

ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СТРОНЦИЯ-90 В ПОТОКЕ ПО ЧЕРЕНКОВСКОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ. ОБЗОР

Ю. А. Сапожников, С. Н. Калмыков

Химический факультет Московского государственного университета
имени М. В. Ломоносова, 119991, г. Москва

Описаны детекторы для длительного и непрерывного определения стронция-90 в потоке по черенковскому излучению, возбуждаемому высокоэнергетическими β -частицами дочернего иттрия-90. Показаны преимущества такого подхода по сравнению с другими способами определения стронция-90 в водах, загрязненных этим радионуклидом.

Ключевые слова: стронций-90, иттрий-90, черенковский детектор, β -излучение.

FLOW-THROUGH DETECTORS FOR MEASUREMENT OF STRONTIUM-90 VIA CHERENKOV RADIATION. REVIEW / Yu. A. SAPOZHNIKOV, S. N. KALMYKOV // Detectors for the long-term and continuous measurement of strontium-90 in flow via Cherenkov radiation, generated by high energy β -particles of daughter yttrium-90, are described. Advantages of this approach are demonstrated in comparison with other techniques of strontium-90 determination in waters, contaminated by this radionuclide.

Key words: strontium-90, yttrium-90, Cherenkov detector, β -radiation.

Введение

В результате чрезвычайных ситуаций, таких, как авария на АЭС «Фукусима-1» в Японии (11 марта 2011 г.), возникает необходимость быстрого и эффективного контроля радиоактивности природных вод и технологических растворов. Обычно для этой цели применяются радиохимические методы анализа, достаточно трудоемкие и требующие значительных затрат времени, или используется погружаемая γ -спектрометрическая аппаратура, обладающая относительно невысокой эффективностью в области высоких энергий γ -квантов, наиболее характерных для радионуклидов, поступающих в окружающую среду при аварийных ситуациях.

При авариях на ядерных энергетических установках в окружающую среду поступают сравнительно короткоживущие радионуклиды и пары радионуклидов, в которых дочерние продукты обладают очень короткими периодами полураспада и высокими энергиями β -излучения. Например, в таких парах, как ^{106}Ru – ^{106}Rh и ^{144}Ce – ^{144}Pr дочер-

ние радионуклиды испускают β -частицы с максимальными энергиями около 3,5 и 3 МэВ, соответственно. Для измерения β -частиц с такими значениями максимальных энергий оптимальным средством измерения является черенковский детектор, который в обычных (не аварийных) условиях эффективно используется для определения стронция-90 в водах по дочернему иттрию-90.

В 1903 г. Эльстер и Гайстел впервые наблюдали с помощью увеличительного стекла свечение (вспышки-сцинтилляции) ZnS, облучаемого α -частицами. В том же году Крукс изобрел спинтарископ для наблюдения сцинтилляций с помощью увеличительного стекла.

После изобретения фотоумножителей (ФЭУ) и их использования для измерения сцинтилляций под действием ионизирующего излучения Х. Кальман, И. Брозер и Л. Херфорд интенсивно развивали это направление исследований.

Диссертация Л. Херфорда «Флуоресценция органических веществ под действием альфа-излучения, быстрых электронов и гамма-лучей», выполненная под руководством Х. Кальмана в Институ-

те физической химии и электрохимии им. Кайзера Вильгельма, была защищена 13 сентября 1948 г. в Техническом университете Берлин-Шарлоттенбург. Первая публикация по этой работе вышла в 1950 г. [1].

Необходимость измерения низкоэнергетических β -излучателей, таких, как тритий и углерод ^{14}C , способствовала чрезвычайно быстрому развитию жидкостно-сцинтилляционного (ЖС) метода измерения радиоактивности, основанного на определении числа и яркости световых вспышек, возбуждаемых ионизирующим излучением в жидком сцинтилляторе (ЖС смеси).

Была разработана и быстро совершенствовалась ЖС аппаратура, обладавшая высокой эффективностью регистрации α - и β -излучений. Чувствительность стандартной ЖС аппаратуры стала настолько высокой, что она позволяла регистрировать черенковское излучение, возникающее в воде под действием высокоэнергетического β -излучения [2].

Наиболее полный обзор, описывающий различные аспекты возможных применений эффекта Черенкова, представил в 2003 г. М. Л' Аннунциата [3]. Однако измерения черенковского излучения в потоке не нашли отражения в этой работе.

В то же время ряд преимуществ для измерения стронция-90 в потоке именно по черенковскому излучению очевиден:

- средой для измерения радиоактивности по черенковскому излучению в потоке может быть обычная вода, т. е. нет необходимости в добавлении жидких сцинтилляторов, которые токсичны, горючи и дороги; выбор условий смешиваемости водных растворов с жидкими сцинтилляторами тоже зачастую является сложной задачей;

- задача измерения упрощается из-за того, что ни α -излучение, ни низкоэнергетическое β -излучение, ни электроны, образующиеся при взаимодействии низкоэнергетического γ -излучения с водой, не генерируют черенковское излучение в воде;

- при измерениях черенковского излучения химическое гашение отсутствует, хотя могут быть сложности, связанные с изменением показателя преломления измеряемой жидкости или с ее окраской;

- нет проблем, связанных с приготовлением препаратов для измерения и с возникающими при ЖС измерениях отходами органических веществ.

В настоящем обзоре рассматривается возможность реализации и оптимизация длительных непрерывных измерений стронция-90 в потоке, основанных на измерении черенковского излучения.

Свойства системы стронций-90 – иттрий-90

Стронций-90 – радионуклид с периодом полураспада 28,9 лет, продукт деления ^{235}U и ^{239}Pu (выход около 6 %). Чистый β -излучатель ($E_{\beta\text{-max}} = 0,548$ МэВ). При его распаде образуется другой чистый β -излучатель – ^{90}Y ($E_{\beta\text{-max}} = 2,28$ МэВ) с периодом полураспада 64 часа. Из соотношения периодов полураспада ^{90}Sr и ^{90}Y следует возможность установления между ними векового радиоактивного равновесия. Средняя энергия β -излучения ^{90}Sr равна примерно 0,2 МэВ, а ^{90}Y – 0,934 МэВ, что существенно выше порога, начиная с которого возможна генерация черенковского излучения в такой прозрачной диэлектрической среде, как вода.

^{90}Sr обладает высокой радиотоксичностью, так как способен накапливаться в костях, в которых он замещает кальций. В результате концентрирования ^{90}Sr в костях такой важный кроветворный орган, как костный мозг, подвергается облучению β -частицами ^{90}Sr и ^{90}Y .

^{90}Sr весьма подвижен в окружающей среде и имеет высокую биологическую доступность. Отсюда становится очевидным, насколько актуален мониторинг ^{90}Sr в местах, где возможно его поступление в окружающую среду, от таких источников, как атомные реакторы, предприятия по переработке ядерного топлива и хранению высокоактивных отходов.

При измерениях общей β -активности в водных пробах обычно принимается, что ^{90}Sr и ^{90}Y находятся в состоянии векового равновесия.

В природных водных средах встречаются пары материнских и дочерних радионуклидов, сильно различающихся по своим физико-химическим свойствам, например, ^{238}U и ^{234}Th . В водах океана уран в виде карбонатных комплексов хорошо растворим в воде, в то время как торий склонен к ассоциации со взвешенным веществом [4]. Это приводит к заметным сдвигам радиоактивного равновесия между ^{238}U и ^{234}Th .

В паре ^{90}Sr – ^{90}Y трудно ожидать сдвига радиоактивного равновесия в масштабах океана. Попытки наблюдать этот сдвиг в пресноводных системах не выявили значимых различий в распределении этих радионуклидов в Великих Озерах, США [5]. Орландини с соавторами [6] нашел некоторые сдвиги равновесия между ^{90}Sr и ^{90}Y в пруду-охладителе ядерного реактора в Саванна Ривер, использовавшемся по назначению в 1961–1964 гг. Однако динамика водного потока и химические взаимодействия в воде, в принципе, могут нарушать состояние равновесия.

Предполагается, что катионные формы ^{90}Sr и ^{90}Y могут взаимодействовать с отрицательно заряженными поверхностями минералов. Равновесие может нарушаться также в зонах ремедиации (например, непосредственно ниже градиента экстрагируемого ^{90}Sr или процесса откачки и концентрирования).

