

УДК 504.064.3

© Г. А. Колотков

## РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПОВЫШЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ В АТМОСФЕРЕ, ВЫБРАСЫВАЕМОЙ ПРЕДПРИЯТИЯМИ ЯТЦ

Предложен оригинальный метод дистанционного мониторинга радиоактивных выбросов предприятий ядерно-топливного цикла (ЯТЦ) по вторичным проявлениям в атмосфере. Раскрыты и выявлены проблемы дистанционного обнаружения аварийных атмосферных выбросов предприятий ЯТЦ. Представлены технические параметры радиометрического комплекса.

*Кл. сл.:* выбросы, радиоактивность, мониторинг, радиометр

### ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данного исследования заключается в том, что за последние три десятилетия произошло значительное количество аварий и инцидентов (около двухсот), связанных с предприятиями ядерно-топливного цикла (ЯТЦ). Список наиболее серьезных радиационных аварий от 4-го до 7-го уровней по шкале INES (International Nuclear Event Scale — Международная шкала ядерных событий) включает в себя такие, как атомный комплекс "Селафилд" (Великобритания), АЭС (атомная электростанция) "Три-Майл-Айленд" (США), Чернобыльская АЭС (СССР), АЭС "Фукусима-1" (Япония) и т. п. [1–4]. В результате радиационных аварий в атмосферу Земли было выброшено огромное количество радиоактивного материала, общий объем которого сложно корректно оценить. Длительным периодом полураспада характеризуются основные радионуклиды РБГ (радиоактивные благородные газы), выбрасываемые в атмосферу. В течение продолжительного времени зараженная территория непригодна для проживания человека и ведения сельского хозяйства. Поэтому первоочередной задачей является оперативное оповещение населения в зоне возможного риска радиоактивного загрязнения. Таким образом, одной из важнейших задач дистанционного детектирования радиоактивных выбросов предприятий ЯТЦ является своевременное обнаружение повышенной концентрации радионуклидов в стационарных атмосферных выбросах, а также прогнозический мониторинг распространения радиоактивного шлейфа выброса в режиме реального времени. Необходимо также обратить внимание на тот факт, что, несмотря на аварии и инциденты, связанные с атомной энергетикой, последующие

годы станут рекордными по вводу в строй энергоблоков АЭС [5, 6].

Существующие системы мониторинга радиационного фона основаны на сети стационарных постов, расположенных в пределах территорий предприятий на уровне дыхания (2 м над поверхностью земли), на трубах и крышах прилегающих зданий. Как правило, эти системы измеряют гамма-излучение в районе расположения станции. По данным [7], на Северском химическом комбинате произведено обновление автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (АСКРО), позволяющей измерять не только метеорологические параметры, но и проводить спектрометрический анализ радионуклидного состава выбросов. В среднем данные обновляются один раз в час, что не позволяет рассматривать такую систему как работающую в режиме реального времени, поскольку радиоактивный выброс распространяется со средней скоростью ветра порядка 5 км/ч. Учитывая скорость и направление ветра, радиоактивное облако может опуститься на территории прилегающего населенного пункта. Ограниченность измерений пространственных параметров радиоактивных выбросов АСКРО приводит к вполне понятным выводам: необходима комплексная система дистанционного мониторинга распространения радиоактивных атмосферных выбросов в режиме реального времени [8, 9].

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В основе широко применяемых сцинтилляционных счетчиков и гамма-спектрометров лежат не косвенные, а прямые методы. С их помощью обеспечивается контроль радиационной обстановки

ки, основанный на измерениях интенсивности гамма-излучения. Однако их низкая разрешающая способность и недостаточная чувствительность не позволяют проводить измерения с расстояний более 200 м. Другие типы ионизирующих излучений, такие как альфа и бета, обладают значительно меньшей проникающей способностью и не могут быть зарегистрированы дистанционно [10].

Проведенный обзор настоящих методов и приборов регистрации повышенной радиоактивности в атмосфере представлен в табл. 1 [11–13].

