

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.510.42

Влияние климатических факторов на радионуклидный состав атмосферных аэрозолей в условиях г. Ростова-на-Дону

Т.А. Михайлова¹, Е.А. Кацаева², К.С. Машаров², Е.А. Бураева¹,
Ю.В. Попов³, Вербенко И.А.^{1*}

¹ Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194

² Физический факультет Южного федерального университета
344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 5

³ Институт наук о Земле Южного федерального университета
344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 40

Поступила в редакцию 8.06.2020 г.

Приведены результаты изучения радионуклидного состава атмосферных аэрозолей и сезонного поведения загрязняющих веществ в приземном слое воздуха г. Ростова-на-Дону, расположенного в степной зоне. Данные получены на основе исследования проб атмосферных аэрозолей, отобранных в 2001–2009 гг. Объемную активность радионуклидов измеряли гамма-спектрометрическим методом радионуклидного анализа. Показано, что в сезонном поведении радионуклидов в атмосфере наблюдаются весенне-летние максимумы и осенне-зимние минимумы объемной активности, что обусловлено изменением метеопараметров. По индексу загрязнения атмосферы радионуклидами самая высокая степень радиационной опасности для города связана с продуктом распада ²²²Rn–²¹⁰Pb. Отмечена особая значимость ¹³⁷Cs как потенциально опасного радионуклида в случае крупной ядерной аварии.

Ключевые слова: аэрозоли, радионуклиды, тяжелые металлы; aerosols, radionuclides, heavy metals.

Введение

Атмосферные аэрозоли играют важную роль в быстропотекающих климатических процессах. Особенно актуальна для урбанизированных территорий оценка механизмов переноса загрязняющих веществ в приземном слое воздуха. Среди последних интерес представляют естественные и искусственные радионуклиды [1–6]. Они поступают в приземную атмосферу в результате различных процессов: генерации в атмосфере и стратосфере [1, 2] (для радионуклидов космогенного происхождения); ветрового подъема пыли с подстилающей поверхности (радионуклиды земного происхождения и искусственные радионуклиды) [1, 3, 4]; выбросов предприятий, работающих на углеводородном топливе (для ²¹⁰Pb) [2], напрямую в результате аварий на объектах ядерного топливного цикла (искусственные радионуклиды) [5, 6] и т.д.

При оценке содержания и сезонного поведения радионуклидов в приземном слое воздуха, в зависи-

мости от климатических условий, исследователи отмечают максимумы объемной активности (т.е. количество актов распада в единицу времени в единицу объема, Бк/м³) в летний период и минимумы – в зимний [3]. В [1] получена обратная зависимость содержания космогенного ⁷Be от солнечной активности; в основном обратная зависимость активности радионуклидов от количества атмосферных осадков и прямая – от температуры воздуха. В [4] определено влияние метеорологических параметров (в первую очередь температуры воздуха и количества осадков) на содержание радионуклидов в атмосфере. Рассматривается отношение ⁷Be/²¹⁰Pb в различных климатических условиях для оценки применимости указанных радионуклидов в качестве трассеров (индикаторов) атмосферных процессов (например, вертикального перемешивания атмосферы, индикации восходящих и нисходящих воздушных потоков).

Исследования загрязненности атмосферных аэрозолей на территории Российской Федерации многочисленны. Подобные работы ведутся в Сибири и в арктических широтах [7]. На юге европейской части России изучаются особенности распределения ряда радионуклидов в приземном слое воздуха Ростова-на-Дону [8–12]. Это связано как с наличием в Ростовской обл. предприятий ядерной топливной энергетики (Ростовская АЭС), так и с местоположением города – в сельскохозяйственном ре-

* Татьяна Андреевна Михайлова (tatmihaylova@sfedu.ru); Елизавета Александровна Кацаева (lizakashaeva1997@gmail.com); Кирилл Сергеевич Машаров (masharovkirill@gmail.com); Елена Анатольевна Бураева (buraeva@sfedu.ru); Юрий Витальевич Попов (popov@sfedu.ru); Илья Александрович Вербенко (iaverbenko@sfedu.ru).

