

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 621.376.234

**РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ
И ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКОВ ДЛЯ РАДИОМЕТРА α -ИЗЛУЧЕНИЯ**

© 2021 г. Р. А. Муминов^а, С. А. Раджапов^{а,*}, Ф. Г. Муллағалиева^{а,**},
Б. С. Раджапов^а, М. А. Зуфаров^б, К. М. Нурбоев^с, Г. М. Ахмедов^д

^а Физико-технический институт НПО “Физика-Солнце” АН РУз
Узбекистан, 100084, Ташкент, ул. Чингиза Айтматова, 2“Б”

^б Институт материаловедения НПО “Физика-Солнце” АН РУз
Узбекистан, 100084, Ташкент, ул. Бодомзор йули, “Б”

^с Навоийское отделение АН РУз
Узбекистан, 210100, Навои, пос. Галаба, 170

^д Институт стандартов
Узбекистан, 100097, Ташкент, ул. Чапаната, 9“Б”

* e-mail: rsafii@mail.ru

**e-mail: fmullagalieva@mail.ru

Поступила в редакцию 28.10.2020 г.

После доработки 09.12.2020 г.

Принята к публикации 10.12.2020 г.

Приведены результаты разработки технологии изготовления, некоторые данные исследований электрофизических и радиометрических характеристик полупроводниковых поверхностно-барьерных и гетеропереходных Al- α Ge-pSi-Au-детекторов больших размеров (\varnothing 30–100 мм), а также представлены структурная схема радиометра α -излучения, схема микроконтроллерного узла, работа электронных узлов. Приводятся также характеристики радиометра радона, изготовленного на основе этих детекторов, и кроме того данные мониторинга концентрации радона в подпочвенном слое и на воздухе. Результаты мониторинга показали, что значения концентрации варьируются в зависимости от температуры, влажности и времени суток. Прибор может использоваться как в полевых условиях, так и стационарно.

DOI: 10.31857/S003281622103023X

ВВЕДЕНИЕ

Решение многих проблем современной науки и техники и в первую очередь экспериментальной ядерной физики требует создания новых и усовершенствования уже существующих приборов для регистрации ядерных излучений. Из всех задач спектроскопии ядерного излучения наиболее актуальной является создание специализированных приборов для контроля облучения при работе с радиоактивными изотопами. При работе с радиоактивными изотопами и другими источниками ионизирующей радиации необходимо сведение уровня облучения человека к возможному минимуму. При этом требуются компактные и точные приборы, работающие как в счетном, так и спектрметрическом режимах. Такие приборы разрабатываются с учетом конкретных условий, предполагают оптимальные технологические решения.

Актуальность работы определяется необходимостью создания нового прибора для экспрессного измерения α -излучения (^{238}U , ^{234}U , ^{232}Th ,

^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Bi и т.д.) естественных изотопов в различных средах. Прибор должен быть компактным и безопасным. В настоящее время определение содержания α -излучения естественных изотопов в технологических средах и растворах подземного выщелачивания проводится главным образом с использованием титраторов (титриметрическим методом) или спектрофотометров (фотометрическим методом). Существующие приборы стационарны, т.е. устанавливаются в специально оснащенных лабораториях. Анализ проводится в лаборатории, куда пробы доставляются с технологических участков. При этом требуется специальная подготовка проб растворов, использование квалифицированного труда лаборантов.

Целью данной работы было создание измерительного комплекса регистрации α -излучения с использованием современных достижений в управлении, математической обработке и визуализации.

В данной работе приводится описание разработанного радиометра для экспрессного измере-

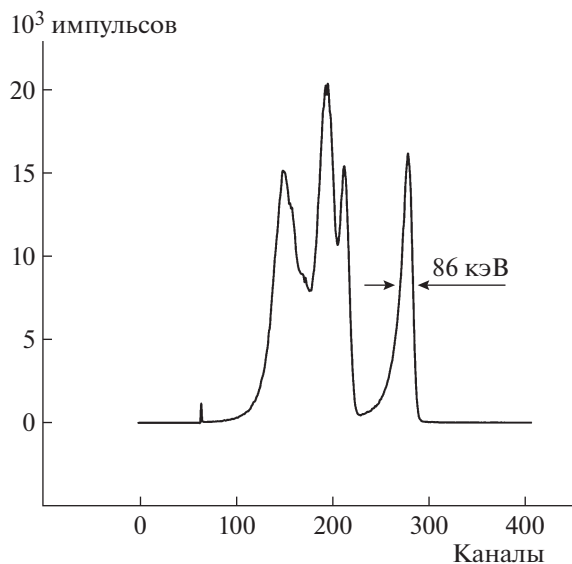


Рис. 1. Энергетическое разрешение детекторов.

