

ФОТОМЕТРИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В.А. Хрячков, Б.В. Журавлев, В.А. Талалаев

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск

1249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1



Исследована и реализована возможность создания системы дистанционного контроля радиационной обстановки в заданных точках пространства. Система основана на способности некоторых сред под воздействием ионизирующего излучения испускать фотоны видимого света. Разработан специальный светосильный малошумящий детектор фотонов оптического диапазона, позволяющий избирательно фиксировать свет из заданной точки пространства. Детектор фотонов создан на базе большого параболического зеркала и ФЭУ с охлаждаемым фотокатодом. При помощи созданного оборудования проведены исследования свечистости воздуха, кварцевого стекла, органического стекла и воды под действием альфа-частиц, бета-частиц и гамма-квантов. Показано, что разработанная установка способна обеспечить дистанционную регистрацию ионизирующего излучения со сравнительно малой мощностью дозы. При работе с воздухом в качестве пассивного радиатора наилучшая чувствительность установки достигнута для альфа- и бета-частиц. Для регистрации гамма-излучения рекомендуется использовать радиаторы из кварцевого стекла или органического стекла. Основными преимуществами системы являются отсутствие кабельных линий связи между датчиками и светоприемным устройством; простота и надежность датчика, его высокая радиационная стойкость; оперативность проводимого контроля и возможность контроля одной системой сразу нескольких точек помещения. Предлагаемая технология оперативного дозиметрического контроля позволяет автоматизировать процесс измерения дозовых полей и исключить риск облучения персонала. Созданная установка может быть полезной для оценки дозиметрической обстановки на предприятиях, использующих ядерные технологии, как при нормальной работе, так и в нештатных ситуациях, связанных с утечкой радиоактивных веществ.

Ключевые слова: дозиметрия излучений, детектор фотонов, источники ионизирующих излучений, эффекты свечения под действием различных ионизирующих излучений.

ВВЕДЕНИЕ

Оптические системы дистанционного радиационного мониторинга относятся наряду с радиотехническими к числу наиболее оперативных и достоверных [1 – 3]. Длина пробега светового излучения в атмосфере значительно превышает пробег ионизирующего излучения, что позволяет регистрировать световой сигнал на значительных расстояниях от источника. Регистрируемый световой сигнал содержит информацию как о параметрах самого ионизирующего излучения (временное, энергетическое и пространственное распределение), так и о внешних условиях его возникновения и распространения (глубина или высота источника, расстояние между

© В.А. Хрячков, Б.В. Журавлев, В.А. Талалаев, 2015

источником и точкой регистрации светового сигнала, оптические характеристики среды распространения). Перспективным направлением развития таких систем является разработка методов дистанционного обнаружения областей пространства контролируемого помещения с высокими значениями мощности дозы [4].

Под действием ионизирующего излучения в среде возникают энергичные вторичные заряженные частицы, приводящие к ионизации и возбуждению атомов среды. В прозрачной среде в результате люминесценции и флюоресценции возникает оптическое излучение. Для вторичных электронов, имеющих энергию выше порога определяемого оптическими свойствами конкретной среды, возможно образование черенковского излучения.

На практике встречаются случаи, когда возникают серьезные аварии, сопровождающиеся выбросом большого количества радиоактивных веществ. Тогда требуется локализовать в пространстве источник излучения и провести предварительную оценку загрязненности. При поверхностном загрязнении α -активными изотопами дистанционный мониторинг оценки уровня загрязнения в настоящее время проблематичен. Возможность осуществления такого дистанционного мониторинга может существенно снизить риск облучения для персонала, проводящего работы на аварийном участке. Подобные измерения можно было бы проводить автономно, если бы удалось оснастить большим количеством детекторов все потенциально опасные помещения, что на практике не всегда осуществимо из-за больших затрат.

В работе исследована возможность создания системы, в которой ионизирующее излучение в контакте с воздухом или другими средами производит фотоны видимого света, а специальный детектор, обеспечивающий регистрацию фотонов, поступающих из заданной области пространства, способен на расстоянии определять исходящий от них световой поток и на основании этого сделать оценку локальной мощности дозы ионизирующего излучения.

