа энергетических спектров гамма-излучения испытуемого: о наличии в живом организме эффективного механизма выведения из тканей изотопа ^{222}Rn , который является инертным газом. Этот эффект, наблюдавшийся впервые, может иметь исключительную важность для исследований метаболизма в теле человека. Соответственно, для медицинских целей он также может иметь большую ценность. Наличие этого эффекта, возможно, многократно снижает уровень и риск облучения организма α -, β -, γ -излучениями от распада внутренних радиоактивных изотопов, входящих в цепочку распадов ^{226}Ra . При подготовке итогового отчета были заново проанализированы результаты, полученные на предыдущих этапах. Кроме итогового отчета результаты работ, проводимых на установках и аппаратуре УСУ, послужили основой для магистерских диссертаций. Студентами-магистрантами физического факультета КБГУ были подготовлены и в июле 2012 **защищены две магистерские диссертации:**

1. Абаюков Алим Мусаевич, магистрант физического факультета КБГУ, БНО ИЯИ РАН, **2012 г.**, магистерская диссертация «Сравнительные характеристики сцинтилляционного и газонаполненного детекторов тепловых нейтронов в режиме долговременных измерений потока нейтронов от космических лучей». Направление 011200.68 "Физика", Магистерская программа "Астрофизика. Физика космических лучей и космоса".

2. Конов Мурат Залимханович, магистрант физического факультета КБГУ, БНО ИЯИ РАН, **2012 г.**, магистерская диссертация «Наземная низкофоновая установка с полупроводниковым детектором рентгеновского излучения для контроля радиоактивной чистоты материалов». Направление 011200.68 "Физика", Магистерская программа "Астрофизика. Физика космических лучей и космоса".

5. Заключение

За период выполнения работ поэтапно были получены следующие результаты:

1. 1.1. Проведён предваряющий анализ современной научной, нормативной, методической литературы по теме НИР. Открытой информации о проведении исследований естественной радиоактивности живого человека и результатах измерений не найдено.

1.2. Обоснована необходимость развития экспериментальной базы УСУ-БПСТ для достижения целей работы. Определён перечень установок, требующих модернизации, и ожидающих создания

1.3. Проведены патентные исследования, не обнаружившие запатентованных методов измерений естественной радиоактивности живого человека.

1.4. Проведены прецизионные измерения различных компонент фона ионизирующих излучений в обычных и низкофоновых боксах подземной лаборатории НЛГЗ-4900.

1.5. Начата закупка оборудования и материалов, предполагаемых к использованию в составе СТЕНДа.

1.6. Осуществлёна частичная модернизация оборудования УСУ.

2. 2.1. Проведены измерения фоновых характеристик материалов, предполагаемых к использованию в составе СТЕНДа.

2.2. Изготовлен низкофоновый сцинтилляционный детектор с кристаллом NaI(Tl) 80×250 мм.

2.3. Разработана и собрана регистрирующая установка, проведены лабораторные исследования характеристик электронных блоков сбора и обработки данных.

2.4. Выполнена проверка рабочих и фоновых характеристик детекторов.

2.5. Составлена и уточнена в натурных испытаниях методика основных измерений.

3. 3.1. С целью развития экспериментальной базы УСУ-БПСТ изготовлена и запущена в работу в НЛГЗ-4900 новая установка ТРИТОН для мониторинга потока тепловых нейтронов из грунта.

3.2. Регулярно проводились регламентные и ремонтные работ по поддержанию работоспособности УСУ-БПСТ.

3.3. Подготовлены программы накопления и обработки информации для новой установки ТРИТОН и для СТЕНДа.

3.4. Завершено изготовление измерительного СТЕНДа.

3.5. Для сторонних организаций с использованием УСУ выполнен ряд измерений уровней радиоактивной загрязнённости различных материалов.

4. 4.1. Проведены отладочные измерения оборудования и аппаратуры СТЕНДа.

4.2. Составлена окончательная редакция «Методики основных измерений...».

4.3. Проведены основные измерения радиоактивного фона тела человека.

4.4. Выполнен анализ полученных результатов.