ния α -излучения радиоактивных элементов на базе кремниевого детектора большого диаметра. Приводятся результаты разработки технологии изготовления, а также данные исследования электрофизических и радиометрических характеристик полупроводниковых поверхностно-барьерных и гетеропереходных Al- α Ge- p Si-Au-детекторов больших размеров.

РАЗРАБОТКА ДЕТЕКТОРОВ

Разработка и оптимизация технологии изготовления, численные расчеты и компьютерное математическое моделирование кремниевых детекторов больших размеров изложены в работах [1–9].

Поверхностно-барьерные детекторы изготавливались из кремния n -типа, гетеропереходные Al- α Ge- p Si-Au-детекторы – из кремния p -типа. Удельное сопротивление исходных пластин варьировалось в диапазоне 3–8 кОм·см, время жизни неосновных носителей составляло от 300 до 1000 мкс. Для создания гетероперехода методом вакуумного напыления при давлении $3 \cdot 10^{-5}$ Торр на пластины p -типа наносили аморфный α Ge (300 Å) и контакты Al (300 Å) и Au (~200 Å). Для поверхностно-барьерных детекторов – контакты Al (300 Å) и Au (~200 Å).

Изготовленные детекторы имели следующие характеристики: диаметр 40–100 мм, толщина чувствительной области $W = 0.3–0.5$ мм при рабочем напряжении $U_{\text{раб}} = 10–80$ В, “темновой” ток $I_{\text{обр}} = 0.5–2$ мкА, емкость $C = 1000–1750$ пФ, энергетический эквивалент шума $E_{\text{ш}} = 40–52$ кэВ,

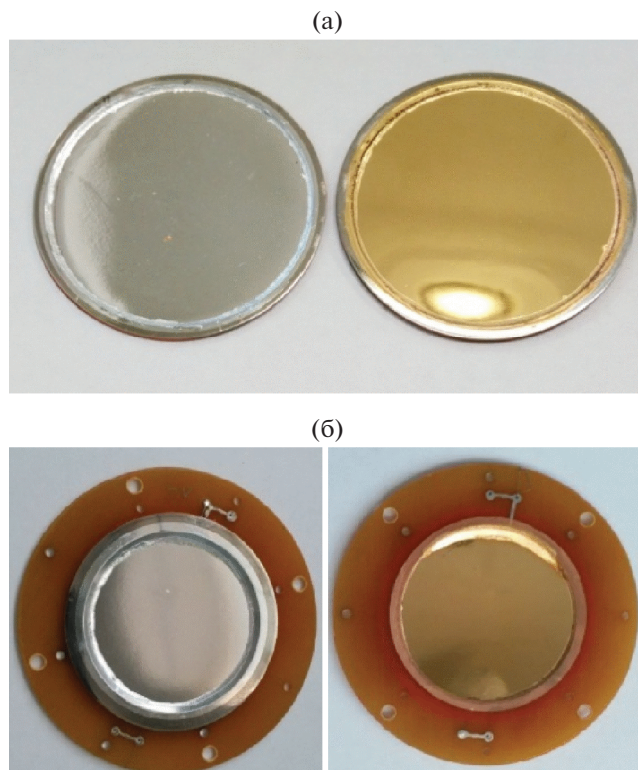


Рис. 2. Полупроводниковые детекторы большого размера: а – поверхностно-барьерные, б – гетеропереходные Al- α Ge- p Si-Au.

энергетическое разрешение R_{α} составляло 86 кэВ (рис. 1) при температуре $T = +27^{\circ}\text{C}$ [3, 4].

Внешний вид полученных детекторов приведен на рис. 2.

На основе поверхностно-барьерных и гетеропереходных Al- α Ge- p Si-Au-детекторов больших размеров в лаборатории ФТИ АН РУз разработан радиометр, обеспечивающий измерение содержания радона в воздухе, почве, воде и в различных материалах, а также позволяет проводить мониторинг в течение продолжительного времени. Принцип работы прибора основан на закачке исследуемого воздуха в измерительную камеру с последующим измерением его радиоактивности в течение регламентного времени, причем устройство настроено на селективное измерение продуктов распада радона в исследуемом воздухе (без использования осаждения на поглотители).