БЛОК-СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Основой установки является параболическое зеркало диаметром 34 см – концентратор света, поступающего из одной точки пространства (место расположения изучаемого образца) в другую точку, где располагается светоприемное устройство. Использование этого свойства зеркала позволило разнести между собой источник излучения и фотоприемник и, таким образом, понизить фон. Причина этого фона заключается в том, что ионизирующее излучение, взаимодействуя непосредственно с материалами фотоприемника (например, стекло), способно генерировать в нем световое излучение, которое не связано со свечением исследуемой области пространства и, следовательно, является фоном. Наиболее надежным способом уменьшения этого фона является создание условий, при которых источник излучения и фотоприемник находятся на большом расстоянии друг от друга. Дополнительной защитой от фона может служить защита фотоприемника, сделанная из материалов, эффективно поглощающих ионизирующее излучение, и расположенная между светоприемником и источником ионизирующего излучения.

При этом данную систему можно перестраивать так, чтобы последовательно изучать световой поток из разных областей пространства и пространственное распределение интенсивности свечения. Действительно, меняя направление оптической оси зеркала и расстояние между зеркалом и фотоприемником, можно добиться того, что на фотоприемнике будет проецироваться мнимое изображение любой точки пространства контролируемого помещения или оборудования. Этот подход интересен тем, что существует корреляция между интенсивностью ионизирующего излу-

чения и яркостью свечения данной области пространства. Такая конструкция светоприемника позволяет успешно подавлять фон от паразитных источников света (свет поступающий с иных направлений, нежели направление на образец, будет собираться за пределами чувствительной области фотоприемника).

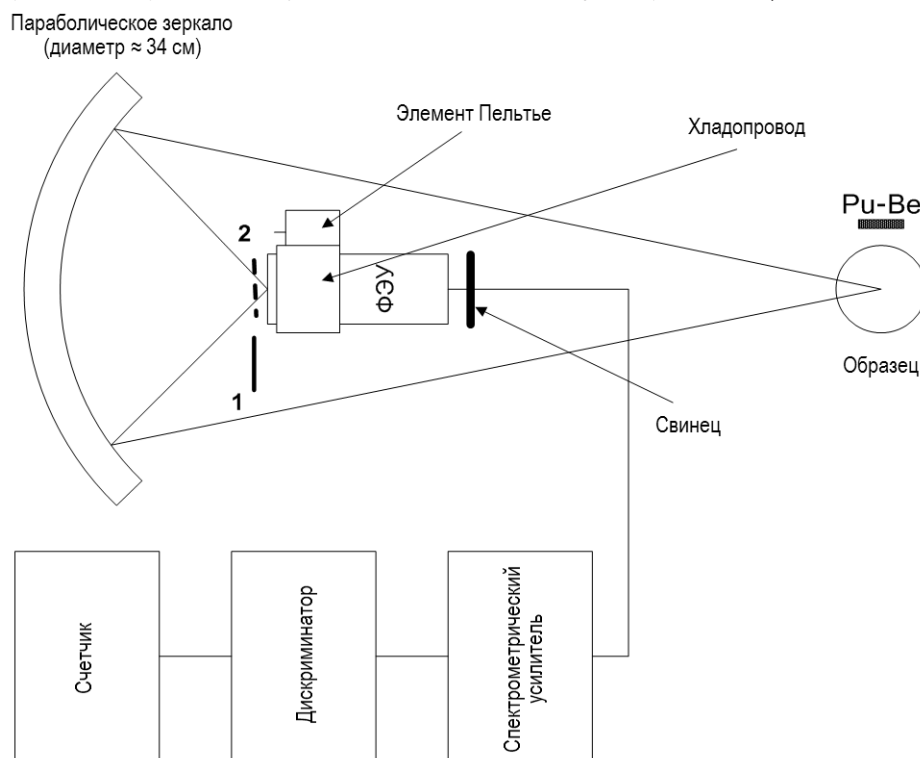


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки, работающей в счетном режиме: 1 – светонепроницаемая шторка, устанавливаемая в положение 2 при измерении фона

