

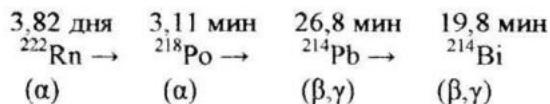
МОНИТОРИНГ КОРОТКОЖИВУЩИХ ПРОДУКТОВ РАСПАДА ^{222}Rn (^{214}Bi И ^{214}Pb) В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ СЕВАСТОПОЛЯ

Г.Ф. Батраков, Т.В. Чудиновских,
Е.С. Чудиновских

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2ф
E-mail: chudtv@alpha.mhi.iuf.net

Приводятся результаты измерения концентрации короткоживущих продуктов распада ^{222}Rn (^{214}Pb и ^{214}Bi) в аэрозолях приземного слоя атмосферы г. Севастополя. Показано, что аномального сдвига радиоактивного равновесия между этими изотопами не наблюдается. Это свидетельствует о том, что аэрозоли в точке наблюдения имеют в основном континентальное происхождение.

Введение. Основной вклад в естественную радиоактивность приземной атмосферы вносят ^{222}Rn и короткоживущие продукты его распада (КПРР) [1]. Цепочка распадов этих продуктов имеет следующий вид:



В этой цепочке ^{222}Rn находится в газообразном состоянии, а остальные изотопы связаны с аэрозольными частицами. Наибольший интерес представляют ^{214}Pb (RaB) и ^{214}Bi (RaC). Они вносят значительный вклад в формирование поля гаммаизлучения приземной атмосферы и являются индикаторами состава атмосферных аэрозолей.

Целью данной работы является проведение измерений концентрации радиоактивных изотопов ^{214}Pb и ^{214}Bi в приземной атмосфере Севастополя, исследование влияния метеоусловий и получение оценок состава аэрозолей.

Методика измерений. Для определения концентрации ^{214}Pb и ^{214}Bi использовался комплекс аппаратуры, разработанный и изготовленный в МГИ НАНУ [2]. Комплекс состоит из воздухофильтрационной установки и гамма-спектрометра. Воздухофильтрационная установка включает в себя электровентилятор и цилиндрический фильтродержатель, на который помещается

тонковолокнистый фильтр ФПП-15. Измерения активности фильтра проводятся на низкофоновом гамма-спектрометре со сцинтилляционным детектором. Воздухофильтрационная установка располагается на крыше нижнего корпуса МГИ НАНУ в Севастополе, что соответствует примерно 40 метрам над уровнем моря. Фильтрация воздуха осуществлялась в течение 2 часов с 11.00 до 13.00 по местному времени. Основным элементом гамма-спектрометра является разработанный и изготовленный нами многоканальный амплитудный анализатор на микроконтроллере [3]. Активность ^{214}Pb определялась по линии 352 кэв, а ^{214}Bi – по линии 609 кэв.

Для обеспечения измерений γ -активности проб аэрозолей в МГИ НАНУ был разработан и изготовлен анализатор импульсов на микроконтроллере [3]. Измерительный комплекс построен по общепринятому принципу и состоит из трех компонент: компьютера, электронного блока и программного обеспечения (рисунок 1).

Электронный блок состоит из следующих узлов: входной усилитель, АЗУ, дифференциатор, компаратор, микроконтроллер, преобразователь уровней и блок питания.

Входной сигнал подается на вход усилителя. В зависимости от типа сигнала (положительный или отрицательный) он или инвертируется или не меняет своей полярности. В зависимости от типа первичного преобразователя сигнал усиливается или ослабляется. Сформированный таким образом сигнал поступает на вход АЗУ (аналоговое запоминающее устройство) и на вход дифференциатора. АЗУ удерживает уровень сигнала неизменным в течение времени, необходимого для аналого-цифрового преобразования. Дифференциатор совместно с компаратором отслеживают момент спада сигнала (именно в этот момент АЗУ готово к работе) и выдают на микроконтроллер сигнал прерывания.