Известно множество радиохимических методик определения ^{90}Sr в природных водах [7]. Все они подразумевают дискретный (по месту и времени) отбор проб и их последующий анализ в условиях стационарной или полевой лаборатории. Эти методики трудоемки, сравнительно длительны по исполнению и дороги.

Представляется весьма целесообразной разработка методов и средств для непрерывного и длительного мониторинга этого радионуклида в водных средах.

Наиболее перспективным методом измерения ^{90}Sr в природных водах в потоке является измерение по черенковскому излучению, возбуждаемому β -излучением дочернего ^{90}Y .

Эффект Черенкова

П. А. Черенков в 1934 г. [8] в результате длительных наблюдений установил, что при движении заряженных частиц в воде или других прозрачных диэлектрических средах со скоростью, превышающей фазовую скорость света в данной среде, возникает свечение. Теория этого явления была разработана И. М. Франком и И. Е. Таммом [9], и в 1958 г. П. А. Черенкову, И. М. Франку и И. Е. Тамму была присуждена Нобелевская премия по физике.

Условие возникновения черенковского излучения имеет вид $v > c/n$, где v – скорость движения заряженной частицы в прозрачной диэлектрической среде, c – скорость света, а n – показатель преломления среды.

Черенковское свечение является когерентным излучением диполей, образующихся в результате поляризации среды пролетающей заряженной частицей, и возникает при возвращении этих диполей (поляризованных атомов) в исходное неполяризованное состояние. Если частица движется медленно, то диполи успевают поворачиваться в ее направлении. Поляризация среды при этом симметрична относительно координаты частицы. В этом случае излучения отдельных диполей при возвращении в исходное состояние гасят друг друга. При движении частицы со «сверхсветовой»

скоростью за счет запаздывающей реакции диполей они преимущественно ориентируются в направлении движения частицы. Итоговая поляризация оказывается несимметричной относительно местоположения частицы, и излучение диполей – нескомпенсированным [10].

Фотоны черенковского излучения испускаются под углом θ к направлению движения частицы, причем величина этого угла определяется соотношением

$$\cos \theta = 1/\beta n, \quad (1)$$

где $\beta = v/c$. Это соотношение легко понять на основе принципа Гюйгенса (рис. 1). Действительно, огибающая световых волн для частицы, двигающейся со скоростью $v > u$, представляет собой конус, вершина которого совпадает с положением частицы в данный момент (точка P' на рис. 1), а нормали m к образующим конуса показывают направление распространения черенковского света. На рис. 1 показано, как частица, проходившая в момент времени t через точку P , породила сферическую электромагнитную волну, которая за время τ распространилась от точки P на расстояние $R = u\tau = c\tau/n$. За то же время частица, двигающаяся со скоростью $v > u$, прошла путь $v\tau > R$ и оказалась в точке P' . Волна от точки P' еще не успела распространиться в веществе. Конус $AP'A$ – граница области, занятой черенковской электромагнитной волной (ее фронт), к моменту $t + \tau$. Угол θ – это угол между перпендикуляром, опущенным из точки P на образующую конуса AP' , и линией движения частицы (прямой PP'). Очевидно, косинус этого угла равен отношению длин отрезков R и PP' , т. е. $\cos \theta = u/v = 1/\beta n$.

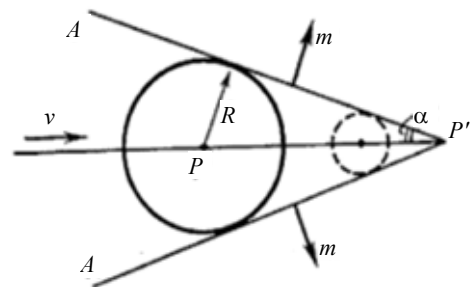


Рис. 1. Геометрия черенковского излучения.
Угол $\theta = 90^\circ - \alpha$ [4]

Доля энергии частицы, превращаемая в черенковское излучение, мала по сравнению с ее ионизационными потерями. Число фотонов, излучаемых на 1 см пути, в зависимости от среды колеблется от нескольких единиц до нескольких сот.

Это излучение можно наблюдать визуально и регистрировать с помощью фотопленки или ФЭУ. На цветной фотопленке, расположенной перпендикулярно направлению движения частицы, излучение, выходящее из радиатора, имеет вид кольца сине-фиолетового цвета.

Зависимость угла излучения θ от β позволяет, определяя этот угол, найти скорость и энергию частицы. Эта возможность способствует широкому распространению черенковских детекторов в физике частиц высоких энергий и астрофизике.

Энергетический порог, начиная с которого возможна генерация черенковского излучения в такой прозрачной диэлектрической среде, как вода с показателем преломления $n = 1,33$, равен 0,267 МэВ. Интенсивность черенковского излучения быстро возрастает с ростом энергии бета-частиц (табл. 1).

Таблица 1

Эффективность регистрации некоторых радионуклидов по черенковскому излучению

Радионуклид	Максимальная энергия бета-излучения, кэВ	Эффективность регистрации, %
^{90}Sr	540	1,5
^{40}K	1330	36
^{32}P	1700	50
^{90}Y	2270	70

Эффективность регистрации по черенковскому излучению зависит от значения максимальной энергии β -частиц, испускаемых ядрами данного β -излучателя и от формы спектра β -излучения, т. е. от того, какая доля β -частиц приходится на высокоэнергетический участок энергетической шкалы.

Черенковские фотоны испускаются в ультрафиолетовой и голубой областях спектра (интенсивность пропорциональна $1/\lambda^2$) в конусе вдоль направления движения частицы. Число черенковских фотонов, испускаемых высокоэнергетическими бета-частицами в воде, мало по сравнению со сцинтилляционным выходом пластиковых сцинтилляторов, но все-таки измеримо. Например, бета-частицы ^{90}Y с максимальной энергией (2,28 МэВ) могут образовывать около 700 черенковских фотонов видимого света (400–600 нм) в воде, в то время как β -частицы со средней энергией (934 кэВ) образуют около 200 черенковских фотонов. Это позволяет отрезать большую часть интерферирующих сигналов.

С помощью черенковского детектора можно регистрировать частицы с энергиями вплоть до 100 ГэВ.

Черенковский счетчик позволяет эффективно выделять высокоэнергетические релятивистские частицы на уровне большого фона низкоэнергетических частиц, что позволяет широко использовать черенковские детекторы в физике высоких энергий и в астрофизике [11, 12].

Разрешающее время черенковских счетчиков не превышает 10^{-9} с.

Измерения стронция-90 в потоке

Первая работа, в которой описывался прибор для измерения β -радиоактивности в потоке морской воды по черенковскому излучению, была опубликована в 1984 г. [13].

Черенковский детектор представлял собой трубу из нержавеющей стали с внешним диаметром 90 мм и толщиной стенок 1 мм, в которую с помощью фланцев введены 2 фотоэлектронных умножителя ФЭУ-110. В зависимости от длины отрезка трубы и расстояния между фотокатодами ФЭУ чувствительный объем детектора мог изменяться от 300 до 1700 мл (рис. 2). Морская вода через патрубки, вваренные во фланцы, могла непрерывно прокачиваться через детектор.

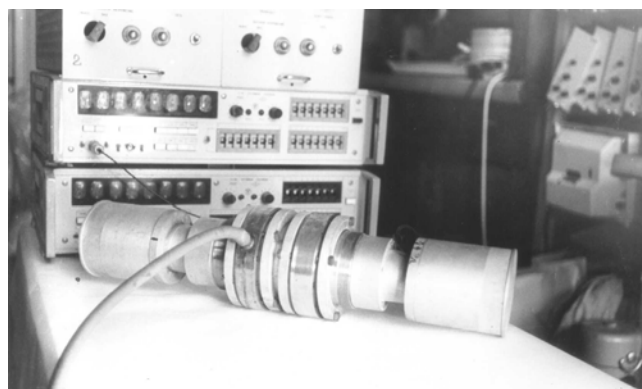


Рис. 2. Внешний вид черенковского детектора [13]

Для предотвращения свечения планктонных организмов в чувствительном объеме детектора морская вода пропусклась через фильтрующие патроны с мембранными фильтрами, обеспечивающими достаточно высокую скорость стерилизующей фильтрации.

Спираль из черной пластмассы предотвращала попадание света в чувствительный объем детектора.