Детектор фотонов помещен в точку, где зеркало формирует изображение источника света (образца). При этом свет, отраженный от любой точки поверхности зеркала, имеет одинаковые шансы достигнуть фотоприемника и быть зарегистрированным. При такой геометрии фотоприемник находится на значительно большем расстоянии от источника радиации, чем исследуемый образец, что позволяет понизить фон. Небольшая доля гамма-квантов, способных достигнуть фотоприемника, ослабляется за счет размещения пластины из свинца толщиной 1.5 см в задней части детектора.

Для обнаружения слабых источников света широко используются датчики света, основанные на фотоэлектронных умножителях (ФЭУ). Чтобы добиться максимальной чувствительности установки была выполнена работа по выбору ФЭУ, позволяющего получить оптимальное значение соотношения эффект-шум. По результатам проведенных исследований широкого класса фотоумножителей был отобран ФЭУ 143-1, имеющий лучшее отношение сигнал-шум. Из литературы известно, что собственные одноэлектронные шумы ФЭУ, обусловленные термоэмиссией, резко уменьшаются при охлаждении фотокатода [5]. В связи с этим было решено использовать данную возможность для снижения собственного фона спектрометра. Для этого в упаковку ФЭУ был помещен медный хладагент, одна сторона которого окружает фотокатод ФЭУ, а другая – соединена с холодной стороной батареи из двух элементов Пельтье (ТЭМО-6). Через элементы Пельтье, соединенные последовательно, про-

пускался постоянный электрический ток в 5 А. Горячая сторона элементов Пельтье была соединена с радиатором, снабженным вентилятором для принудительного охлаждения. Для предотвращения запотевания фотокатода упаковка ФЭУ была снабжена тонким прозрачным входным окном из органического стекла. Кроме того внутри упаковки была размещена теплоизоляция между корпусом ФЭУ и корпусом упаковки для уменьшения потока тепла. Испытания, проведенные с миниатюрной термопарой, показали, что созданная система позволяет понизить температуру фотокатода на 20 °С. В результате охлаждения собственный темновой ток ФЭУ, обусловленный термоэмиссией, снизился в три раза (рис. 2). Внешний вид детектирующего модуля показан на рис. 3.

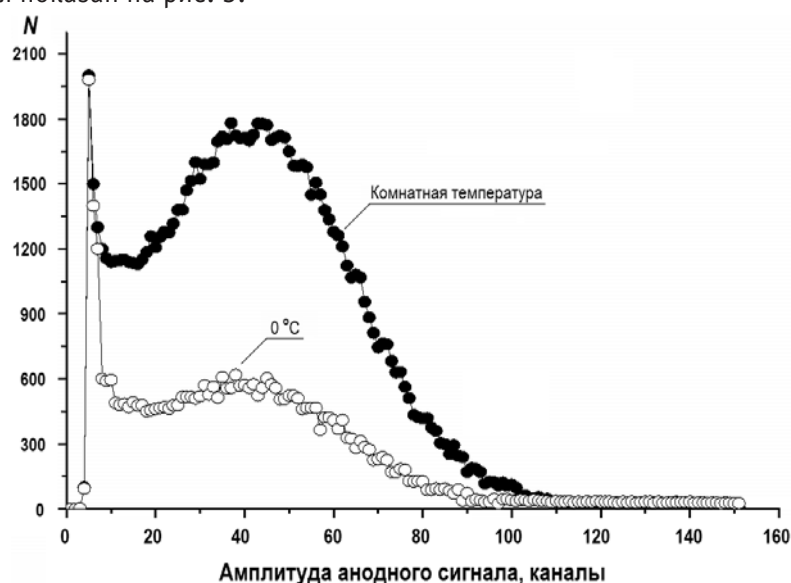


Рис. 2. Спектр одноэлектронных импульсов ФЭУ 143-1

Результатом измерения является число фотонов, излучаемых образцом в единицу времени при прохождении через него ионизирующего излучения. Для определения этой величины требуется определить абсолютную эффективность регистрации фотона разработанной системой. При измерении абсолютной эффективности спектрометра необходимо иметь образцовый источник света очень малой мощности. Был использован источник света на основе маломощной лампы накаливания (6 В, 50 мА, 0.3 Вт). На один ватт электрической мощности лампы накаливания приходится одна кандела (1 кд) силы света [6].