гионе в степной зоне в умеренно континентальном климате.

Несмотря на многочисленные исследования содержания и поведения радионуклидов в приземной атмосфере в различных регионах Земли, основное внимание уделяется ^7Be , ^{210}Pb , ^{222}Rn , ^{137}Cs , реже ^{40}K [1, 4–6]. При этом практически отсутствуют публикации, в которых в комплексе анализируются и другие распространенные радионуклиды земного происхождения (например, ^{226}Ra и ^{232}Th) [3, 5], в том числе в зависимости от метеопараметров.

В настоящей статье оценено содержание естественных радионуклидов и искусственного ^{137}Cs в приземном слое воздуха Ростова-на-Дону. Проанализировано сезонное распределение радионуклидов в атмосферных аэрозолях. С помощью методов факторного анализа показаны взаимосвязи объемной активности радионуклидов и метеопараметров. Подобные исследования необходимы для расчета уровня загрязненности приземного слоя воздуха крупного промышленного центра.

Материалы и методы

Оценка радионуклидного состава приземного слоя воздуха Ростова-на-Дону проводилась с 2001 по 2009 г. Город расположен в зоне умеренно-континентального климата с прохладной зимой и жарким летом. Рельеф территории преимущественно равнинный, на поверхности залегают рыхлые четвертичные отложения, выходы коренных пород представлены осадочными, легко поддающимися ветряной и водной эрозии, породами.

Для отбора проб атмосферных аэрозолей использовали фильтровентиляционную установку на базе канального электровентилятора с фильтрами из ткани Петрянова ФПП-15-1.7 общей площадью 0,56 м². Средний расход воздуха фильтровентиляционной установки составляет ~630 м³/ч в начале и ~510 м³/ч в конце 7-дневной экспозиции. Реальное время экспозиции определялось электронным хронометром [13].

Содержание естественных радионуклидов (^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{210}Pb , ^{232}Th , ^{40}K , ^7Be) и искусственного ^{137}Cs в атмосферных аэрозолях определяли гамма-спектрометрическим методом радионуклидного анализа при помощи спектрометра гамма-излучения с GeHP-детектором с эффективностью 25% в диапазоне 30–1500 кэВ, отношением пик/комpton 51,7:1 (модель 7229N-7500sl-2520, фирмы Canberra) и набора счетных геометрий «фильтр» (диск высотой $h = 7$ мм, диаметром 50 мм, $V = 0,015$ л) [14].

Результаты и их обсуждение

Содержание и сезонное распределение радионуклидов в атмосферных аэрозолях

В табл. 1 представлено содержание радионуклидов в приземном слое воздуха Ростова-на-Дону. Достаточно сильная изменчивость объемной актив-

ности радионуклидов в первую очередь обусловлена сезонным изменением метеопараметров (количеством осадков, температурой воздуха, скоростью и направлением ветра и др.), а для космогенного ^7Be – еще и солнечной активностью [4], которая выражается в количестве солнечных пятен (числа Вольфа). Для ряда естественных радионуклидов земного происхождения (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{210}Pb , ^{234}Th , ^{238}U) имеет место вклад от антропогенных источников. Например, выхлопы автотранспорта и выбросы ТЭЦ и ТЭС в отопительный сезон [2], а также скорость и направление ветра [1, 2] влияют на содержание ^{210}Pb (и, возможно, на объемную активность ^{226}Ra и ^{232}Th) в приземном слое атмосферы исследуемой области [2].