Микроконтроллер запускает АЦП на преобразование. После преобразования микроконтроллер выдает на АЗУ сигнал сброса, система готова к приходу следующего импульса. Результат преобразования, цифровой код является адресом ячейки ОЗУ (оперативного запоминающего устройства), которую необходимо инкрементировать. Таким образом, импульсы одина-

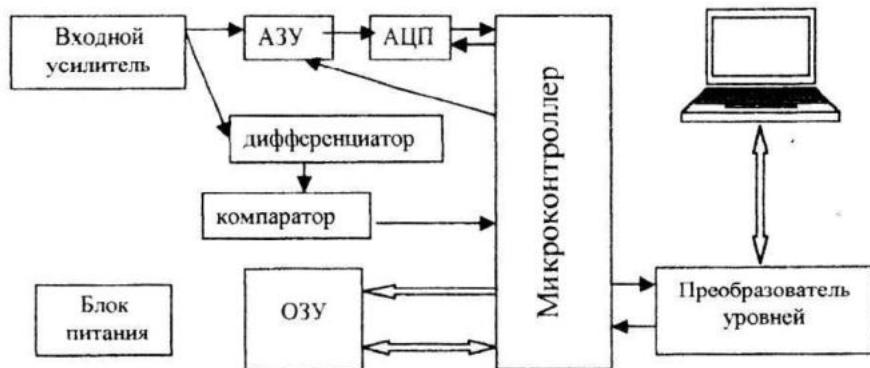


Рисунок 1 – Структурная схема многоканального амплитудного анализатора на микроконтроллере

ковой амплитуды суммируются в определенной ячейке. Всего существует 1024 ячейки.

Через заданное определённое время (или по нажатию кнопки) происходит выдача накопленных данных на ПЭВМ. После выдачи массива цикл повторяется.

Электронный блок выполнен в виде отдельной платы размером 60 × 120 мм, помещённой в пластиковый корпус. Блок обеспечивает технические характеристики аналогичные характеристикам у анализатора АИ-1024. Приведём некоторые характеристики. Число каналов – 1024, в том числе один служебный. Ёмкость канала – 2¹⁶. Параметры входных импульсов – от 0 до 10 В. Полярность импульсов – положительная или отрицательная. Входное сопротивление не менее 2 кОм. Мёртвое время не более 20 мкс.

Время отбора пробы. Процесс накопления ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb и ²¹⁴Bi на фильтре при отборе пробы воздуха описывается следующими выражениями:

$$\frac{dN_a}{dt} = Vn_a - \lambda_a N_a, \quad (1)$$

$$\frac{dN_b}{dt} = Vn_b - \lambda_b N_b + \lambda_a N_a, \quad (2)$$

$$\frac{dN_c}{dt} = Vn_c - \lambda_c N_c + \lambda_b N_b. \quad (3)$$

где индексы а, в, с относятся соответственно к ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb и ²¹⁴Bi; .

N_a, N_b, N_c – содержание изотопов на фильтре;

n_a, n_b, n_c – концентрация изотопов в атмосфере на момент отбора пробы, атом/м³;

V – объемная скорость прокачки воздуха через фильтр, м³/с;

λ_a, λ_b, λ_c – постоянные распада изотопов.

На рисунке 2 кривые накопления представлены графически. Видно, что процесс накопления RaA на фильтре завершается на 95 % уже к 10–й минуте отбора пробы, в то время как нарастание активностей RaB и RaC на этом временном промежутке происходит практически линейно.

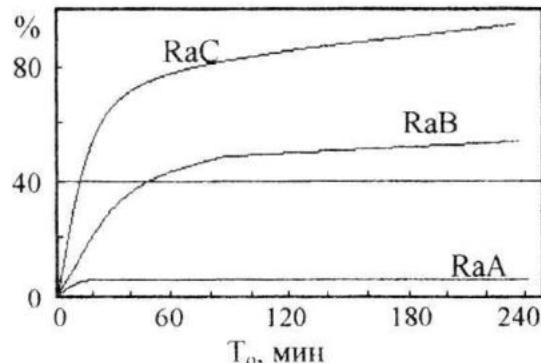


Рисунок 2 – Накопление короткоживущих продуктов распада радона на аэрозольном фильтре в зависимости от продолжительности отбора пробы

По истечении 60 мин отбора пробы полнота накопления RaB и RaC составляет 78 % и 69 % от их предельных значений, в то время как увеличение продолжительности прокачки вдвое (до 120 мин) обеспечивает нарастание их уровня активности на фильтре до 95% и 91% соответственно.