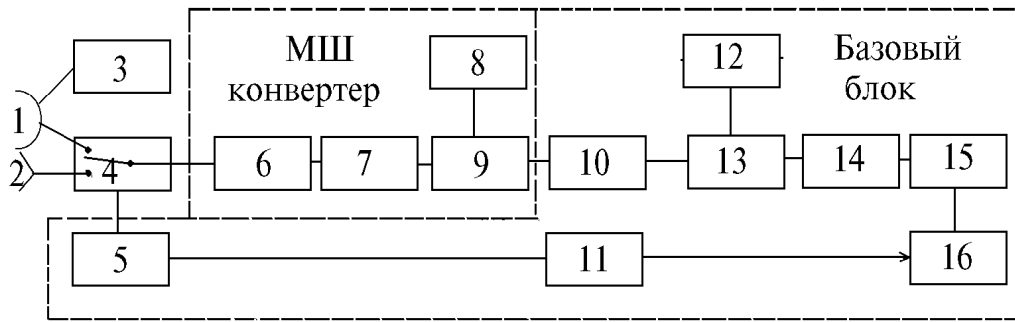
Как видно из таблицы, данные методы не позволяют проводить измерения на расстояниях свыше 10 км, не обладают необходимыми пространным разрешением и мобильностью, а также весьма зависимы от условий окружающей среды.

В этой связи наиболее перспективными выглядят косвенные дистанционные методы детектирования повышенной радиоактивности в атмосфере.

Такие методы основаны на вторичном проявлении радиоактивности в окружающей среде, т. е. в результате радиоактивного выброса в атмосферу бета-радионуклидов в ней образуется повышенная концентрация электронов распада. Сами электроны и их тормозное излучение инициируют фотохимические реакции, в результате которых появляются так называемые "маркеры" (атомы и молекулы) повышенной радиоактивности. По излучению этих нетипичных для стандартной атмосферы атомов и молекул можно судить о наличии в выбросе повышенной концентрации радионуклидов. Подробные расчеты представлены в работе [14]. Таким образом, целью работы является исследование возможностей и разработка дистанционного метода детектирования радиоактивных выбросов предприятий ЯТЦ в режиме реального времени на частотах маркеров спонтанного излучения атомарного водорода (H) и гидроксила (OH) 1420 и 1665–1667 МГц соответственно.

Табл. 1. Методы и приборы регистрации повышенной радиоактивности в атмосфере

Методы и приборы	Дальность, км	Недостатки
Сцинтилляционные датчики, гамма-спектрометры	—	Не является дистанционным
Лазерно-оптические методы	10	Зависимость от метеоусловий
Метод лазерно-индуцированной флуоресценции, основан на измерении и интерпретации спектров флуоресценции, индуцированной в объекте при его освещении монохроматическим излучением	1	Возможно применение для UO <sub>2</sub>
Оптико-акустические методы: основаны на генерации акустических волн при поглощении лазерного излучения	0.01–0.1	Низкая чувствительность во время работы в реальном режиме времени
Метод диодной лазерной спектроскопии, основанный на измерении поглощения облучаемого вещества	10	Применяется для детектирования UF <sub>6</sub> , требует дополнительной информации, например, о размерах радиоактивного облака
Метод лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии, основанный на образовании лазерной искры	0.25	Времязатратный
Пассивные методы: основаны на проявлении вторичных излучений из радиоактивного облака	30	Возможно определить только общее количество (Бк) выброшенной радиоактивности



Структурная схема приемного устройства.

1 — антенна; 2 — облучатель; 3 — поворотное устройство; 4 — переключатель; 5 — коммутатор; 6 — малошумящий усилитель; 7 — фильтр; 8, 12 — гетеродины; 9, 13 — частотные преобразователи (ЧП); 10 — высокочастотный усилитель; 11 — генератор опорного напряжения; 14 — фильтр ПУ ПЧ; 15 — УПЧ; 16 — НЧ-субблок обработки сигнала