Таблица 1

Содержание радионуклидов в приземном слое воздуха Ростова-на-Дону за весь период наблюдений ($N = 389$)

Радионуклид	Объемная активность, мкБк/м ³			
	минимум	максимум	среднее	стандартное отклонение
^{238}U	0,77	420,65	3,77	28,34
$^{234}\text{Th}^3$	0,92	1900,00	112,13	150,39
^{226}Ra	2,52	21,73	11,15	5,49
$^{210}\text{Pb}^*$	0,72	4,33	1,64	0,86
^{232}Th	0,49	11,03	4,21	2,69
^{224}Ra	1,86	10,31	3,55	2,95
^{40}K	8,12	104,13	39,9	22,39
$^7\text{Be}^*$	1,86	12,83	6,07	2,97
^{137}Cs	0,07	4,21	1,34	1,08

* ед. измерения – мБк/м³

Искусственный ^{137}Cs поступал в атмосферу в результате испытания ядерного оружия во второй половине XX в. [5] и аварии на Чернобыльской АЭС [6]. В нескольких странах было зафиксировано увеличение количества радиоцезия после аварии на АЭС Фукусима в 2011 г. [5]. В настоящее время основной источник радиоцезия в атмосферных аэрозолях – ветровой подъем пыли с подстилающей поверхности [4]. В целом объемная активность радионуклидов в атмосферных аэрозолях Ростова-на-Дону сопоставима с литературными данными и типична для промышленных центров, расположенных в умеренных широтах [4].

Для оценки радиационной загрязненности атмосферы был рассчитан комплексный индекс загрязнения атмосферы (ИЗА, отн. ед.) [15]: ИЗА = $A/\text{ДОА}$, где A – среднегодовая объемная активность радионуклида, Бк/м³; ДОА – среднегодовая допустимая объемная активность радионуклида, Бк/м³ [15]. Этот индекс позволяет на количественном уровне определить степень радиоэкологической опасности того или иного радионуклида в атмосферном воздухе города. Ниже приведены результаты расчета ИЗА для Ростова-на-Дону.

^{238}U	$9,43 \cdot 10^{-5}$
^{234}Th	$7,48 \cdot 10^{-6}$
^{232}Th	$1,22 \cdot 10^{-3}$
^{226}Ra	$4,48 \cdot 10^{-4}$
^{224}Ra	$2,61 \cdot 10^{-4}$
^{210}Pb	$1,50 \cdot 10^{-2}$

^{137}Cs	$1,33 \cdot 10^{-7}$
^{40}K	$1,48 \cdot 10^{-6}$
^7Be	$2,79 \cdot 10^{-6}$

По ИЗА в Ростове-на-Дону можно выделить следующие группы: I (низкий уровень, $< 10^{-4}$) – ^7Be , ^{40}K , ^{137}Cs , ^{238}U , ^{234}Th ; II (повышенный уровень, $10^{-4} - 10^{-2}$) – ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{224}Ra ; III (высокий уровень, $10^{-2} - 10^{-1}$) – ^{210}Pb .

К группе радионуклидов с высоким уровнем опасности следует отнести долгоживущий продукт распада $^{222}\text{Rn} - ^{210}\text{Pb}$ ($T_{1/2} = 22$ года), который также содержится в воде и в продуктах питания. Поэтому этот радионуклид должен обязательно учитываться при хроническом облучении. В группе с повышенным уровнем ИЗА следует отметить долгоживущие радионуклиды ^{232}Th и ^{226}Ra , которые обычно учитываются при оценке хронических доз облучения. В группе с низким уровнем ИЗА находятся ^7Be и долгоживущий ^{40}K . Также стоит обратить внимание на искусственный ^{137}Cs , несмотря на самый низкий уровень его ИЗА. Данный радионуклид следует непрерывно контролировать в атмосфере из-за веро-

ятности аварийного загрязнения. Это особо актуально для крупных городов, расположенных вблизи АЭС. При этом в настоящее время процесс загрязнения атмосферы этим радионуклидом вторичен (ветровой подъем с земной поверхности, который в Ростове-на-Дону относительно невисок).