Таким образом, с точностью 10% сила света образцового источника составляла 0.3 кд. Несмотря на то, что использовался такой маломощный световой источник, отнесенный от зеркала на расстояние 1.29 м, создаваемый им эффект приводил к сильной перегрузке детектора. Для определения соответствия между световым потоком и числом посчитанных одноэлектронных импульсов пришлось значительно ослабить интенсивность источника. Поэтому использовались стандартные паспортизованные светофильтры с 126-, 500- и $1.5 \cdot 10^5$ -кратными коэффициентами ослабления.

Для получения «разумной» скорости счета ослабление света производилось тремя фильтрами одновременно. При этом суммарное ослабление света составило $9.45 \cdot 10^9$. Измерения проводились путем последовательного дистанционного включения и выключения лампочки. Результат измерений дал величину 197 имп/с. Исходя из этого результата была произведена оценка абсолютной эффективности

детектирующей системы, которая составила $7.28 \cdot 10^{-5}$ импульсов/фотон. Полученная величина выглядит небольшой, однако для наглядности оценим максимальное расстояние, на котором удастся «увидеть» горящую свечу (точнее, определить горит она или нет). Как показал эксперимент, лампочка мощностью 0.3 Вт на расстоянии 1.29 м после ослабления светового потока в $9.45 \cdot 10^9$ раз создавала нагрузку 197 имп/с. Тогда лампочка мощностью в 1 Вт, находящаяся на том же расстоянии, но без ослабления, создала бы нагрузку $3.3 \times 197 \times 9.45 \cdot 10^9 = 6.1 \cdot 10^{12}$ имп/с. При этом расстояние, на котором эффект от такого источника света будет иметь нагрузку 50 имп/с, уверенно выделяемую на уровне фона, составит 160 км. Следовательно, на расстоянии 160 км спектрометр способен обнаружить свет горящей свечи.



Рис. 3. Внешний вид детектирующего блока

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

При помощи данной установки были проведены измерения интенсивности свечения воздуха, кварцевого стекла, оргстекла и воды под действием смешанного гамма-нейтронного облучения Pu-Be-источника интенсивностью $1.3 \cdot 10^6$ нейтрон/с, источника α -частиц ^{238}Pu из набора ОСАИ и источника γ - и β -излучений ^{137}Cs из набора ОСГИ. Образцы (кварцевое стекло, оргстекло, контейнер с водой) имели форму цилиндра ($d = 7$ см и $h = 4$ см), один торец которого был прозрачен и направлен в сторону зеркала.

При определении интенсивности свечения воздуха под действием α -частиц источник α -частиц подвешивался на тонкой нити на расстоянии 2,5 см от точки, изображение которой после отражения в параболическом зеркале находилось на поверхности фотокатода. Для α -частиц с энергией 5,5 МэВ пробег в воздухе при нормальных условиях составляет 4,1 см. Оптическая система детектора была настроена так, что весь свет, рождающийся в этом объеме и падающий на зеркало, эффективно собирался на фотокатоде ФЭУ. Результаты измерений приведены на рис. 4 и в табл. 1. Эффект свечения в

данном случае очевиден, и он многократно превышает погрешность измерения.