Эта особенность накопления КПРР на фильтре демонстрирует нецелесообразность

использования продолжительных экспозиций при отборе пробы.

Расчет концентрации. Для расчета ^{214}Pb и ^{214}Bi целесообразно использовать пики с энергиями 352 Кэв и 609 Кэв соответственно. После выдержки пробы в течение 3 часов ^{214}Pb ($T=27$ мин) и ^{214}Bi ($T=19.7$ мин) распадаются и на спектре выделяется пик с энергией 239 Кэв (рис.2), принадлежащий ^{212}Pb ($T=10.64$ ч.).

После окончания прокачки воздуха накопленные на фильтре КПРР начинают распадаться в соответствии со скоростями

$$N_c(t') = N_a^0 \cdot \frac{\lambda_a \lambda_b}{\lambda_a - \lambda_b} \left[\frac{\exp(-\lambda_b t') - \exp(-\lambda_c t')}{\lambda_c - \lambda_b} - \frac{\exp(-\lambda_c t') - \exp(\lambda_a t')}{\lambda_a - \lambda_c} \right] + \\ + N_b^0 \lambda_b \frac{\exp(-\lambda_b t') - \exp(-\lambda_c t')}{\lambda_a - \lambda_c} + N_c^0 \exp(-\lambda_c t'). \quad (6)$$

где t' – время, отсчитываемое от момента окончания прокачки.

После интегрирования и проведения всех необходимых преобразований получаем выражения для расчета активностей изотопов:

$$I_b / (F_b V) = 75.97 A_a + 603.84 A_b,$$

$$I_c / (F_c V) = 73.72 A_a + 650.80 A_b + 431.42 A_c,$$

где F_b и F_c – эффективности детектора при регистрации пиков ППЭ RaB и RaC в указанных энергетических диапазонах. Из последних двух выражений следует, что расчет активности всех трех компонентов КПРР требует проведения, по крайней мере, двух последовательных наборов спектра, так как однократная регистрация не позволяет решить систему из двух уравнений с тремя неизвестными.

Результаты измерений. Измерения проводились в периоды январь – август 2007 г. (90 проб) и апрель – июль 2008 г. (24 пробы). Концентрации ^{214}Pb изменялись от 1,5 Бк/м³ до 36,0 Бк/м³, а концентрации ^{214}Bi – от 0,9 Бк/м³ до 25,2 Бк/м³. Средние значения составляли $12,8 \pm 6,9$ Бк/м³ для ^{214}Pb и $4,3 \pm 2,6$ Бк/м³ для ^{214}Bi (рисунок 3).

Было изучено влияние на концентрации ^{214}Pb и ^{214}Bi метеорологических параметров (рисунок 4) – давления, температуры и влаж-

собственного распада и генетической связи между этими радионуклидами, что может быть описано следующими зависимостями:

$$N_a(t') = N_a^0 \exp(-\lambda_a t'); \quad (4)$$

$$N_b(t') = \frac{N_a^0 \lambda_a (\exp(-\lambda_a t') - \exp(-\lambda_b t'))}{(\lambda_a - \lambda_b) + N_b \exp(-\lambda_b t')}, \quad (5)$$

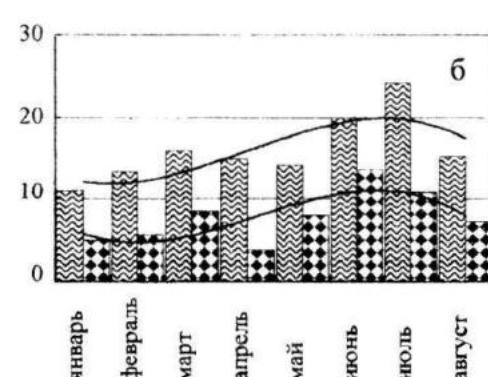
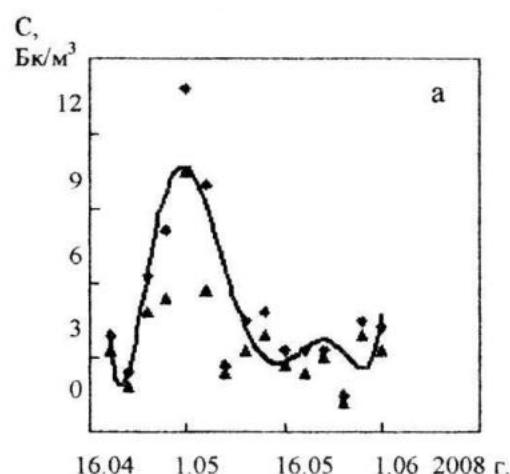