Для всех радионуклидов, кроме ^{210}Pb (рис. 1), характерен известный сезонный ход с минимумом объемной активности в осенне-зимний период и максимумом в весенне-летний [3]. Подобное поведение обусловлено весенне-летней и осенне-зимней перестройкой атмосферы [1–3]. При этом в условиях Ростова-на-Дону для ^{232}Th , ^{224}Ra , ^{226}Ra , ^{40}K и ^{137}Cs четкий максимум объемной активности прослеживается с июля по август (рис. 2). Для естественного радионуклида ^{210}Pb увеличение объемной активности отмечается летом и зимой, причем зимний максимум значительно выше летнего. Подобное сезонное распределение содержания ^{210}Pb связано с его техногенным поступлением в атмосферу в отопительный период при сжигании углеводородного топлива [4].

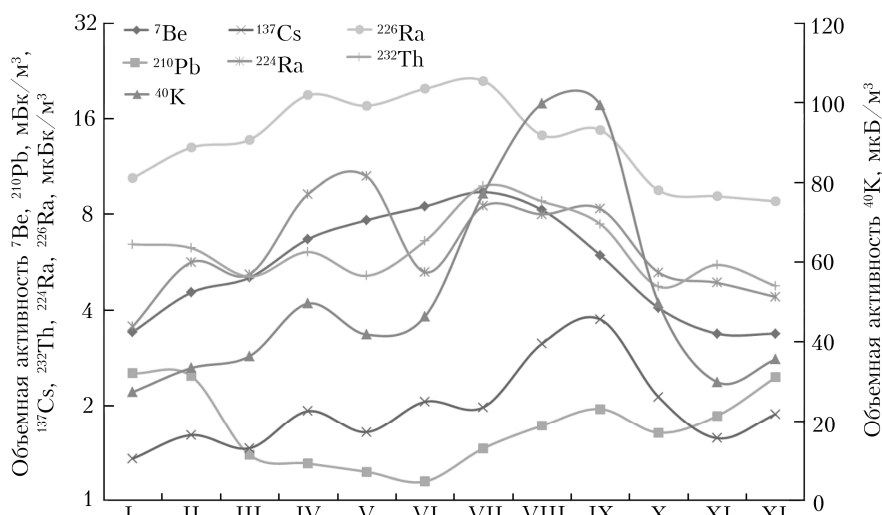


Рис. 1. Сезонные изменения усредненных за весь период наблюдений объемных активностей радионуклидов

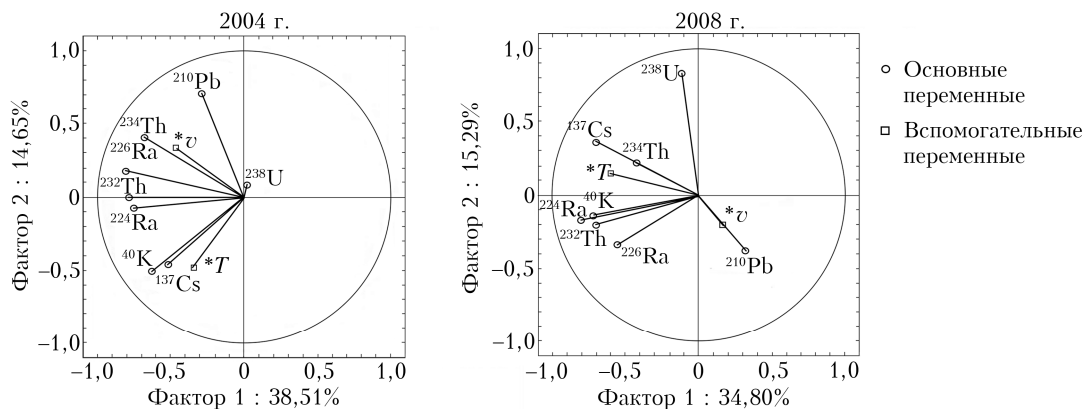


Рис. 2. Результаты факторного анализа среднемесячной объемной активности радионуклидов, среднемесячной температуры воздуха (T , °C) и скорости ветра (v , м/с) в 2004 и 2008 гг.; метеопараметры без статистически значимых связей с распределением радионуклидов исключены из анализа

Зависимость объемной активности атмосферных аэрозолей от метеопараметров

Для изучения влияния метеорологических параметров на содержание и сезонное поведение радионуклидов в приземной атмосфере Ростова-на-Дону проведен анализ изменений климатических факторов за 2001–2009 гг.