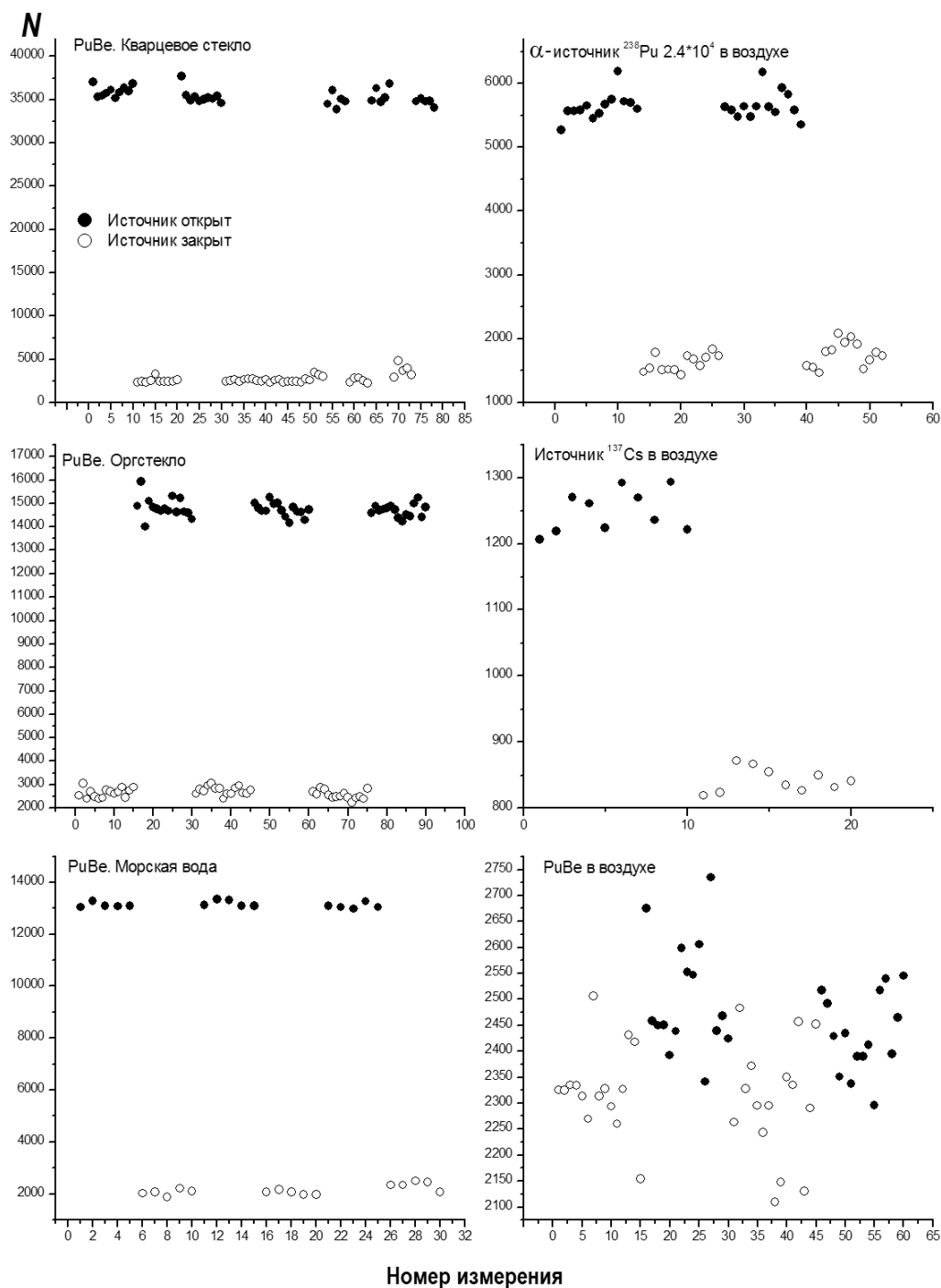


Рис. 4. Результаты измерения выхода света из воздуха, кварцевого стекла, оргстекла и воды под действием α -, β - γ - и p - γ -излучений. При измерении фона между источником излучения и детектором дистанционно устанавливалась светонепроницаемая шторка

При определении интенсивности свечения воздуха под действием γ - и β -излучений использовался стандартный изотопный источник – ^{137}Cs , испускающий γ -кванты с энергией 661 кэВ и β -частицы с максимальной энергией 1175 кэВ. Конструк-