Электронная часть радиометра. Для реализации поставленной задачи был выбран метод регистрации α -излучения (радон) путем использования кремниевого детектора с большой площадью активной поверхности. В процессе создания радиометра было выполнено следующее: разработана геометрия рабочей камеры [8]; разработаны, рассчитаны и изготовлены элементы аналоговых уз-

лов; разработаны, спроектированы и изготовлены элементы цифровых узлов; разработано программное обеспечение для микроконтроллера и для компьютера.

Структурная схема радиометра приведена на рис. 3. В его состав входят следующие функциональные элементы: рабочая камера с детектором (*РК*), узел усиления и селекции информации (*УСИ*) (аналоговая часть), микроконтроллерный узел *МК* (цифровая часть), узел вторичного электропитания (*ВП*), узел воздухозаборника (*ВЗ*), персональный компьютер с установленным программным обеспечением (*ПК*).

Рабочая камера. Рабочая камера представляет собой пустотелый цилиндр, внутри которого в геометрическом центре, на подвесках укреплен кремниевый детектор с диаметром чувствительной области 60 мм, который чувствителен к регистрации α -частиц с двух сторон. На корпусе цилиндра также укреплены штуцеры для подключения к системе воздухозабора и разъем для подключения детектора к элементам питания и усиления.

Питание детектора обеспечивается напряжением 24–30 В через *RC*-цепи от вторичного преобразователя напряжения, расположенного в конструкции совместно с зарядочувствительным преусилителем.

Узел усиления и селекции информации. Узел усиления и селекции обеспечивает преобразование заряда, возникшего в объеме детектора от взаимодействия с регистрируемой α -частицей, в импульс напряжения и затем его усиление. Далее дискриминирующим узлом обеспечивается “обрезание” информации, представляющей собой шум.

Микроконтроллерный узел. Микроконтроллерный узел (рис. 4) обеспечивает полную автономную работу устройства регистрации.

В качестве микроконтроллера выбрана микросхема ATmega32 с программируемой памятью (32 кбайт) на кристалле.

В соответствии с поставленной задачей была разработана обвязка микроконтроллера и разработано программное обеспечение, “зашитое” в управляющий микроконтроллер и которое обеспечивает варьируемое управление технологическим процессом измерения, а именно:

- выбор варианта работы устройства – ручной или автоматический (периодический);
- варьируемое управление регламентом работы воздухозаборника;
- варьируемое управление регламентом измерения;
- измерение погодных режимов работы – температуры и влажности;

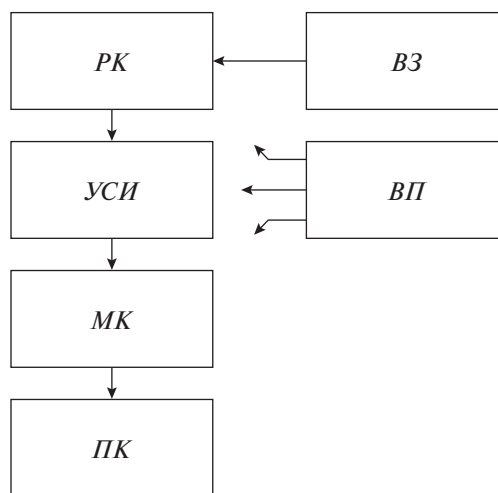


Рис. 3. Блок-схема радиометра. *РК* – рабочая камера с детектором, *УСИ* – усиление и селекция информации, *МК* – микроконтроллер, *ВП* – вторичное электропитание, *ВЗ* – воздухозаборник, *ПК* – персональный компьютер.

- управление встроенными электронными часами реального времени и даты;
- обеспечение логической связи с компьютером по интерфейсу USB;
- управление состоянием встроенного накопителя информации.

Узел вторичного электропитания. Питание всего устройства обеспечивается от встроенной батареи аккумуляторов 18650 с суммарным напряжением 12 В и емкостью 2600 мА/ч. Узел вторичного электропитания осуществляет преобразование этого напряжения в напряжения питания, необходимые для нормальной работы всех функциональных узлов: +30 В (для детектора), +5 В (для цифровых узлов микроконтроллерного узла), +8 В (для аналоговой части устройства).

В состав узла входит схема контроля и индикации состояния аккумулятора, а также элементы зарядного устройства для возможности зарядки от внешнего сетевого источника напряжения. Предусмотрена возможность электропитания от внешнего источника напряжения при работе в стационарных (лабораторных) условиях.