Импульсы с анодов ФЭУ усиливались и поступали через формирователь на схему совпадений с разрешающим временем ~ 25 нс, что позволило в значительной степени подавить собственные шумы ФЭУ.

Блок-схема черенковского детектора для измерения радиоактивности морской воды приведена на рис. 3. В лабораторных условиях была продемонстрирована возможность определения ^{38}Cl , ^{24}Na и ^{32}P по черенковскому излучению в пробах морской воды, облученных с помощью нейтронного источника. Идентификация осуществлялась по периодам полураспада перечисленных радионуклидов. Эффективность регистрации ^{40}K данным прибором достигала 13 %.

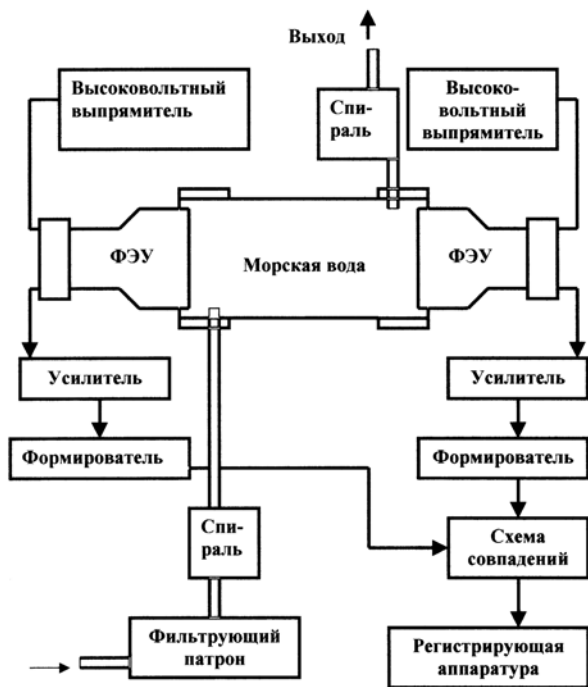


Рис. 3. Блок-схема черенковского детектора [13]

Боуэр с соавторами [14] разработал и реализовал несколько похожую версию проточного черенковского детектора, внешний вид которого показан на рис. 4. Объем резервуара 0,765 л заполняется пробой морской воды. Два или более ФЭУ просматривают воду через кварцевые окна и собирают черенковский свет, продуцируемый бета-частицами. Отражающее покрытие на внутренних стенках камеры помогает собирать свет от черенковских событий. Покрытие состояло из 3 мм слоя тефлона, который имеет коэффициент отражения более 95 % в большей части видимого спектра.

Было установлено, что эффективность улучшается в 4 раза при использовании кварцевых окон и тефлонового отражателя вместо первоначального варианта с акриловыми окнами и белым ПВХ в качестве диффузного отражателя. Улучшение связано с повышенными отражательными

свойствами тефлона и более низким ослаблением света с малыми длинами волн в кварцевых окнах. Акриловые окна часто содержат ультрафиолетовый ингибитор, блокирующий светопрозрачность ниже 400 нм. Проницаемость кварцевых окон остается высокой вплоть до 260 нм, количество черенковских фотонов, достигающих ФЭУ, практически вдвое превосходит значение, наблюдаемое для пластиковых окон.



Рис. 4. Внешний вид черенковского детектора Боуэра с соавторами [14]

Описываемый вариант прибора не был оптимальным для собирания черенковских фотонов, поскольку они испускаются не изотропно, как в случае сцинтилляций, а, скорее, в направлении полета частиц. Эта конкретная геометрия была выбрана как пример дизайна, подходящего для использования при измерениях в скважинах (когда прибор должен был обладать сравнительно небольшим диаметром). Благодаря этой «жесткой» геометрии свет, испускаемый в результате распада ^{90}Y , должен, по меньшей мере, один раз переотражаться тефлоновыми стенками детектора, или β -частицы должны многократно рассеяться так, чтобы эмитируемый ими световой конус начинался в направлении одного из ФЭУ и заканчивался в противоположном направлении, что маловероятно. Новый дизайн в будущем должен обеспечивать повышенный светосбор путем использования многих ФЭУ по обе стороны объема детектора [14].

Ожидаемый фон детектора, работающего на воде, имеет три составляющих:

- высокоэнергетические бета- или гамма-излучатели в воде,
- внешние высокоэнергетические гамма-излучатели,
- космическое излучение.

В данном приборе свинцовый домик был использован для снижения фона детектора. Четыре

дьюма свинца было расположено под детектором и вокруг него и 2 дюйма – над ним, чтобы защитить его от ^{40}K и от высокоэнергетического гамма-излучения (вплоть до энергии 2,6 МэВ от ^{208}Tl). Свинцовая защита снизила фон от загрязнений бетона в полу и стенах приблизительно до 2 Гц.

Электронная схема представлена на рис. 5. ФЭУ работали при предельно низком положении дискриминаторов, заметно ниже одноэлектронного уровня. Электронная схема была настроена так, чтобы дискриминировать сигналы от обоих ФЭУ, связанные с тепловым шумом. Чтобы снизить космический фон, импульсы с очень большими амплитудами, возникавшие в обоих ФЭУ, регистрировались как «космические». При вычитании «космических» из общего числа совпадений скорость счета, связанная с прохождением космических лучей, снижалась до минимума, однако космические лучи, проходящие через края или углы резервуара, считались. Детектор калибровался с использованием раствора ^{90}Sr известной концентрации, находящегося в вековом равновесии с ^{90}Y .

Детектор был заполнен бидистиллированной водой для измерения фона. Типичный фон совпадений был около 1 Гц. Дистиллированная вода использовалась, чтобы снизить концентрацию хлора в воде, который мог спонтанно флуоресцировать (химическая реакция), что приводило бы к увеличению фона.

Порог образования черенковского излучения в воде равен приблизительно 270 кэВ, так что небольшой процент материнского ^{90}Sr (25 %) мог возбуждать черенковское излучение, но эти события слишком редки для регистрации их схемой совпадений. Таким образом, большая часть света связана с ^{90}Y . Комптоновские электроны от внутренних и внешних гамма-источников и фотоэффект тоже могут образовывать импульсы черенковского излучения. Энергетический порог для

фотонов, продуцирующих вторичные электроны, испускающие черенковское излучение, составляет около 450 кэВ.

Существует несколько источников фона для черенковского детектора на основе воды, включая высокоэнергетические гамма- и бета-излучатели (^{60}Co , ^{137}Cs), перечисленные в табл. 2. Другие простые низкоэнергетические бета- и альфа-излучатели (тритий, ^{99}Tc , ^{228}Th , ^{241}Am и др.) не генерируют черенковское излучение в воде. Если установить предел дискриминации ~ 1 МэВ, по-видимому, эти радионуклиды будут вырезаны, по крайней мере, на 99 %, в то время как эффективность регистрации бета-частиц ^{90}Y останется на достаточно высоком уровне. Поскольку продукт распада ^{238}U протоактиний-234 является высокоэнергетическим бета-излучателем примерно с такой же максимальной энергией, как и ^{90}Y , его вклад в значение фона должен вычитаться независимо (возможно с использованием NaI(Tl) детектора, включенного вместе с черенковским, если это нужно). Высокоэнергетические гамма-излучающие радионуклиды, внешние по отношению к детектору, такие, как ^{40}K и ^{208}Tl , тоже вносят свой вклад в фон детектора, хотя пассивная защита и дискриминация на уровне 1 МэВ должны минимизировать роль этих внешних источников. Внешнее бета-излучение не достигает детектора.