ция источника ОСГИ такова, что β -частицы с энергией больше 0.5 МэВ могут свободно вылетать из источника и тормозиться в окружающем источник воздухе. Нужно отметить, что число γ -квантов примерно равно числу β -частиц, однако в силу того, что γ -кванты имеют малое сечение взаимодействия с воздухом, практически весь наблюдаемый эффект в воздухе вблизи источника определяется β -частицами. Результаты измерений также представлены на рис. 4 и в табл. 1. Поскольку часть β -частиц, испускаемых ^{137}Cs , имеет энергию, достаточную для вызывания свечения Вавилова-Черенкова в воде, то световыход может завесеть от влажности окружающего воздуха. При достижении точки росы и появления в воздухе мелких капель жидкости вклад эффекта Вавилова-Черенкова может стать определяющим.

Таблица 1

Результаты измерений

Образец	Источник, излучение	Эффект+фон	Фон	Эффект
Воздух	^{238}Pu , α	2289 ± 37	468 ± 20	1821 ± 57
Воздух	^{137}Cs , β	1250 ± 23	842 ± 13	408 ± 36
Воздух	Pu-Be, n, γ	2469 ± 67	2316 ± 53	153 ± 120
Кварцевое стекло	Pu-Be, n, γ	35970 ± 453	2499 ± 207	33471 ± 660
Оргстекло	Pu-Be, n, γ	14894 ± 359	2604 ± 147	12290 ± 506
Морская вода	Pu-Be, n, γ	13158 ± 83	2046 ± 74	11112 ± 157

Результаты измерений интенсивности свечения воздуха под действием Pu-Be-источника приведены на рис. 4 и в табл. 1. Эффект свечения в данном случае мал и находится на уровне шумов. Тем не менее, результат эксперимента показывает, что источники нейтронов с активностью более $1.5 \cdot 10^6$ нейтрон/с могут быть эффективно обнаружены предлагаемым способом.

При измерении интенсивности свечения кварцевого стекла, оргстекла и воды образец подвешивался непосредственно в точке, изображение которой после отражения в параболическом зеркале находилось на поверхности фотокатода. Используя Pu-Be-источник ($1.3 \cdot 10^6$ нейтрон/с), который располагался на контейнере образцов. Результаты измерений показаны на рис. 4 и в табл. 1. Эффект свечения в этих измерениях очевиден и многократно превышает погрешность измерения. В случае кварцевого стекла воздействие нейтронов будет незначительным, так как кварцевое стекло практически не содержит водорода, а энергия ядер кислорода и кремния после упругого рассеяния на них быстрого нейтрона относительно невелика. С другой стороны, γ -кванты могут рождать высокоэнергетичные электроны, способные вызывать люминесценцию кварца и порождать оптическое свечение за счет эффекта Вавилова-Черенкова. Эффект полученный в эксперименте с оргстеклом и водой, очевиден, но по абсолютной величине в два – три раза меньше, чем для кварцевого стекла, что объясняется значительно меньшей плотностью этих сред и их худшими люминесцентными свойствами.

Абсолютная светимость образцов в фотонах/с может быть получена из чисел, приведенных в табл. 1, при помощи калибровочной константы, определенной экспериментально.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана, создана и исследована система регистрации малых потоков света, возникающих в разных средах под действием радиоактивных излучений. Проведение

ны измерения светимости различных сред под действием ионизирующих излучений разной природы. Показано, что наблюдаемые эффекты могут быть положены в основу новой дистанционной системы дозиметрического контроля. Наиболее перспективно применение данной системы с использованием окружающего воздуха как радиатора для дистанционного обнаружения поверхностных загрязнений α - и β -активными изотопами. Мониторинг нейтронного и гамма-полей может быть осуществлен с использованием пассивных радиаторов из кварца или оргстекла. Использование воздуха в качестве радиатора для регистрации нейтронов и γ -квантов возможно только при больших значениях локальных мощностей дозы.