Узел воздухозаборника. Для осуществления операции нагнетания и последующего обновления анализируемого воздуха в качестве воздухозаборника был выбран вариант с использованием поршневой малогабаритной помпы. Питание воздухозаборника осуществляется от автономного комплекта аккумуляторов 18650 емкостью 2600 мА/ч.

Программное обеспечение компьютера. Для обработки, накопленной в устройстве информации, оно подключается к персональному компьютеру, на

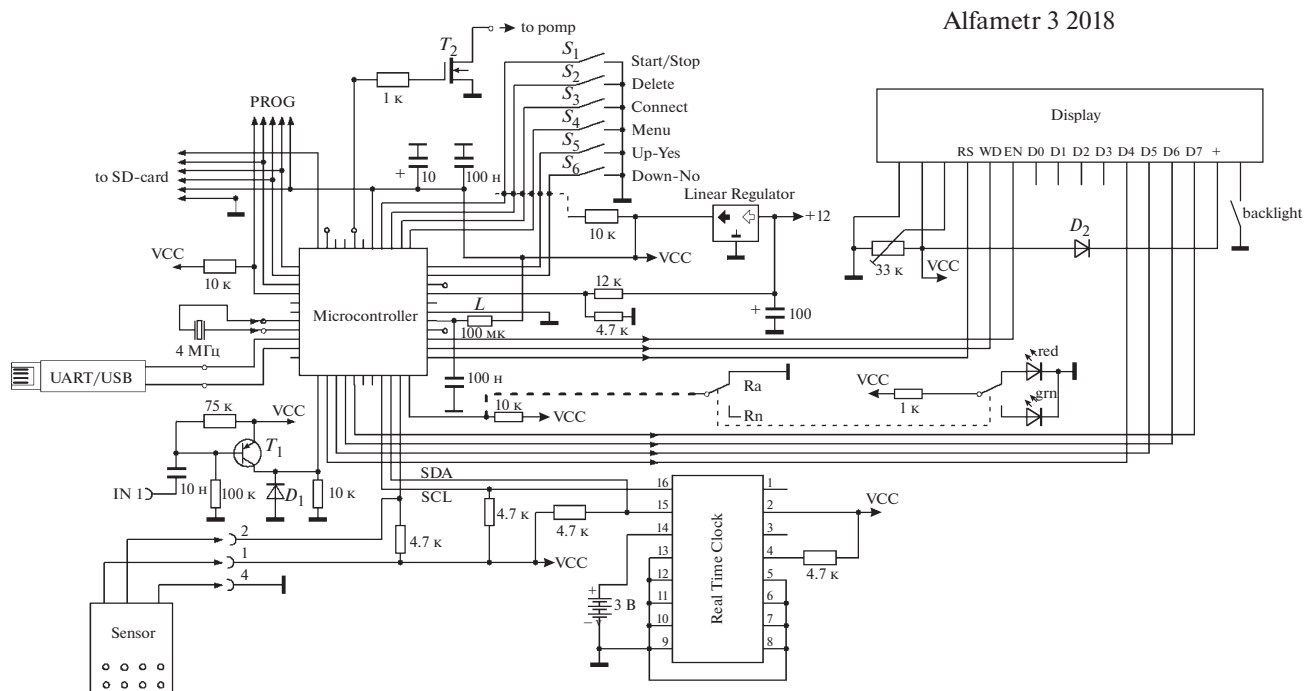


Рис. 4. Схема микроконтроллерного узла. Microcontroller – ATmega32; Display – Winstar1602; Sensor – DHT11 (датчик влажности и температуры); Linear Regulator – LM1117-5 (линейный стабилизатор напряжения); Real Time Clock – DS3231. T_1 – BC549, T_2 – IRF46; D_1 , D_2 – 4148, светодиоды – 40106.