Космическое излучение, если не принимать мер, может быть причиной относительно большого вклада в фон детектора. Правда, ожидается, что импульсы от космического излучения должны быть гораздо больше, чем от ^{90}Sr (^{90}Y), и высокий уровень дискриминации позволит оценить роль космического излучения. Ожидается также, что относительно высокая стабильность потока космического излучения, пассивная защита и активное вето с использованием внешнего пластикового сцинтиллятора или секционирование его на две

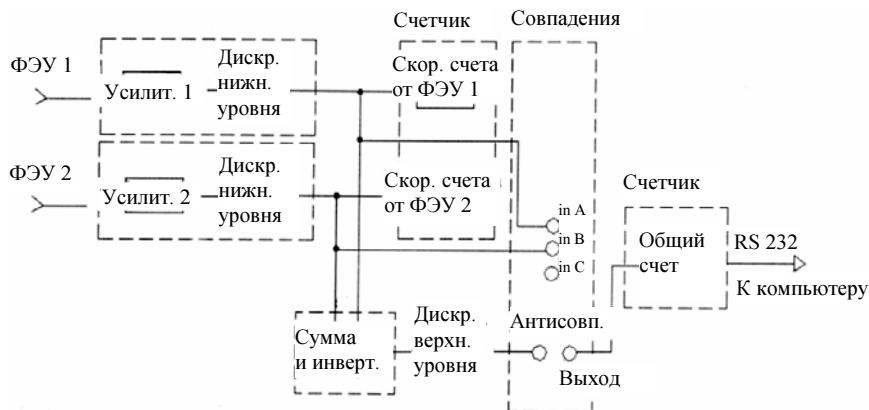


Рис. 5. Блок-схема детектора Боуэра с соавторами [14]

Оценка основных составляющих фона черенковского детектора [14], определяющих минимально детектируемую концентрацию ^{90}Sr

Источник фона	Оцениваемая скорость счета	Метод снижения фона	Вклад в скорость счета после подавления фона
Темновой ток ФЭУ	10–100 Гц на каждом ФЭУ	Необходима схема совпадений импульсов от ФЭУ	> 0,1 Гц
Космическое излучение	~ 3 Гц	Верхний уровень порога электроники запрещает прохождение импульсов большой амплитуды	~ 1 Гц
Фон окружающей среды (например, ^{40}K , ^{228}Th)	~ 2 Гц	Использовать 5–10 см свинца для защиты от γ -квантов высокой энергии	< 0,1 Гц

Всего ~ 1 Гц

половины с запрещением событий, происходящих одновременно в двух половинах, может существенно снизить космический фон. Большая часть космического излучения, как ожидается, может создавать большие импульсы черенковского излучения в воде (около 166 фотонов видимого спектра на см) и, следовательно, в описываемом детекторе большая часть космического излучения создаст сигналы, превышающие 1000 фотонов (по сравнению с максимумом 700 фотонов для ^{90}Y). В табл. 3 и на рис. 6 показаны данные, полученные с этим детектором. Ясно, что активности $^{90}\text{Sr} (^{90}\text{Y})$, концентрация которых значительно превышала допустимый уровень для питьевой воды (DWL, US DOE), этот детектор позволяет оценить за несколько минут измерения. Измерение DWL тоже возможно, но для достижения погрешности $4,65\sigma$ необходимо затратить около 3000 с. Описываемый прибор позволяет получить эффективность регистрации до 37 %, но это зависит от выбранного порога дискриминации электроники. Детектор с большими ФЭУ на каждом торце рассчитан (см. ниже) на существенное повышение чувствительности.

Этот детектор [14] имеет объем, в 30 раз превышающий объемы, измеряемые в обычных приборах для ЖС измерений. Авторы [14] не видят причин, почему бы не довести это соотношение до 100. Увеличение размеров детектора может потребовать использования большего количества умножителей для собирания большей части света, насколько это возможно. Увеличение больше, чем в 100 раз, не может быть полезным из-за ослабления в воде видимых и УФ фотонов.

Увеличение размеров детектора может привести к повышению фона, но, поскольку время для

Таблица 3

Результаты измерения $^{90}\text{Sr} (^{90}\text{Y})$ с черенковским детектором.

Длительность каждого измерения 6000 с

Концентрация, пКи/л	Средняя скорость счета, Гц	Статистическая погрешность, Гц
0	1,06	0,01
17	1,24	0,01
34	1,44	0,02
51	1,61	0,02
68	1,76	0,02
102	2,11	0,02
136	2,47	0,02
170	2,88	0,02

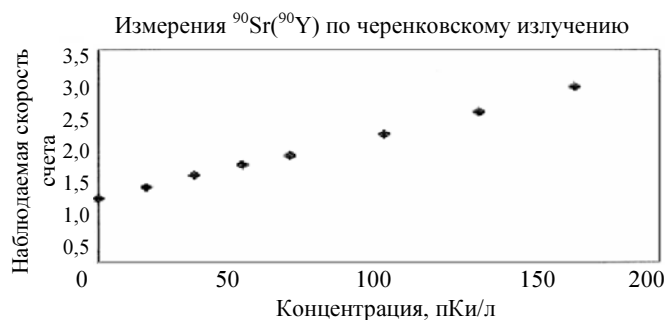


Рис. 6. Результаты определения концентрации $^{90}\text{Sr} (^{90}\text{Y})$ с черенковским детектором. Указаны только погрешности, связанные со статистикой регистрации радиоактивности [14]

достижения минимальной детектируемой активности пропорционально S^2/B , где S – число зарегистрированных импульсов, а B – число фоновых импульсов, ожидается, что большой контейнер

с водой окажется способен достигать DWL за несколько минут.

Другим улучшением этого детектора может стать резкое снижение космического фона. Некоторая часть космического излучения не проходит через весь объем воды, но проходит через углы или края детектора, что приводит к появлению импульсов, таких же, как и от ^{90}Sr (^{90}Y). Даже эти импульсы могут быть вырезаны активной защитой, окружающей детектор. Альтернативно авторы рассматривают двойной объем детектора, который вычитает космическое излучение, основываясь на наличии сигнала в обеих половинах объема детектора. Детектор большого объема, регистрирующий большой поток космического излучения, попадающего в его чувствительный объем, может позволить более легко идентифицировать сигналы как космические, так как космическое излучение может проходить через большие объемы воды и, следовательно, создавать во много раз большее количество фотонов.

Дальнейшие работы будут связаны с исследованием влияния мешающих радионуклидов, особенно при опускании погружаемых приборов в скважину. Наземные версии имеют более высокие значения MDC, поскольку они имеют гораздо больший объем и позволяют использовать более толстую свинцовую защиту и активную антикосмическую защиту. Даже скважинные погружаемые приборы могут позволить некоторую активную и пассивную защиту, однако нужно исследовать достижимую MDC и работать над снижением фона.

Другую версию черенковского детектора для работы в скважинах предложили Ранкл Р. С., Бродзинский Р. Л., Джордан Д. В. и др. [15]. Это был более эффективный прибор по сравнению с детектором Боуэра и др. [14], который предназначался для измерения ^{90}Sr в скважинах, диаметр которых соответствовал американским стандартам, т. е. составлял менее 15 см, а длина прибора в целом не должна была превышать 1,8 м.

Активность ^{90}Sr в питьевой воде по американским стандартам не должна превышать 8 пКи/л (0,3 Бк/л), и этот уровень должен был измеряться прибором за несколько часов.

Типичная расчетная геометрия черенковского детектора, погруженного в скважину, показана на рис. 7. Верхний и нижний торцы емкости, предназначенной для анализируемой воды, ограничены кварцевыми окнами, в то время как боковая поверхность состоит из тефлона с отражающей способностью 95 %. В своих оценках авторы [15] ис-

пользовали многое из полученного Боуэром с соавторами [14].

Два возможных варианта использования метода совпадений для подавления темнового тока ФЭУ показаны на рис. 8 [15], а зависимость скорости счета от длины емкости с водой и от вариантов включения ФЭУ по торцам емкости – на рис. 9.