Рисунок 3 – Временная изменчивость концентраций ^{214}Pb (♦) и ^{214}Bi (▲) (а) для одного из периодов наблюдений и среднемесячные значения для 2007 г. (б)

ности приземного слоя воздуха, скорости и направления ветра.

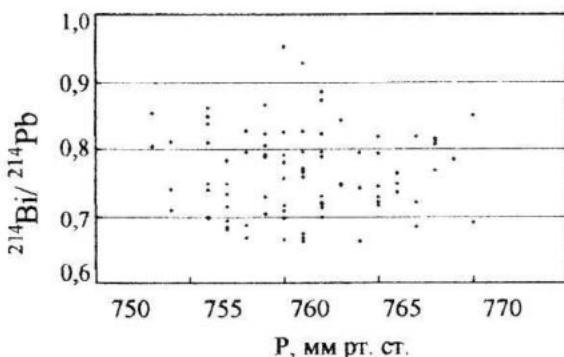


Рисунок 4 – Зависимость отношения $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb}$ от давления воздуха в приземном слое

Концентрация ^{222}Rn в приземном воздухе в значительной мере зависит от эксхаляции. Теоретически эксхаляция имеет обратную зависимость от давления. Практически же такой однозначной связи не существует. Дело в том, что высокое и низкое давление связано с определенным комплексом различных метеорологических элементов. При низком давлении обычно имеет место сильная конвекция, что приводит к уменьшению концентрации ^{222}Rn и продуктов его распада. Низкое давление часто сопровождается выпадением осадков, а это также уменьшает концентрацию радиоактивных веществ. С другой стороны низкое давление приводит к увеличению эксхаляции ^{222}Rn , т.е. к увеличению концентрации продуктов его распада. При высоком давлении обычно имеет место сухая, спокойная, безветренная и ясная погода, что, с одной стороны, за счет высыхания почвы увеличивается возможность эксхаляции, но, с другой стороны, высокое давление не способствует этому. Все это не позволяет установить однозначных связей между давлением и величиной концентрации.

Рассмотрим зависимость концентраций ^{214}Pb и ^{214}Bi от температуры. В настоящее время в ряде работ связи между концентрацией и температурой не обнаружено. С другой стороны имеются работы, в которых такая связь установлена. Видимо, связь между концентрацией ^{214}Pb и ^{214}Bi в приземном слое атмосферы и температурой определяется составом почв. С ростом температуры некоторые почвы интенсивно высыхают, при этом в их капиллярах улучшаются условия для эксхаляции ^{222}Rn , а следовательно, повышается концентрация продуктов распада в приземной атмосфере. По

нашим данным такой зависимости не наблюдается.

Следующим фактором, который может оказывать влияние на концентрации, является относительная влажность. Здесь, так же как и с температурой, результаты не однозначны, но в большинстве работ наблюдалась прямая пропорциональная зависимость между концентрацией и влажностью. Обычно рост концентрации с увеличением влажности объясняют следующим образом. С увеличением влажности уменьшается вертикальный обмен воздушных масс, а это приводит к повышению концентрации ^{222}Rn у земной поверхности. Наши измерения показали, что увеличения концентрации с увеличением влажности не наблюдается.

И, наконец, третий метеорологический параметр, который может оказывать влияние на концентрацию, это ветер. Скорость ветра тесно связана с турбулентностью. Рост скорости ветра приводит к увеличению вертикального обмена, а, следовательно, к уменьшению содержания ^{222}Rn . Направление ветра может значительно изменять концентрацию. Воздушные массы, проходя районы с высоким содержанием ^{222}Rn , обогащаются им и приходят в исследуемый район с высоким содержанием ^{214}Pb и ^{214}Bi . Обычно воздушные потоки, которые приходят с моря, обеднены радиоактивными изотопами. Связь концентраций с ветром по нашим данным установить не удалось. Следует отметить, что полученные результаты являются предварительными, так как пока имеются очень короткие ряды наблюдений.