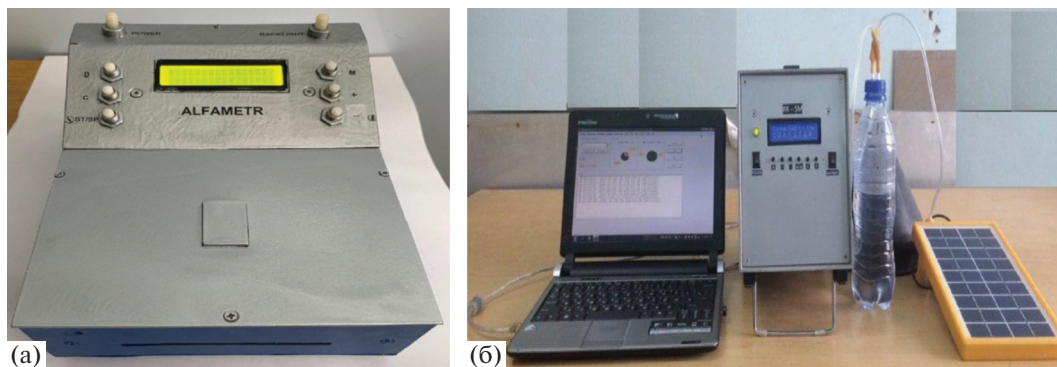


Рис. 5. Внешний вид: **а** – радиометра (альфаметра), **б** – радонометра (для измерений в воздухе, почве и воде).

котором установлено разработанное в соответствии с техническим заданием прикладное программное обеспечение – программа ADL-V1.9-3.3 [9].

Изготовлены радиометр α -излучения и радонометр для измерений в воздухе, почве и воде (рис. 5).

Результаты проведенных нами исследований по определению активности в радийсодержащей естественной пробе на альфа-радиометре и радонометре приведены на рис. 6 и 7.

В таблице 1 дан протокол испытаний различных проб радонометром RR-4M.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детекторы с большой чувствительной областью и рабочим объемом из кремния диаметром больше 50 мм и толщиной 0.3–0.5 мм в мировой практике используются редко из-за сложной технологии изготовления. Использование таких детекторов большого диаметра позволяет изготовить радиометр, измеряющий заряженные частицы indirect, т.е. измерять непосредственно в измеряемой ячейке. Данный метод позволяет избежать осаждения активного вещества различны-

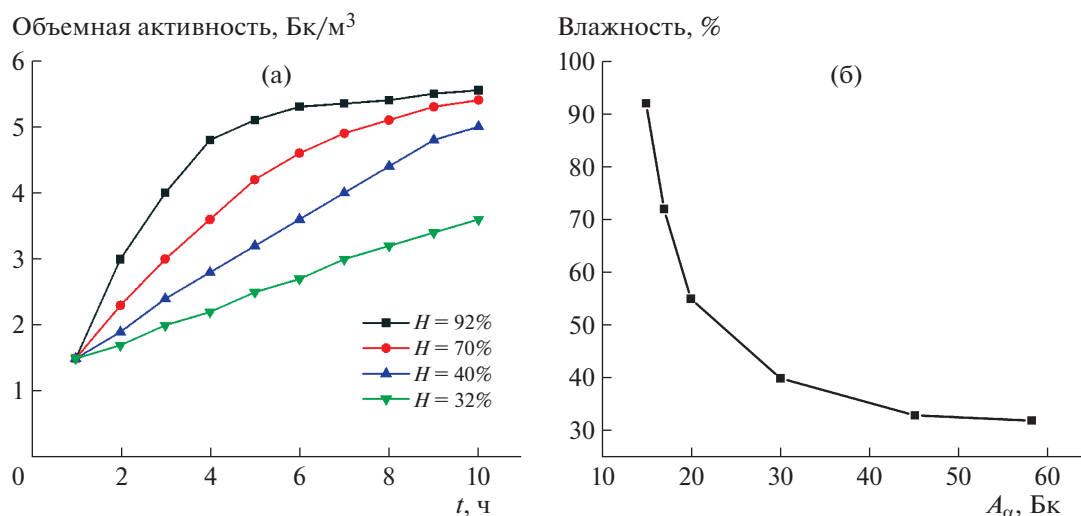


Рис. 6. Естественная радиоактивность радийсодержащей пробы: а — объемная активность радона от времени и влажности H ; б — альфа-радиоактивность от влажности пробы.