Литература

1. Жемерев А.В., Степанов Б.М. Физика импульсного радиационного возбуждения свечения воздуха. – М.: Энергоатомиздат, 1984, 97 с.
2. Kakimoto F., Loh E.C., Nagano M., Okuno H., Teshima M., Ueno S. A measurement of the air fluorescence yield. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, vol. A372 (1996). PP. 527-533.
3. Catalano O., Agnetta G., Biondo B., Celi F., Di Raffaele R., Giarrusso S., Linsley J., La Rosa G., Lo Bue A., Mangano A., Russo F. The atmospheric nightglow in the 300-400 nm wavelength Results by the ballon-borne experiment BABY. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, vol. A480 (2002). PP. 547-554.
4. Чистякова Л.К. Дистанционные методы обнаружения радиоактивных аномалий в приземной атмосфере. // Оптика атмосферы и океана. Т. 14 (2001), № 5. С. 465-472.
5. Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. – М.: Атомиздат, 1970, 560 с.
6. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1982, 496 с.

Поступила в редакцию 06.03.2015 г.

Авторы

Хрячков Виталий Алексеевич, начальник отдела, доктор физ.-мат. наук
E-mail: hva@ipre.ru

Журавлев Борис Васильевич, главный научный сотрудник, доктор физ.-мат. наук
E-mail: zhurav@ipre.ru

Талалаев Владимир Алексеевич, инженер

PHOTOMETRY OF IONIZING RADIATIONS

Khryachkov V.A., Zhuravlev B.V., Talalaev V.A.

JSC «State Scientific Centre of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering n.a. A.I. Leipunskij». 1, Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

The opportunity of creation of system remote monitoring of radiation environment in given point was investigated and realized. The systems based on ability different mediums irradiate optical photons under influence of ionizing radiation. Low noise and high-aperture photon detector was developed. This detector is able to selectively detect light coming from given point. Detector is based on parabolic mirror and PMT with cooling photocathode. Using this equipment investigation of light output for air, quartz glass, Plexiglas and water under irradiation of alpha particles, beta particles and gamma rays was carrying out. It was shown that this type installation able to do remote monitoring of relatively low dose rate level. Working with air as passive radiator the best sensitivity of setup was reach for alpha particles and beta particles. For gamma rays we recommend to use quartz glass and Plexiglas radiators. Main advantages of this installation are: missing of cable lines between of sensors and light detector; simplicity and reliability of sensor; high radiation resistance of sensor; efficiency of control; possibility to control set of points by one system. Suggested technology for operative dosimetry control allows automatizing of dose field measurement process and excluding risk of personal irradiation. Making installation can be useful for estimation of dosimetry environment on the enterprises used nuclear technology at property-sheet mode and at accident accompanied by radioactive leakage.

REFERENCES

1. Zhemerev A.V., Stepanov B.M. Physics of pulse radiating excitation of a air luminescence. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, 97 p. (in Russian).
2. Kakimoto F., Loh E.C., Nagano M., Okuno H., Teshima M., Ueno S. A measurement of the air fluorescence yields. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1996, v. A372, pp. 527-533.
3. Catalano O., Agnetta G., Biondo B., Celi F., Di Raffaele R., Giarrusso S., Linsley J., La Rosa G., Lo Bue A., Mangano A., Russo F. The atmospheric nightglow in the 300-400 nm wavelength Results by the ballon-borne experiment BABY. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2002, v. A480, pp.547-554.
4. Chistjakova L.K. Remote detection methods of radioactive anomalies in a ground atmosphere. *Optics of an atmosphere and ocean*. 2001, v. 14, no. 5, pp. 465-472 (in Russian).
5. Abramov A.I., Kazanskij Yu.A., Matusevich E.S. Basis of nuclear physics experimental methods. Moscow, Atomizdat Publ., 1970, 560 p. (in Russian).
6. Savel'ev I.V. Course of the atomic physics. Moscow, Nauka Publ., 1982, 496 p. (in Russian).

Authors

Khryachkov Vitaly Alekseevich, Head of Department, Dr. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: hva@ippe.ru

Zhuravlyov Boris Vasil'evich, Leader Scientist, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: zhurav@ippe.ru

Talalaev Vladimir Alekseevich, Engineer