Рассмотрим использование полученных данных наблюдений для оценки характеристик аэрозолей. Аэрозоли, находящиеся в приземной атмосфере, можно разделить на две группы: аэрозоли континентального происхождения и аэрозоли морского происхождения.

Считается, что активности ^{222}Rn и короткопериодные продукты его распада подчиняются закономерности

$$A_{\text{Rn}} \geq A_{\text{RaA}} > A_{\text{RaB}} > A_{\text{RaC}}$$

Многочисленными исследованиями установлено, что отношение активностей этих радионуклидов подвержено значительным колебаниям в зависимости от природы воздушной массы. В ряде измерений, прове-

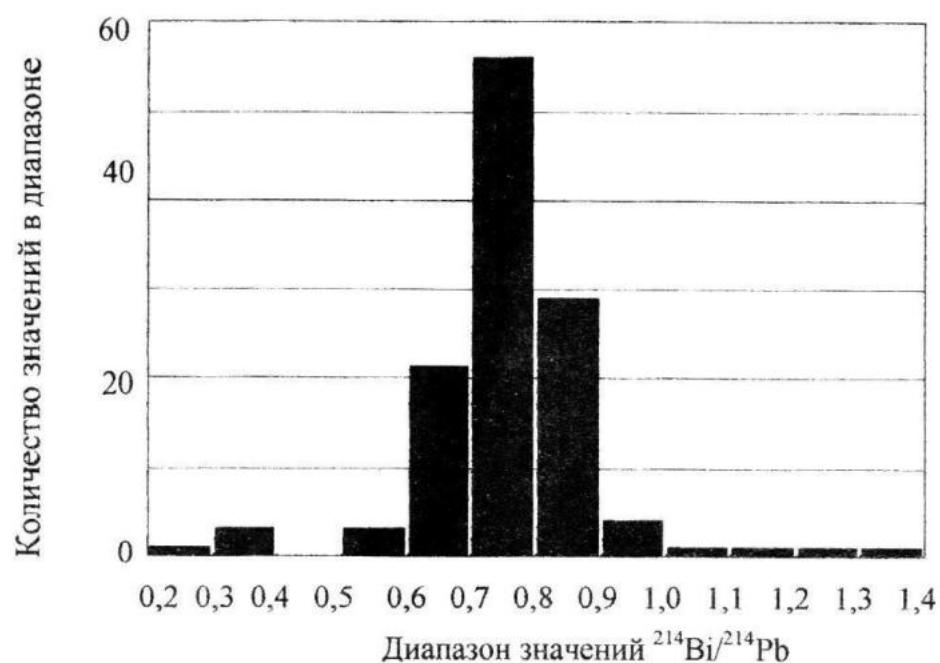


Рисунок 5 – Распределение отношений $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb}$ по диапазонам значений