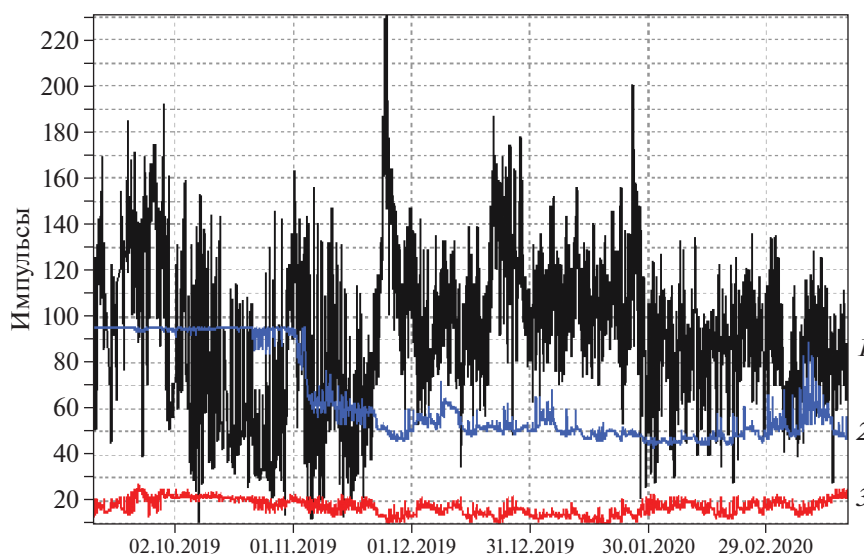


Рис. 7. Излучение радона из почвы (период 11.09.2019–20.03.2020): 1 — изменение интенсивности объемной активности радона во времени, 2 — изменение влажности во времени, 3 — изменение температуры во времени.

ми методами на измерительные фильтры и соответственно упрощает подготовку пробы.

Таким образом, в результате исследования и проведения технологических работ нами разработана схема изготовления радиометра. Оптимизированы технологические режимы, исследованы электрофизические и радиометрические характеристики изготовленных кремниевых детекторов больших размеров. Проведены численные расчеты и компьютерное математическое моделирова-

ние получаемых истинных характеристик кремниевых детекторов. Разработанная компьютерная математическая модель позволила обобщить и обеспечить высокое качество получаемой информации в детекторах и в целом точности информации о радиоактивностях.

На основе наших детекторов созданы радиометр α -излучения, электронная схема которого настроена на конкретную идентификацию продуктов распада ^{238}U и радонометры.

Таблица 1. Протокол испытаний различных проб радонметром RR-4М

№ пробы	Вид пробы	А, Бк ($\pm 10\%$)	Элементы
1	Порошок	5.2	U^{238} , Ra^{226}
2	Порошок	8.0	U^{238} , Ra^{226}
3	Порошок	7.2	U^{238} , Ra^{226}
4	Порошок	5.6	U^{238} , Ra^{226}
5	Жидкий	0.9	U^{238} , Ra^{226}
6	Жидкий	1.0	U^{238} , Ra^{226}
7	Жидкий	1.2	U^{238} , Ra^{226}
8	Жидкий	1.4	U^{238} , Ra^{226}

Разработанные приборы работают как в комплекте с персональным компьютером с операционной системой Windows 7, 8, так и автономно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимов Ю.К., Игнатьев О.В., Калинин А.И., Куширук В.Ф.* Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. *Muminov R.A., Radzhapov S.A., Saimbetov A.K.* // Technical Phys. Lett. 2009. V. 35. № 8. P. 768.
3. *Раджапов С.А., Раджапов Б.С., Рахимов Р.Х.* // Computational Nanotechnology. 2018. № 1. С. 151. https://www.elibrary.ru/title_about_new.asp?id=50989
4. *Раджапов С.А., Рахимов Р.Х., Раджапов Б.С., Зуфаров М.А., Шарифов Ш.Ф.* // Computational Nanotechnology. 2019. № 1. С. 65.
5. *Раджапов С.А., Рахимов Р.Х., Раджапов Б.С., Зуфаров М.А.* // Computational Nanotechnology. 2019. № 2. С. 157. <https://doi.org/10.33693/2313-223x-2019-6-2-157-159>
6. *Muminov R.A., Saymbetov A.K., Japashov N.M., Toshmurodov Yo.K., Radzhapov S.A., Kuttybay N.B., Nurgaliyev M.K.* // J. of nano- and electronic physics. 2019. V. 11. № 2. P. 2031. [https://doi.org/10.21272/jnep.11\(2\).02031](https://doi.org/10.21272/jnep.11(2).02031)
7. *Muminov R.A., Radzhapov S.A., Pindyurin Y.S., Saymbetov A.K.* Patent RUz № IAP 04073 // 2012. <http://baza.ima.uz/>
8. *Муминов Р.А., Раджапов С.А., Лутпуллаев С.Л., Пиндюрин Ю.С., Хусамидинов С.С., Юткин С.В.* Патент РУз № IAP 04882.
9. *Раджапов Б.С., Эргашев К.* Свидетельство на программные продукты РУз № DGU 20180983 от 06.12.2018.