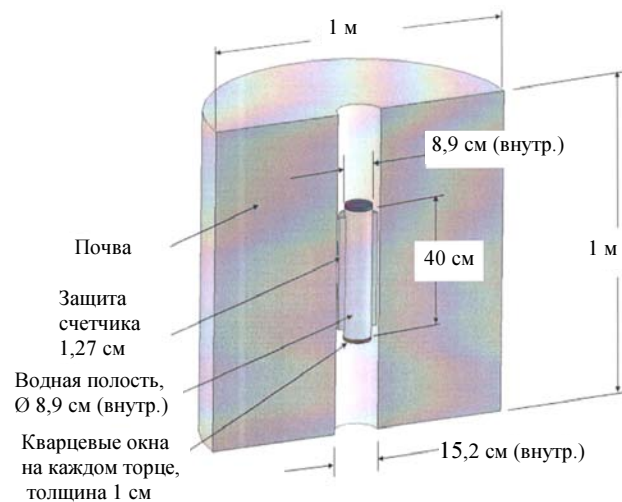


Рис. 7. Геометрия черенковского детектора, погруженного в скважину, взятая в основу расчетов [15]

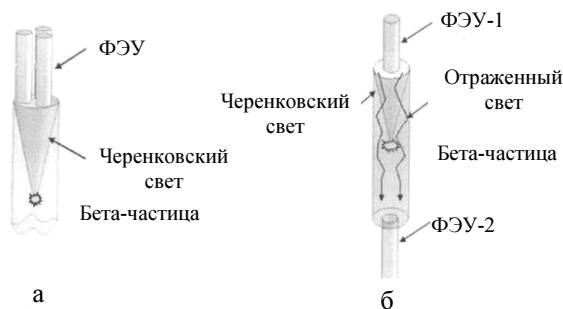


Рис. 8. Два возможных варианта использования метода совпадений для подавления темнового тока ФЭУ в погружаемом черенковском детекторе: а – совпадения у одного из торцов; б – совпадения между обоими торцами

При оценке γ -фона детектора учитывались как γ -кванты земного происхождения (от радионуклидов, входящих в состав почв, окружающих скважину), так и космическое излучение. Модель предполагала, что активность почвы составляла 0,7 пКи/г для ^{232}Th , 0,4 пКи/г для ^{238}U и 10 пКи/г для ^{40}K .

Космическое излучение, по мнению авторов, состояло в основном из мюонов, поступавших из полусферы под углом θ к нормали к земной поверхности. Расчеты показали, что для емкости с диаметром 8,9 см и длиной 40 см без защиты фон составлял 1800 Гц для γ -излучения и 5 Гц для космического излучения. В дальнейших оценках космическая составляющая была опущена.

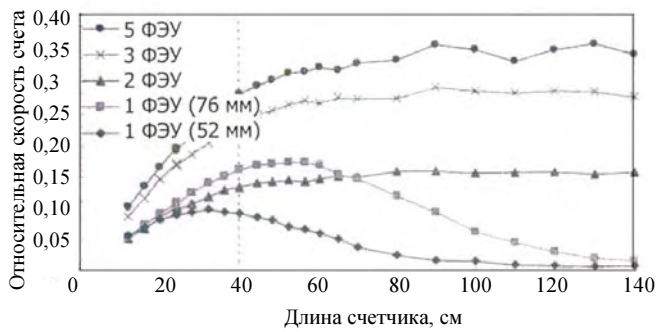


Рис. 9. Относительная скорость счета в водной полости черенковского детектора как функция от длины счетчика и числа ФЭУ на каждом из его торцов. Конфигурации более чем с одним ФЭУ на торце нуждаются в схеме совпадений лишь на одном торце, в то время как при использовании одного ФЭУ на каждом торце необходима схема совпадений, связывающая эти два ФЭУ

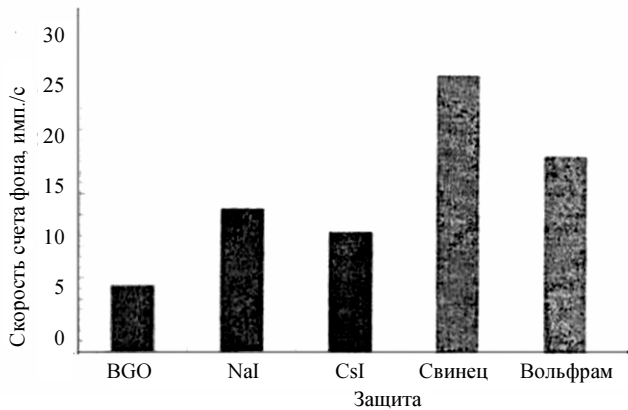


Рис. 10. Значения скорости счета фона для водной полости цилиндрической формы с диаметром 8,9 см и длиной 40 см и с 4 ФЭУ на каждом торце, работающими в режиме совпадений для каждого торца. В каждом случае защита имеет выход диаметром 1,27 см. Рассматриваются три вида активной защиты со сцинтилляторами из BGO, NaI(Tl) и CsI(Na). Свинец и вольфрам использовались в качестве пассивной защиты

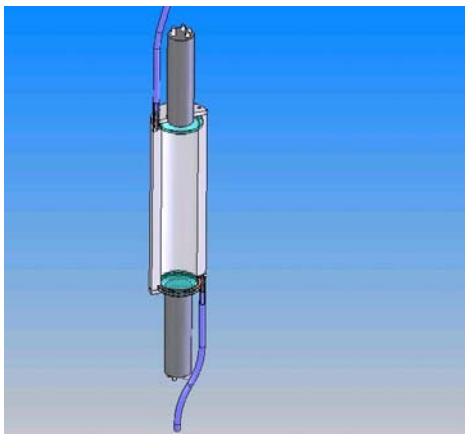


Рис. 11. Схематический внешний вид черенковского детектора Ранкла с соавторами [15]

Авторы [15] рассмотрели и пассивные, и активные конфигурации для снижения фона. Снижение скорости счета, достигаемое при использовании различных вариантов защиты, представлено на рис. 10.

Внешний вид и блок-схема использовавшейся электроники представлены на рис. 11 [15] и 5.

Авторы испытывали описываемый детектор с пробами грунтовых вод из Хэнфорда, активность которых по ^{90}Sr была около 1000 пКи/л, ^{90}Sr находился в вековом равновесии с ^{90}Y . Измерения выполнялись в наземной лаборатории, где фон от почвы был ниже, чем в условиях скважины. Результат измерения представлен на рис. 12.

Практически тем же авторским коллективом был описан и еще один вариант черенковского детектора [16], также предназначенного для работы в скважине с диаметром 15,5 см (6 дюймов) в соответствии со стандартом США.

Модель включает такие параметры, как генерация черенковского света в камере детектора от бета-излучения ^{90}Sr и ^{90}Y , гамма-излучение от первичных радионуклидов, присутствующих в почве, окружающей скважину, и космическое излучение.

Параметрическими переменными были толщина и материал стенок камеры, использование активного сцинтиллятора на антисовпадениях для подавления фона, а также число и размещение ФЭУ на торцах камеры, длина камеры, материал и расположение внутреннего отражателя, а также логика электронной схемы для работы в режиме отдельных и совпадающих импульсов.

Дизайн прототипа конструкции состоит из камеры с вольфрамовыми стенками толщиной 2,1 см и длиной 40 см, соосной с тefлоновым отражателем

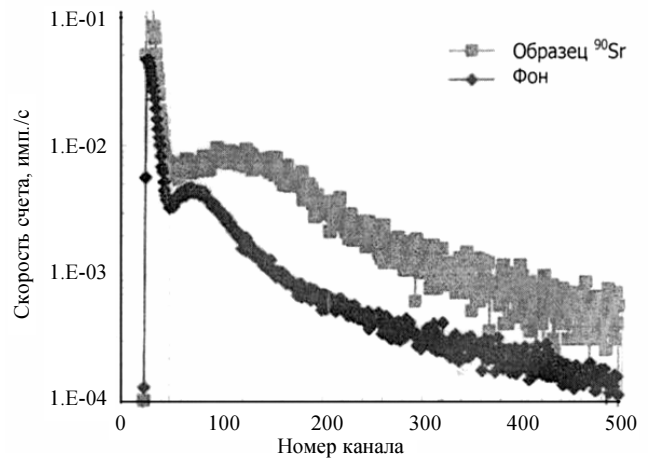


Рис. 12. Спектры для ФЭУ, расположенных на противоположных торцах черенковского детектора [15]. Амплитудные спектры представляют суммы амплитуд от обоих ФЭУ

лем, с ФЭУ диаметром 5 см с каждого торца трубы, просматривающими объем камеры через кварцевые окна.

Концентрация ^{90}Sr в пробах воды из скважин Хэнфорда достигала 9000 пКи/л.

Авторы предполагали, что детектор должен работать, как задумано. При заполнении объема деионизованной водой в лаборатории электронные параметры прибора должны были обеспечивать соответствующий фон. При замещении деионизованной воды скважинной стало очевидно, что параметры монитора оказались существенно хуже ожидавшихся. После ряда несоответствий параметров авторы перестроили систему. К их удивлению, значительное количество воды осталось за пределами вольфрамовой камеры (но внутри стальной защиты). К сожалению, авторы с запозданием обнаружили, что 2,2 см вольфрамовые стенки камеры являются пористыми для воды. Более того, вольфрам растворим в воде, и придает ей палево-желтый цвет при длительных экспозициях. Измерения прозрачности водных проб подтвердили, что при длительном контакте с вольфрамовой камерой вода становится черной по отношению к черенковскому излучению.