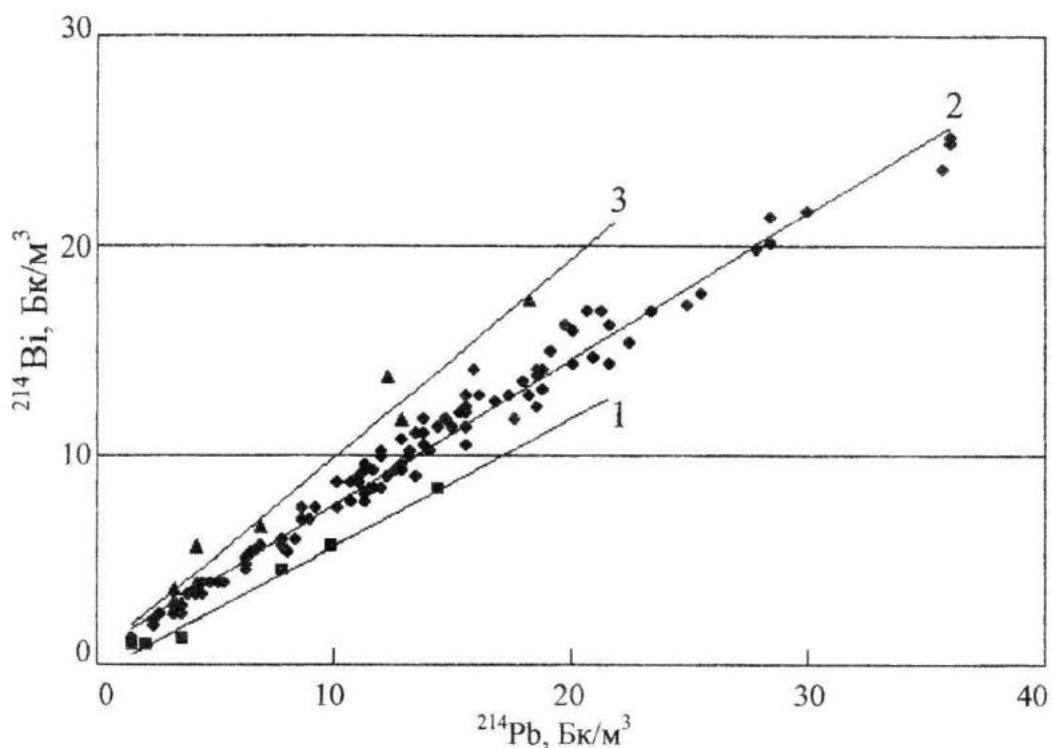


Рисунок 6 – Соотношение изотопов в аэрозолях для разных диапазонов отношения $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb}$
 1 – $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb} < 0,6$: $y = 0,61x - 0,41$; $R^2 = 0,99$; 2 – $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb} = 0,61 \div 0,9$: $y = 0,7x + 0,7$; $R^2 = 0,98$;
 3 – $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb} > 0,9$: $y = 0,94x + 0,51$, $R^2 = 0,97$

денных на побережье океанов, обнаружен так называемый аномальный сдвиг равновесия между RaB и RaC, т.е. наблюдается превышение активности RaC по отношению

к RaB. Эти результаты указывают на возможность использования отношения этих изотопов для характеристики воздушных масс и состава аэрозольных частиц.

На рисунке 5 приведено распределение отношения $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb}$ по диапазонам значений, которое подчиняется нормальному закону. Для каждого диапазона значений были посчитаны соотношения изотопов в аэрозолях и получены аппроксимирующие зависимости (рисунок 6). Из полученных нами значений отношений активностей $A_{\text{RaC}}/A_{\text{RaB}}$ следует, что аномальный сдвиг радиоактивного равновесия наблюдается лишь в единичных случаях ($^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb} > 0,9$), которые обусловлены поступлением в район Севастополя морских воздушных масс. Это свидетельствует о том, что аэрозоли в точке наблюдения имеют в основном континентальное происхождение.

Выводы.

1. По результатам измерений концентрации КПРР рассчитаны отношения $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb}$, диапазон изменения которых – от 0,33 до 1,85.

2. По данным наблюдений не отмечено зависимости $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb}$ от давления, температуры и влажности воздуха, а также от направления и скорости ветра.

3. Распределение значений $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb}$ по диапазонам подчиняетсяциальному закону. Наибольшее число значений

$^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb}$ находится в диапазоне от 0,7 до 0,9.

4. Из полученных результатов следует, что аномального сдвига радиоактивного равновесия в подавляющем большинстве случаев не наблюдается. Это свидетельствует о том, что аэрозоли в точке наблюдения имеют в основном континентальное происхождение.

Л и т е р а т у р а

1. Радиация. Дозы, эффекты, риск. / Радиация – М.: Мир. – 1988. – 78 с.

2. Г.Ф. Батраков, В.В. Семенов. Комплекс аппаратуры для измерения концентрации радиоактивных изотопов в приземной атмосфере. Системы контроля окружающей среды. / Сб. научн. трудов МГИ НАНУ. – Севастополь, 2006. – С. 324 – 326.

3. Г.Ф. Батраков, Н.В. Копытина, В.В. Мязин, В.В. Семенов. Анализатор импульсов на микроконтроллере для измерений концентрации гамма-излучающих изотопов в объектах внешней среды. Системы контроля окружающей среды. – / Сб. научн. трудов МГИ НАНУ. – Севастополь, 2007. – С. 292 – 298.