### ПРЕДЛОЖЕНИЯ, РЕКОМЕНДАЦИИ И ВЫВОДЫ

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в создании автоматизированных систем более высокой степени оперативности мониторинга и оценки пространственного распределения, направления распространения стационарных и аварийных атмосферных радиоактивных выбросов. Предложенный метод измерения мощности излучения на частотах 1420 и 1665–1667 МГц в сочетании и с учетом конкретных метеоусловий позволит прогнозировать уровень радиоактивного загрязнения в исследуемой зоне и может служить в качестве дополнительного критерия при принятии управленческих решений в случае аварийного выброса. Исследован вопрос о предельных значениях расстояния между

радиоприемным устройством и источником радиоактивного загрязнения объемом  $10 \text{ км}^3$ ; диаметром антенны, принимающей сигнал. Результаты могут быть использованы для решения обратной задачи оценки активности выброса по интенсивности излучения атомарного водорода [15].

Созданный в ИОА СО РАН макет радиометра с использованием параболической антенны диаметром 1.6 метра с диаграммой направленности  $9.8^\circ$  позволил уверенно регистрировать излучение на расстоянии  $\sim 25 \text{ км}$  на частоте 1420 МГц из шлейфа выброса РХЗ, работающего в штатном режиме. Структурная схема макета радиометра представлена на рисунке. Реализация такой схемы позволит проводить измерения более автоматизированно и точно.

Технические характеристики микроволнового радиометра указаны в табл. 2.

Табл. 2. Технические характеристики микроволнового радиометра

Что характеризуется	Характеристика	Значение
Параболическая антенна	Диаметр, м	1.8
	Угол раскрыва, град	67
Ширина диаграммы направленности:	в Е-плоскости, град	9.8
	в Н-плоскости, град	9.2
Коэффициент:	шума МШУ, дБ	0.85
	свободной волны напряжения МШУ	1.6
Полоса пропускания, кГц		10
Выходной температурный дрейф, мВ/°С		$(T \sim 18-40 \text{ }^\circ\text{C}) \leq 0.4$
Чувствительность измерений, Вт		$9.3 \cdot 10^{-19}$

Параболическая антенна имеет диаметр 1.6 м и угол раскрывания  $10^\circ$ , что позволяет получить необходимое усиление (до 20 дБ). У поворотного устройства угол сканирования по азимуту — от 0 до  $180^\circ$  и по углу места — от 0 до  $90^\circ$ . Зависимость шумовой температуры параболической антенны ( $T_{ш.а}$ ) от угла места изменяется от 21 до 50 К при изменении угла места от  $90^\circ$  до  $0^\circ$ .