Первым усилием стало установление барьера между измеряемой водой и вольфрамом. Он состоял из белой эпоксидной смолы, обладающей почти 100%-ным коэффициентом отражения в широком диапазоне длин волн. Она покрывала всю внутреннюю поверхность вольфрамовой камеры. На рис. 13 показаны относительная форма черенковского спектра ^{90}Y и форма кривой квантовой эффективности ФЭУ как функция длины волны черенковского излучения. Оптимальная полоса лежит в интервале 300–425 нм и подразумевает две дальнейших особенности прибора: стенки камеры должны хорошо отражать в этом диапазоне длин волн, и вода должна обладать высокой прозрачностью в этом же интервале.

На рис. 14 показано отражение эпоксидной смолы вместе с хорошо отполированной поверхностью алюминия и белой поверхностью поливинилхлорида. В то время как эпоксидная смола обладает хорошим коэффициентом отражения при больших длинах волн, она является черной дырой для черенковского излучения. Авторы [10] применили тогда тефлоновый слой толщиной 3,2 мм, который показал почти 100%-ное отражение (рис. 15). В лабораторных испытаниях было показано, что толщина тефлона 1,5 мм не обеспечила желаемого отражения. Это находится в явном контрасте с рис. 16, где показаны абсорбционные

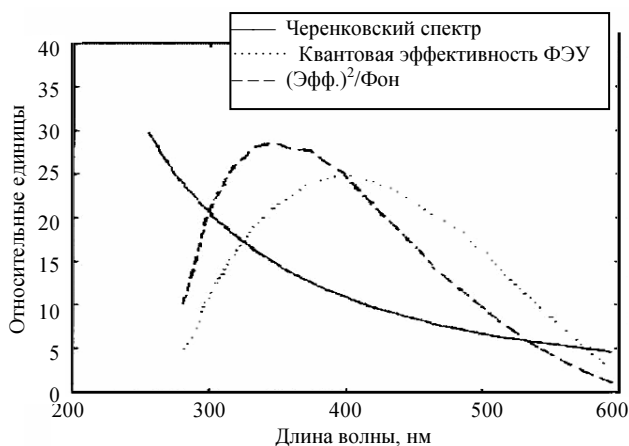


Рис. 13. Черенковский спектр и кривая квантовой эффективности ФЭУ в зависимости от длины волны света. Наложение этих кривых показывает, что критическая область для отражения и прохождения света находится в интервале 300–425 нм [16]

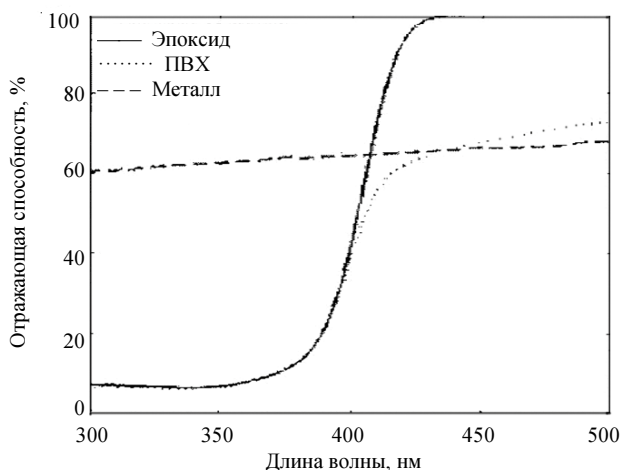


Рис. 14. «100% отражающая» эпоксидная смола очень мало подходит для черенковского излучения [16]

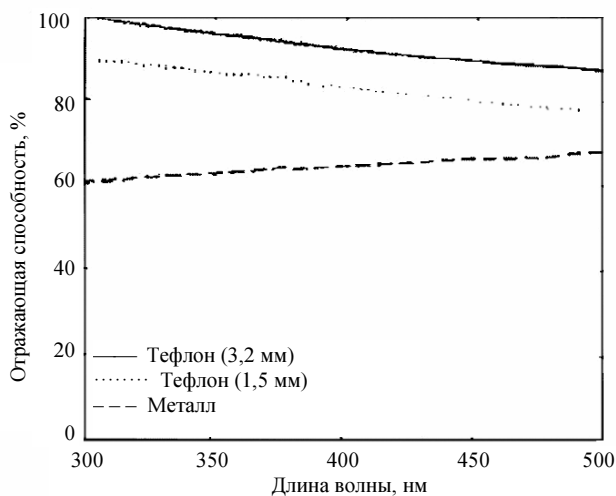


Рис. 15. Отражение тефлона зависит от его толщины при всех длинах волн [16]

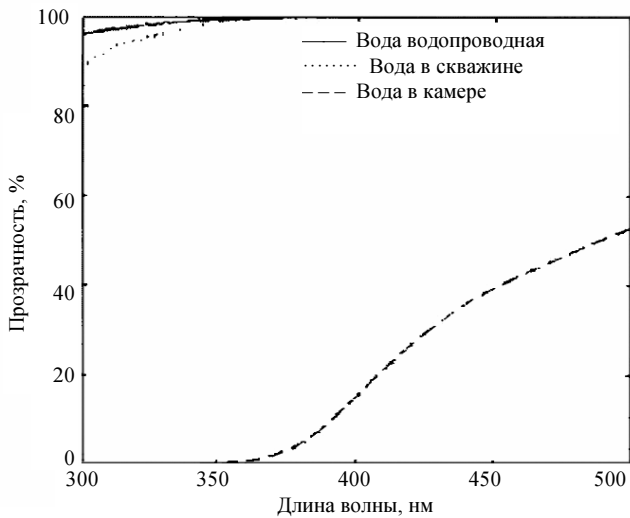


Рис. 16. Вода в контакте с металлическим вольфрамом быстро становится черной для пропускания черенковского излучения [16]

свойства воды, загрязненной в результате контакта с вольфрамом.

В процессе переделки прибора авторы [16] протестировали его с применением точечного источника ^{90}Sr , имеющего майларовое окно с одной стороны, чтобы получить 2π -направленный источник. Отношение активностей вперед-назад составляло $> 400:1$. В первой серии экспериментов верхний ФЭУ заменили черным торцом, так что источник легко перемещался в заполненной водой камере, и были созданы условия, при которых только отражение от боковой поверхности камеры могло доходить до нижнего ФЭУ. В каждой серии экспериментов источник размещался в трех различных положениях вдоль центральной оси цилиндра: в ~ 3 см от нижнего ФЭУ, посередине и в ~ 3 см от черного торца. На рис. 17,а показана скорость счета нижнего ФЭУ с источником, расположенным лицом вниз и с тефлоновым отражателем. Скорость счета падает примерно втрое от одного конца камеры до другого, больше чем предсказано результатами моделирования.

Экспериментальные результаты с источником, размещенным лицом вверх, представлены на рис. 17,б. Скорость счета примерно вдвое ниже, когда источник расположен близко к ФЭУ и почти в четыре раза ниже в дальнем конце камеры. Различие было опять больше, чем ожидалось. Наконец, на рис. 17,в представлены результаты при отсутствии тефлонового отражателя с источником, направленным лицом вверх. Скорость счета упала вчетверо вблизи ФЭУ с удаленным тефлоном и в восемь раз в дальнем торце камеры. Результаты