5. В амплитудном спектре, полученном в результате усреднения результатов измерений пяти участков тела, были обнаружены две яркие γ -линии, имеющие энергии ~ 186 кэВ и 1460 кэВ. Высокоэнергичная линия испускается при распаде естественного радиоактивного элемента ^{40}K . Низкоэнергичная линия была отнесена к источнику ^{226}Ra , входящему в ряд распадов естественного радиоактивного изотопа ^{238}U . При такой идентификации этой линии возникла нестандартная ситуация в интерпретации данных. Были получены значения удельной активности (60 ± 25) Бк/кг (^{226}Ra), (-0.89 ± 0.65) Бк/кг (^{214}Bi) и (30.2 ± 2.3) Бк/кг (^{40}K). При нормальных условиях активность ^{214}Bi и ^{226}Ra должна быть одинакова (вековое равновесие). В нашем случае в активность ^{214}Bi не менее чем в ~ 46

раз ниже активности ^{226}Ra . Столь большое различие можно объяснить наличием в живом организме эффективного механизма выведения из тканей изотопа ^{222}Rn , который является инертным газом. Эффект наблюдается впервые при условии, что идентификация источника выполнена правильно. Наличие этого эффекта многократно снижает уровень и риск облучения организма α -, β -, и γ -излучениями от распада внутренних радиоактивных изотопов, входящих в цепочку распадов ^{226}Ra .

Если в качестве детектора излучения из организма человека в ложе установки СТЕНД использовать плоскую матрицу полупроводниковых детекторов из сверхчистого германия ($\rho = 5.46 \text{ г/см}^3$) толщиной 2 см (поглощается ~65% нормально падающих γ -квантов с энергией 186 кэВ [8]), то за 5 часов измерений элементарный детектор размерами 6х6 см зарегистрирует не менее $(6 \cdot 6) \cdot 5 \cdot 0.65 = 349$ γ -квантов. Из этих отсчётов может быть составлена мозаичная «фотография» обследованного участка тела, соответствующего полной площади детектора.

На закупки оборудования и материалов истрачено 19470000 рублей или 61% от доступного объема финансирования (после вычета затрат на сопровождение проекта). Эти расходы включали закупку элементов детекторов (фотоэлектронные умножители), регистрирующей системы (электронные платы и отдельные компоненты), а также материал для низкофоновой защиты (более тонны особо чистой электролитической меди, - почти половина всех затрат).

6. Литература

1. Ф. Райнес, Нобелевская лекция по физике.
2. В.В.Алексеевко, Ю.М.Гаврилюк, Д.М.Громушкин, Д.Д.Джаппуев, А.У.Куджаев, В.В. Кузьминов, О.И. Михайлова, Ю.В. Стенькин, В.И.Степанов. «Связь вариаций потока тепловых нейтронов из земной коры с лунными периодами и сейсмической активностью». Физика Земли, № 8, 2009, 91-100.
3. В.В.Алексеевко, Ю.М.Гаврилюк, В.В.Кузьминов. «Особенности характеристик сцинтилляционного детектора тепловых нейтронов $[ZnS(Ag)+^6LiF]$ в различных условиях измерений». Москва, Препринт ИЯИ РАН 1303/2011, октябрь 2011 г., 8 стр.
4. «Схемы распада радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения». Публикация 38 МКРЗ. Ч.2., Кн. 2. Москва, Энергоатомиздат, 1987.
5. «Схемы распада радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения». Публикация 38 МКРЗ. Ч.1., Кн.1. Москва, Энергоатомиздат, 1987.
6. Справочник под ред. И.К. Кикоина «Таблицы физических величин». Москва, Атомиздат, 1976.
7. В.П.Машкович, А.В.Кудрявцева. «Защита от ионизирующих излучений». Справочник. Москва, Энергоатомиздат, 1995.
8. М.Е.Глобус, Б.В.Гринёв. «Неорганические сцинтилляторы. Новые и традиционные материалы». АКТА (Харьков, Украина), 2001.

9. Э.Сторм, Х.Израэль. «Сечения взаимодействия гамма-излучения». Москва, Атомиздат, 1973.
10. Г.А.Зубовский. «Радиоизотопная диагностика в педиатрии». Москва, Медицина, 1983.
11. Радий (Ra).mht, Medical-Enc.ru (Медицинская энциклопедия). Интернет-информация, 2012

7. Приложение 1.

Список публикаций (перечень за все время выполнения контракта):