В работе [16] показано, что мощность излучения на частоте 1420 МГц из шлейфа выброса АЭС для штатного и аварийных режимов работы отличается на один порядок величины, или в 10 раз. Таким образом, появляется дополнительный критерий при принятии управленческих решений в случае аварийного выброса.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60115 мол\_а\_дж.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Список радиационных аварий. URL: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Список\\_радиационных\\_аварий](http://ru.wikipedia.org/wiki/Список_радиационных_аварий) (дата обращения: 29.03.2012).
2. Database of Radiological Incidents and Related Events compiled by Wm. Robert Johnston last modified 20 January 2014. URL: <http://www.johnstonsarchive.net/nuclear/radevents/index.html> (дата обращения: 28.03.2014).
3. *Nenot J.-C.* Radiation accidents over the last 60 years // J. Radiol. Prot. 2009. Vol. 29, no. 3. P. 301–320.
4. Международная шкала ядерных событий. URL: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Международная\\_шкала\\_ядерных\\_событий](http://ru.wikipedia.org/wiki/Международная_шкала_ядерных_событий) (дата обращения: 30.03.2013).
5. Официальный сайт Администрации Томской области. Новости. URL: <http://www.aes.tomsk.ru/news-5758.html> (дата обращения: 13.03.2014).
6. Официальный сайт Администрации Томской области. Новости. URL: <http://www.aes.tomsk.ru/news-5637.html> (дата обращения: 13.01.2014).
7. СХК получил первую партию оборудования для модернизации системы радиационного контроля. URL: <http://www.rosatom.ru/journalist/news/skhk-poluchil-pervuyu-partiyu-oborudovaniya-dlya-modernizatsii-sistemy-radiatsionnogo-kontrolya/> (дата обращения: 01.03.2018).
8. *Долгих С.О., Власов А.А., Малышкин А.И.* Автоматизированная система контроля радиационной обстановки сибирского химического комбината. URL: <http://conf.atomsib.ru/archive/conf2010/section2/7.doc> (дата обращения 1.04.2012).
9. *Колотков Г.А., Пенин С.Т.* Радиометр как перспективный прибор мониторинга радиоактивных выбросов предприятий ЯТЦ // Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии. Матер. V Всерос. конф. мол. уч. 2012. С. 558–560.
10. *Чистякова Л.К.* Дистанционные методы обнаружения радиоактивных аномалий в приземной атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14, № 5. С. 465–472.
11. *Набиев Ш.Ш.* Современные тенденции развития методов дистанционного обнаружения радиоактивных и высокотоксичных веществ // Вестник РАЕН. Физика. 2012. № 1. С. 14–25.
12. *Боярчук К.А., Карелин А.В., Макриденко Л.А.* Перспективы мониторинга из космоса радиоактивных загрязнений на поверхности Земли и в нижних слоях атмосферы // Вопросы электромеханики. 2005. Т. 102. С. 183–209.
13. *Колотков Г.А.* Сравнение перспективных методов мониторинга радиоактивных выбросов ЯТЦ // Теория и практика актуальных исследований: Материалы III Международной научно-практической конф. 30 января 2013 г. Краснодар, 2013. С. 282–284.
14. *Kolotkov G.A., Penin S.T.* Remote monitoring of emission activity level from NPP using radiofrequencies 1420, 1665, 1667 MHz in real time // JENR. 2013. Vol. 115. P. 69–72. DOI: 10.1016/j.jenr.2012.07.004.
15. *Kolotkov G.A.* Radiometric complex for detection of increased radioactivity in gas-aerosol emission from enterprises of nuclear fuel cycle // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2016. Conference Proceedings. Erlagol, Altai. 2016. ISBN 978-1-5090-0785-1. art. no. 7538708 P. 120–123. DOI: 10.1109/EDM.2016.7538708.
16. *Колотков Г.А., Пенин С.Т.* Метод дистанционной диагностики аварийных радиоактивных выбросов АЭС в режиме реального времени // Известия ВУЗов. Физика. 2012. Т. 55, № 2/2. С. 170–173.

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск*

Контакты: *Колотков Геннадий Александрович, kolotkov@iao.ru.*

Материал поступил в редакцию 28.06.2018

## RADIOMETRIC SYSTEM FOR REMOTE DETECTION OF RAISED RADIOACTIVITY IN THE ATMOSPHERE POLLUTED BY NFC ENTERPRISES

**G. A. Kolotkov**

*Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia*

The original method for remote monitoring of radioactive emission from nuclear fuel cycle enterprises by secondary effects in the atmosphere is proposed. New problems of remote monitoring of accidental atmospheric emissions of NFC enterprises are disclosed and identified. The technical parameters of radiometric system are presented.