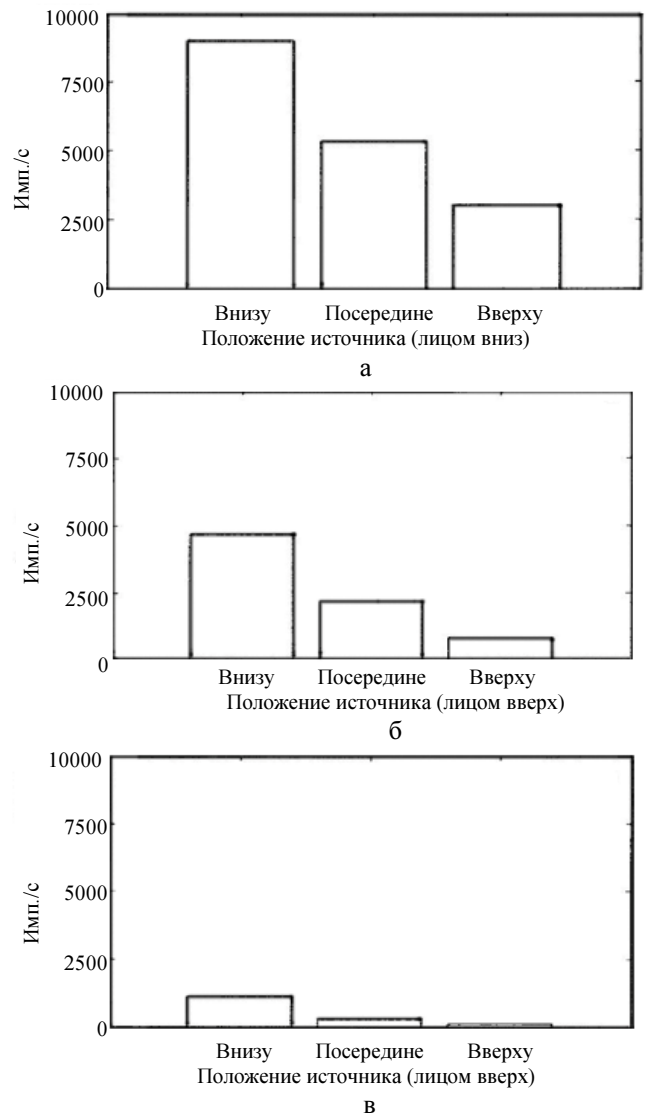


Рис. 17. Скорости счета, измеренные нижним ФЭУ для направленного источника ^{90}Sr с зачерненным торцом наверху измерительной камеры. Положения источника находятся посередине камеры, в 3 см от нижнего и от верхнего торца камеры [16]: а – тефлоновый отражатель на месте, источник обращен к ФЭУ; б – тефлоновый отражатель на месте, источник обращен в сторону, противоположную ФЭУ; в – нет тефлонового отражателя, источник обращен в сторону, противоположную ФЭУ

показывают важность тефлонового отражателя, особенно в случае счета совпадений.

Наконец, авторы [16] переделали ансамбль верхнего ФЭУ и повторили измерения, результат которых показан на рис. 17,б. Различие в том, что верхний торец больше не являлся черным поглотителем, а скорее ФЭУ с диаметром 5 см и 2-сантиметровым тефлоновым кольцом, служащим дополнительным отражателем для верхнего торца камеры, не занятого ФЭУ. С источником, располо-

женным у нижнего ФЭУ, но направленным лицом вверх, этот отражатель верхнего торца незначительно добавлял к скорости счета нижнего ФЭУ.

Считая, что черенковские фотоны должны проходить в воде почти 80 см, чтобы быть зарегистрированными, этот результат кажется вполне приемлемым. Однако при размещении источника лицом вверх вблизи верхнего ФЭУ этот маленький концевой отражатель повышает скорость счета верхнего ФЭУ вдвое. Следовательно, чтобы максимизировать число фотонов, достигающих обоих ФЭУ, важно, чтобы все внутренние поверхности камеры были покрыты толстым тефлоновым рефлектором.

После завершения экспериментальной проверки точечного источника авторы провели лабораторные измерения ^{90}Sr в пробе грунтовой воды из Хэнфордской скважины.

И лабораторные, и скважинные измерения проводились и в режиме единичных импульсов, и с совпадениями. В режиме единичных импульсов сигналы от двух ФЭУ просто суммировались и записывались как функция от энергии. В режиме совпадений, который записывался одновременно с режимом единичных импульсов, суммарный энергетический спектр от двух ФЭУ также записывался, но только в том случае, когда события в обоих ФЭУ происходили одновременно. Счет совпадений позволил отрезать события темного тока в ФЭУ, которые обычно загрязняют единичные импульсы. На практике можно установить дискриминатор нижнего уровня на уровень, соответствующий единичным импульсам, чтобы отрезать события темного тока. Такой подход несколько снижает некоторые из низкоэнергетических импульсов от ^{90}Sr , однако вклад темных импульсов уменьшается существенно больше.

Вообще говоря, энергетический спектр ^{90}Sr «жестче», чем энергетический спектр фона. Значение максимальной энергии бета-спектра ^{90}Y равно 2,282 МэВ. Все фоновые события происходят при комптоновском рассеянии гамма-квантов, проникающих через вольфрамовые стенки камеры. Эти гамма-кванты земного происхождения (от радионуклидов ториевого ряда) простираются до 2,614 МэВ, но доминируют в спектре гамма-кванты от калия-40 с энергией 1,461 МэВ. Этот первичный спектр гамма-квантов до их прихода в измерительную камеру сильно деградирует в результате взаимодействия в осадках и вольфрамовых стенках камеры. Эти гамма-кванты редко оставляют всю энергию в воде. И сигнал, и фон занижаются в случае измерения совпадений преимущественно в связи с

потерей энергии вблизи одного из торцов камеры, не отражающих достаточного количества фотонов для регистрации дальним ФЭУ. Поскольку при регистрации ^{90}Sr обычно возникает больше световых квантов, чем при фоновых событиях, большее число событий от ^{90}Sr будет заставлять срабатывать оба ФЭУ одновременно. Следовательно, счетчик в режиме совпадений будет вырезать большую часть фоновых событий, нежели событий, связанных с регистрацией ^{90}Sr . Данные подтверждают эту гипотезу: фон в режиме совпадений составлял только 31 % от фона при счете единичных импульсов, в то время как скорость счета ^{90}Sr в режиме совпадений снижается на 52 %.

Чувствительность (т. е. доля сосчитанных импульсов от удельной активности ^{90}Sr) статистически основана на линейном соотношении интенсивности сигнала и обратно пропорциональна квадратному корню интенсивности фона. Отношение сигнала к фону равно 4,8 для режима совпадений и 5,2 для единичных импульсов. В пределах неопределенностей, которые еще предстоит определить, эти значения практически равны и могут быть достигнуты в режиме единичных импульсов без сложностей, которые возникают в режиме совпадений. Основываясь на этих измерениях, активность ^{90}Sr ниже предела, допустимого для питьевой воды, можно измерить меньше чем за 4 часа для доверительной вероятности 90 %.

Опубликованные описания других приборов для измерения черенковского излучения были опущены при составлении настоящего обзора, так как они далеки от требований, предъявляемых к черенковским детекторам, предназначение которых – длительная непрерывная работа в потоке.

Стандартизация активности при измерениях по черенковскому излучению

Измерение черенковского излучения практикуется во многих лабораториях, где имеется стандартное ЖС оборудование. Однако в основном выполняются сравнительные измерения. К преимуществам черенковского счета относится естественная дискриминация от α -излучения и низкоэнергетического β -излучения. Таким образом, некоторые потенциальные радиоактивные примеси или дочерние продукты не влияют на результаты измерений. Например, измерение ^{210}Pb по черенковскому излучению высокоэнергетического β -излучателя ^{210}Bi [17].

Количественный метод для стандартизации измерений радиоактивности по черенковскому излучению разработали Грау Малонда и Грау Карлес [18]. В версии их программы CHEREN4 [19] они представили метод со счетной системой с двумя ФЭУ, работающими в режиме совпадений. Метод основан на предположении, что число фотоэлектронов, созданных у фотокатода, следует распределению Пуассона и использует теорию Франка и Тамма для образования черенковского света. Более того, анизотропия испускания черенковского излучения достаточно просто принята во внимание. Процедура требует двух стандартных источников, например, ^{36}Cl и ^{32}P для определения свободного параметра, который используется для расчета эффективности регистрации черенковского излучения для других радионуклидов. Поскольку черенковское излучение более чувствительно к изменению рассчитанного β -спектра, метод был широко использован для исследования фактора бета-спектров [19–21].

Коссерт К. [22] подход Грау Малонда и Грау Карлеса [19–21] распространил на расчет эффективности в измерительной системе с тремя ФЭУ. Были выведены новые формулы, принимающие во внимание влияние анизотропии. Анизотропия описывается одним параметром с применением энергозависимой параметризации. Свободный параметр выводится из соотношения тройных совпадений и логической суммы двойных совпадений.