1. N.S. Khaerdinov, A.S. Lidvansky, Specific Features of Variations of Cosmic Ray Muons during Thunderstorms, Proc. 32 ICRC, Beijing, China, 2011, paper icrc0279.
2. V. B. Petkov, M.G. Kostyuk, R.N. Novoseltseva, Yu.F. Novoseltsev, L.V. Volkova, P.S. Striganov, M.M. Boliev, Temperature variations of high energy muon flux, Proc. 32 ICRC, Beijing, China, 2011, paper icrc0685.
3. V.A. Kozyarivsky, A.S. Lidvansky, T.I. Tulupova, Reconstruction of the Direction of True Anisotropy of Cosmic Rays at Energy of about 100 TeV, Proc. 32 ICRC, Beijing, China, 2011, paper icrc00281.
4. V.B. Petkov, J. Szabelski, A.N. Gaponenko, I. Alikhanov, High energy muons in EAS and primary composition around the knee, Proc. 32 ICRC, Beijing, China, 2011, paper icrc0093.
5. Ю.М.Гаврилюк, А.М.Гангапшев, А.М.Гежаев, В.В.Казалов, В.В.Кузьминов, С.И.Панасенко, С.П.Якименко. «Рабочие характеристики низкофоновой лаборатории НЛГЗ-4900». Москва, Препринт ИЯИ РАН 1301/2011, октябрь 2011г., 13 стр.
6. В.В.Алексеев, Ю.М.Гаврилюк, В.В.Кузьминов, С.С.Раткевич. «Результаты измерений гелиевым пропорциональным счётчиком СН-04 нейтронного фона на объектах БНО ИЯИ РАН». Москва, Препринт ИЯИ РАН 1302/2011, октябрь 2011 г., 14 стр.
7. В.В.Алексеев, Ю.М.Гаврилюк, В.В.Кузьминов, «Особенности характеристик сцинтилляционного детектора тепловых нейтронов $[ZnS(Ag)+^6LiF]$ в различных условиях измерений», Москва, Препринт ИЯИ РАН 1303/2011, октябрь 2011 г., 8 стр.
8. И.Р.Барабанов, Л.Б.Безруков, П.Н.Васильев, Ю.М.Гаврилюк, В.В.Кузьминов, С.П.Якименко, «Определение содержания γ -активных

- изотопов в образце угля», Москва, Препринт ИЯИ РАН 1304/2011, октябрь 2011 г., 8 стр.
9. I. Alikhanov, Exclusive production of pseudoscalar mesons in neutrino–photon interactions, *Physics Letters B*, 706 (2012) 423-426.
 10. I. Alikhanov, Production of heavy vector particles in interactions of leptons with the massless gauge bosons, *Physics Letters B*, 710 (2012) 149-153.
 11. Ju.M. Gavriljuk, A.M. Gangapshev, A.M. Gezhaev, V.V. Kazalov, V.V.Kuzminov, S.I. Panasenko, S.S. Ratkevich, S.P. Yakimenko“ Working characteristics of the New Low-Background Laboratory (DULB-4900, Baksan Neutrino Observatory)”, arXiv: 1204.6424 [physics.ins-det] 01 May 2012. Направлена в журнал *Nucl. Instr. and Meth. A*.
 12. И.Р.Барабанов, Л.Б.Безруков, Ю.М.Гаврилюк, В.И.Гуренцов, В.В.Кузьминов, С.П.Якименко, Содержание γ -излучающих изотопов в образце угля как метод идентификации месторождения, *Атомная энергия*, том 113, вып. 3, стр. 180-183 (2012).

8. Приложение 2. Методика основных измерений.

Уточнённая методика проведения исследовательской стадии измерений естественных уровней радиоактивности организма человека

1. Содержание работы и назначение методики.

Разработана идеология и схема опыта; созданы механическая конструкция, измерительная установка, радиоэлектронная аппаратура; сформулированы требования к характеристикам всех составляющих компонентов и последовательность операций при проведении пробного обследования тела живого человека. Целью работы является определение уровня радиоактивного излучения от распада естественных радиоактивных элементов, накопившихся в тканях, расчёт их содержания и оценка пригодности метода для широкого практического использования.

2. Описание методики.

Естественная радиоактивность человека создаётся распадами радиоактивных изотопов, попадающих в организм из окружающей природной среды и накапливающихся в нём. К таким изотопам относятся: 1) долгоживущий изотоп ^{40}K , содержащийся на уровне $1,1 \cdot 10^{-4}$ в составе естественного калия; 2) долгоживущий изотоп ^{238}U и его дочерние продукты распада; 3) содержащийся в воздухе изотоп инертного газа ^{222}Rn (дочерний продукт ^{238}U) и его дочерние продукты; 4) долгоживущий изотоп ^{232}Th и его дочерние продукты распада; 5) космогенные изотопы ^3H (тритий), ^{14}C (радиоуглерод) и другие. Перечисленные изотопы попадают в организм: 1) с пищей, питьём, вдыхаемым воздухом; 2) в результате диффузии через кожу; 3) в результате осаждения на открытые части тела с пылью, аэрозолями, осадками. Часть распадов этих изотопов сопровождается испусканием α -квантов или тормозных квантов, которые слабо поглощаются в тканях и легко выходят за пределы тела человека, где они могут быть зарегистрированы подходящим детектором. Для исследовательских целей