*Keywords:* emission, radioactivity, monitoring, radiometer

### REFERENCES

1. Wikipedia. *Spisok radiacionnyh avarij* [List of radiation accidents]. URL: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Список\\_радиационных\\_аварий](http://ru.wikipedia.org/wiki/Список_радиационных_аварий) (accessed: 29.03.2012). (In Russ.).
2. *Database of Radiological Incidents and Related Events compiled by Wm. Robert Johnston*. Last modified 20 January 2014. URL: <http://www.johnstonsarchive.net/nuclear/radevents/index.html> (accessed: 28.03.2014).
3. Nenot J.-C. Radiation accidents over the last 60 years. *J. Radiol. Prot.*, 2009, vol. 29, no. 3, pp. 301–320. Doi: 10.1088/0952-4746/29/3/R01.
4. Wikipedia. *Mezhdunarodnaya shkala yadernyh sobytij* [International scale of nuclear events]. URL: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Международная\\_шкала\\_ядерных\\_событий](http://ru.wikipedia.org/wiki/Международная_шкала_ядерных_событий) (accessed: 30.03.2013). (In Russ.).
5. *Atomnaya ehnergetika Tomskoj oblasti. Novosti*. Official'nyj sajt Administracii Tomskoj oblasti. [Official site of Administration of the Tomsk region. News]. URL: <http://www.aes.tomsk.ru/news-5758.html> (accessed: 13.03.2014). (In Russ.).
6. *Atomnaya ehnergetika Tomskoj oblasti. Novosti*. Official'nyj sajt Administracii Tomskoj oblasti. [Official site of Administration of the Tomsk region. News]. URL: <http://www.aes.tomsk.ru/news-5637.html> (accessed: 13.01.2014). (In Russ.).
7. ROSATOM. *SHK poluchil pervuyu partiyu oborudovaniya dlya modernizacii sistemy radiacionnogo kontrolya* [SHK has received the first batch of the equipment for modernization of system of radiation control]. URL: <http://www.rosatom.ru/journalist/news/skhk-poluchil-pervuyu-partiyu-oborudovaniya-dlya-modernizatsii-sistemy-radiatsionnogo-kontrolya/> (accessed: 01.03.2018). (In Russ.).
8. Dolgih S.O., Vlasov A.A., Malyshev A.I. *Avtomatizirovannaya sistema kontrolya radiacionnoj obstanovki sibirskogo himicheskogo kombinata* [The automated control system of a radiation situation of Siberian Chemical Plant]. URL: <http://conf.atomsib.ru/archive/conf2010/section2/7.doc> (accessed: 1.04.2012). (In Russ.).
9. Kolotkov G.A., Penin S.T. [Radiometer as perspective device of monitoring of radioactive emissions of the YaTTs enterprises]. *Materialy V Vserossijskoj konferencii molodyh uchenyh "Materialovedenie, tekhnologii i ekologiya v tret'em tysyacheletii"* [Proceedings of V the All-Russian conference of young scientists "Materials science, technologies and ecology in the third millennium"], 2012, pp. 558–560. (In Russ.).
10. Chistyakova L.K. [Techniques for remotely detecting radioactive anomalies in the near-ground atmosphere]. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and oceanic optics], 2001, vol. 14, no. 5, pp. 465–472. (In Russ.).
11. Nabiev Sh.Sh. [Modern trends in the development of methods of remote detection of the radioactive and highly toxic substances]. *Vestnik RAEN. Fizika* [Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences], 2012, no. 1, pp. 14–25. (In Russ.).
12. Boyarchuk K.A., Karelin A.V., Makridenko L.A. [The prospects of monitoring from space of radioactive pollution on the Earth's surface and in the lower layers of the atmosphere]. *Voprosy ehlektromekhaniki* [Electromechanical matters. VNIIEEM studies], 2005, vol. 102, pp. 183–209. (In Russ.).
13. Kolotkov G.A. [Comparison of perspective methods of monitoring of radioactive emissions of YaTTs]. *Teoriya i praktika aktual'nyh issledovanij: Materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii 30 yanvarya 2013 g* [Theory and practice of relevant researches: Proceedings III of the International scientific and practical conference on January 30, 2013], Krasnodar, 2013, pp. 282–284. (In Russ.).
14. Kolotkov G.A., Penin S.T. Remote monitoring of emission activity level from NPP using radiofrequencies 1420, 1665, 1667 MHz in real time. *JENR*, 2013, vol. 115, pp. 69–72. Doi: 10.1016/j.jenvrad.2012.07.004.

15. Kolotkov G.A. Radiometric complex for detection of increased radioactivity in gas-aerosol emission from enterprises of nuclear fuel cycle. *Conference Proceedings: 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2016*. Erlagol, Altai, 2016. ISBN 978-1- 5090-0785-1. art. no. 7538708, pp. 120–123.  
DOI: 10.1109/EDM.2016.7538708.
16. Kolotkov G.A., Penin S.T. [Method of remote diagnostics of emergency radioactive emissions of the NPP in real time]. *Izvestiya VUZov. Fizika* [News of higher education institutions. Physics], 2012, vol. 55, no. 2/2, pp. 170–173. (In Russ.).

Contacts: *Kolotkov Gennadiy Aleksandrovitch*,  
kolotkov@iao.ru

Article received in edition 28.06.2018