Новый метод был применен к анализу отдельных радионуклидов: ^{32}P , ^{89}Sr , ^{90}Y , $^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$ и ^{204}Tl . Результаты по активности сравнивались с результатами, полученными методом стандартизации: активность $^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$ была определена с использованием калиброванной ионизационной камеры, которая часто используется как вторичный стандарт. Все другие радионуклиды были измерены ЖС методом, с использованием метода трассирования эффективности, как и метода отношения тройных совпадений к двойным (TDCR – Triple to Double Coincidence Ratio).

Первый коммерчески доступный TDCR счетчик выпускает фирма Hidex Oy, Финляндия [23], мобильная TDCR система находится в стадии разработки [24]. Таким образом, метод получает распространение во многих лабораториях. Потенциальными приложениями метода могут быть измерения ^{32}P или ^{90}Y в ядерной медицине и мониторинг ^{210}Pb и изотопов стронция в окружающей среде. Хотя ожидаемые погрешности в TDCR выше, чем в ЖС, первый метод интересен тем, что не требует смешивания радиоактивных веществ

с органическими жидкостями и в результате приводит к снижению объема отходов.

Применение сместителей спектра при измерениях черенковского излучения

Анизотропия испускания черенковского излучения несколько снижает эффективность его регистрации, так как ухудшает вероятность равномерного распределения света между двумя или несколькими ФЭУ. В приборах, применяющихся для измерений черенковского излучения в лабораторных условиях, роль анизотропии снижают добавлением сместителей спектра, которые переизлучают свет равномерно во всех направлениях.

Пек Г. А., Смит Дж. Д. и Купер М. Б. [25] в качестве сместителей спектра при изучении возможности увеличения эффективности регистрации ^{210}Bi использовали 15 % Тритон X-100, β -нафтол, мононатриевую соль 7-амино-1,3-нафталин-дисульфоновой кислоты (ANDSAP), салицилат натрия. Уже предварительные испытания показали, что наибольшее влияние на эффективность регистрации β -излучения ^{210}Bi оказывает добавление 15 % раствора Тритона X-100 к водной пробе. При добавлении 15 % раствора Тритона X-100 и салицилата натрия (1 % м/объем) эффективность регистрации ^{210}Bi возрастает от 17 до 75 %. По утверждению авторов [25], эти добавки недороги и не представляют опасности для окружающей среды.

Иногда в качестве сместителей спектра используют 2,5-дифенилоксазол (PPO) или дифенилоксазолбензол (POPOP), но эти вещества плохо растворимы в воде, и вводить их приходится в виде растворов в органических растворителях, смешиваемых с водой, что уже не позволяет говорить о безопасности таких сбросов для окружающей среды.

Наконец, в некоторых из рассматривавшихся выше приборов для улучшения отражения и рассеяния черенковского излучения внутренними стенками аппаратуры применялись материалы с высокими отражающими и рассеивающими характеристиками (прежде всего тефлон).

Заключение

В большинстве случаев исследовательские работы по изучению влияния различных факторов на эффективность регистрации черенковского излучения выполнялись с помощью стандартной ЖС аппаратуры. Это значит, что объемы измеряемых

препаратов были относительно невелики (20 мл и менее), легко обеспечивались обычные приемы для снижения фона.

Разработка детектора для длительного и непрерывного измерения ^{90}Sr в потоке предъявляет особые требования к характеристикам этого прибора:

– объем измерительной камеры прибора должен быть относительно велик (≥ 1 л) для того, чтобы общая активность воды в камере могла быть измерима за приемлемое время;

– увеличение размеров измерительной камеры неизбежно затруднит снижение фона, чему должно быть уделено особое внимание;

– для уменьшения влияния взвешенного вещества поступающая вода должна проходить через фильтрующие системы относительно высокой производительности;

– внутренние стенки прибора должны обладать высокими отражающими и рассеивающими свет характеристиками;

– прибор должен по возможности позволять оценку абсолютной активности в потоке, т. е. измерять совпадения двойные и более высокой кратности;

– прибор должен быть мобильным, позволяющим оперативно измерять уровни радиоактивности в водах в результате чрезвычайных ситуаций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Госконтракт П 496).

Список литературы

1. Niese S. // J. Radioanal. Nucl. Chem., 1999, vol. 241, p. 499; Niese S. // J. Radioanal. Nucl. Chem., 2001, vol. 250, p. 581.

2. Сапожников Ю. А., Алиев Р. А., Калмыков С. Н. Радиоактивность окружающей среды. Теория и практика. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.

3. L'Annunziata M. F. Cherenkov counting. In: L'Annunziata M.F. (Ed.) Handbook of Radioactivity Analysis. Second edition. Academic Press, Elsevier USA, 2003, p. 719.

4. Benitez-Nelson C. R., Moore W. S. // Marine Chemistry, 2006, vol. 100, p. 163.

5. Alberts J. J., Wahlgren M. A. // Environ. Sci. Technol., 1981, vol. 15, p. 94.

6. Orlandini K. A., Bowling J. W., Pinder J. E. III, Penrose W. R. // Earth Planet Sci. Lett., 2003, vol. 207, p. 141.

7. Стоячик Р., Сапожников Ю. А. Методы определения стронция-90 в морской воде. Литературный обзор. / Ред. журн. «Вестник МГУ. Химия». Москва, 1989. Деп. в ВИНТИ 10.11.1989, № 67–55.

8. Čerenkov P. A. // Compt. Rend. Acad. Sci. URSS, 1934, vol. 2, p. 451; Čerenkov P. A. // Phys. Rev., 1937, vol. 52, p. 378.

9. Frank I. M., Tamm I. G. // Dokl. Acad. Nauk SSSR, 1937, vol. 14, p. 109.

10. Ишханов Б. С., Капитонов И. М., Кэбин Э. И. Частицы и ядра. Эксперимент. – М.: Изд-во МГУ, 2005.

11. Васильев Р. В., Гресс О. А., Коростелева Е. Е. и др. // Приборы и техн. эксперим., 2009, т. 52, № 2, с. 17.

12. Хохлов С. С., Воробьев И. А., Гулый В. Г. и др. Краткие сообщения по физике // Вестник ФИАН, 2010, т. 37, № 4, с. 50.

13. Сапожников Ю. А., Меркушов А. В., Мурзин В. Е. Черенковский детектор для измерения радиоактивности морской воды // Ученые МГУ – науке и производству. Открытия, изобретения, результаты научных исследований, предлагаемые для практического использования. – М.: Изд-во МГУ, 1984, с. 55.

14. Bowyer T. W., Geelhood B. D., Hossbach T. W. et al. // Nucl. Instr. Meth. A, 2000, vol. 406, p. 577.

15. Runkle R. C., Brodzinski R. L., Jordan D. V. et al. // Sensors, 2005, vol. 5, p. 51.

16. Brodzinski R. L., Runkle R. C., Hartman J. S. et al. // J. Radioanal. Nucl. Chem., 2008, vol. 277 (1), p. 235.

17. Arinc A., Cilligan C. R. D., Pearce A. K., Johansson L. C. // Poster presented at the International Conference on Advances in Liquid Scintillation Spectrometry. Davos, Switzerland, 2008, May 25–30, 2008.

18. Grau Malonda A., Grau Carles A. // The anisotropy coefficient in Cherenkov counting. Appl. Radiat. Isot., 1998, vol. 49, p. 1049.

19. Grau Carles A., Grau Malonda A. Comput. Phys. Commun., 2006, vol. 174, p. 30.

20. Grau Carles A., Grau Malonda A. // Nucl. Phys., 1996, vol. A 596, p. 83.

21. Grau Malonda A., Grau Carles A. // Appl. Radiat. Isot., 2002, vol. 56, p. 153.

22. Kossert K. // Appl. Radiat. Isot., 2010, vol. 67, p. 1116.

23. Hidex Oy. 2009. (<http://www.hidex.com>).

24. Ivan C., Cassette P., Sahagia M. // Appl. Radiat. Isot., 2008, vol. 66, p. 1006.

25. Peck G. A., Smith J. D., Cooper M. B. // J. Radioanal. Nucl. Chem., 1998. 238, p. 163.

Контактная информация –
Сапожников Юрий Александрович,
тел.: (495) 939-32-20; e-mail: yas34@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30.06.2011.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 2011, вып. 3, с. 49–62.