наиболее подходящими являются низкофоновые сцинтилляционные детекторы на основе кристаллов NaI(Tl) или CsI(Tl). Удельная интенсивность потока γ -квантов от тела человека в ~ 1000 раз меньше, чем от грунта. Поэтому без экранирования фона от окружающих материалов исследование собственной радиоактивности организма невозможно. Для проведения таких измерений исследовательская установка окружается низкофоновой защитой. Для подавления компоненты фона, создаваемой космическими лучами, защита размещается под большой толщей земли. На достигнутом уровне снижения фона основной компонентой становится фон от распада изотопа ^{214}Bi , постоянно образующегося в воздухе в цепочке распадов ^{222}Rn . Для устранения этой компоненты наиболее оптимальным является очистка от радона всего воздуха в лаборатории. Если это неосуществимо, то принимаются меры для максимального снижения его количества в рабочем объеме установки, дополнительно увеличивается толщина защитных стенок установки со стороны больших объемов воздуха. Принимаются меры для снижения осаждения заряженных атомов изотопа ^{214}Bi на поверхность тела исследуемого индивидуума и внутренних поверхностей рабочего объема установки при подготовке сеанса измерения (увлажнение воздуха, обработка одежды антистатиком и др.). Перед началом измерений может потребоваться двухчасовая пауза для того, чтобы основная часть уже осевших атомов распалась.

Исследовательский стенд размещён в низкофоновой комнате подземной лаборатории НЛГЗ-4900 (толща грунта над установкой 4900 м в.э.) с внутренними размерами $2,5 \times 3,2 \times 2,5$ м³. Стены комнаты изготовлены из 250 мм полиэтилена + 1 мм Cd + 150 мм высокочистого Pb (внутренний слой). Фон в помещении в интервале энергий 0,3-3,0 МэВ снижен в ~ 300 раз. Распады изотопа ^{214}Bi в воздухе увеличивают фон в ~ 2 раза.

Стенд представляет собой установленный на полу открытый сверху ящик, изготовленный из меди толщиной ~ 85 мм. По боковому периметру снаружи стенок установлен слой свинца толщиной 75 мм для защиты от

излучения ^{214}Bi из воздуха. Внутренние размеры ящика равны 300x600x1700 мм. Испытуемый ложится на дно полости на низкофоновый теплоизолирующий коврик. Над выбранным для опробования участком тела устанавливается горизонтальный сцинтилляционный детектор на основе низкофонового кристалла NaI(Tl) размерами $d = 80$ мм, $h = 250$ мм (ось детектора перпендикулярна большой оси полости). Детектор со всех сторон кроме нижней закрыт медной защитой толщиной 150 мм. Сборка установлена на платформе, которая может перемещаться на четырёх роликовых колёсах вдоль тела испытуемого в выбранную позицию.

Сигналы с детектора снимаются зарядочувствительным предусилителем и подаются на вход цифрового осциллографа в составе персонального компьютера. Измерения в одной позиции продолжаются 1,5-2,0 час. Затем детектор смещается на 15 см и измерения повторяются. Всего на длине тела человека ростом 170 см измерения проводятся в 10 точках. Полное чистое время измерений – 15-20 час. Весь цикл выполняется в течение трёх-четырёх дней. После измерений с образцом в тех же точках проводятся измерения фона пустого ящика. Каждое измерение длится 3 час. Возможно измерение с низкофоновым муляжом-манекеном. При обработке информации для каждой позиции строится спектр участка тела, спектр фона. Находятся скорости счёта по интервалам 0,1-1,0 МэВ; 1,0-1,8 МэВ; 1,8-3,0 МэВ для обоих спектров и находится собственный фон тела в виде разницы значений. Для каждой точки находится средний объём соответствующего участка тела. Полученные по интервалам значения фона нормируются на объём. В результате для каждого энергетического интервала строится гистограмма распределения по длине тела удельной интенсивности излучения.

В результате моделирования характеристик измерительной установки и условий измерений определяется эффективность регистрации излучений. На основе всей совокупности данных рассчитывается распределение активности различных изотопов по длине тела. Полученная информация предназначена

для дальнейшего анализа специалистами радиационной медицины. Делаются выводы о возможности и целесообразности проведения таких обследований. В случае доказанной полезности данной методики разрабатывается и создаётся полномасштабная установка, имеющая сверху и снизу сборки сцинтилляционных детекторов на всю площадь тела человека, представляющую интерес для исследования. Такая установка позволит выполнить полное обследование за ~2 час. и построить распределение содержания радиоактивных элементов по различным органам. Предварительно необходимо провести исследование возможности получения пространственной информации о координатах радиоактивного источника по данным от матричного толстого сцинтилляционного детектора (трёхмерная γ -камера).