За исследуемый период наблюдались незначительные вариации среднегодовых температуры воздуха, количества осадков, относительной влажности воздуха и атмосферного давления (табл. 2), а средняя годовая скорость ветра увеличилась в два раза [16].

Таблица 2

Климатические параметры Ростова-на-Дону за весь период наблюдений

Год	T , °C	J , %	P , мм рт.ст.	v , м/с	W	R , мм	Z , мг/м ³
2001	12,82	69,4	755,32	1,90	114,34	804	0,06
2002	9,93	66,93	756,12	1,81	104,12	551	0,07
2003	8,45	70,71	756,73	1,95	62,53	619	0,08
2004	9,91	74,51	755,51	1,75	40,14	932	0,09
2005	10,49	71,87	755,98	1,87	29,73	690	0,13
2006	10,56	69,28	755,85	3,16	15,19	568	0,10
2007	11,11	65,42	755,44	4,29	7,74	367	0,07
2008	9,84	70,79	756,60	4,32	2,90	435	0,10
2009	10,82	68,41	754,54	4,26	2,02	606	0,09

Примечание. J – относительная влажность, W – число солнечных пятен, R – количество осадков, Z – удельная загрязненность воздуха, P – атмосферное давление; все метеопараметры усреднялись за каждый год.

Для установления зависимости между изменениями метеопараметров и объемной активностью радионуклидов (использованы среднемесячные данные) применены методы многомерного статистического анализа. Среди метеорологических параметров значимый вклад в распределение вносят скорость ветра и температура воздуха, отражающая сезонность.

Результаты факторного анализа указывают (см. рис. 2), что распределение радионуклидов в целом слабо дифференцированное. В 2001–2005 гг. наиболее устойчивая связь выявляется между температурой и содержанием ⁴⁰K и ¹³⁷Cs в приземном слое воздуха. Это может объясняться поступлением указанных радионуклидов в атмосферу с ветровым подъемом пыли в засушливые периоды, что особенно актуально в условиях Ростова-на-Дону в августе и сентябре (сбор урожая). С увеличением скорости ветра в 2006 г. дифференцированность радионуклидов усиливается. При этом прослеживается связь скорости ветра и объемной активности ²¹⁰Pb. На поступление последнего в атмосферу урбанизированных территорий влияет сразу ряд факторов: эманация и последующий распад газа радона из почвы и материалов различных строений, прямое поступление радона и ²¹⁰Pb с выхлопами автотранспорта, выбросы ²¹⁰Pb предприятиями, сжигающими углеводородное топливо. Увеличение среднегодовой скорости ветра привело к поступлению ²¹⁰Pb

в атмосферу за счет подъема пыли и радоновых эманаций из приземного слоя воздуха.

Заключение

Удельную активность естественных радионуклидов и искусственного ¹³⁷Cs в условиях Ростова-на-Дону можно рассматривать как характерную для крупных городов, расположенных в степной зоне умеренного климата. Решающую роль в распределении ²²⁶Ra, ²³²Th, ²²⁴Ra, ⁴⁰K, ⁷Be, ¹³⁷Cs играют сезонные климатические изменения, коррелируемые со среднемесячной температурой; для этих радионуклидов наблюдается весенне-летний максимум объемной активности. В сезонном распределении ²¹⁰Pb наблюдаются максимумы в осенне-зимние и весенне-летние периоды. При этом увеличение скорости ветра свыше ~3–4 м/с приводит к подъему ²¹⁰Pb с пылью и производными радоновых эманаций из приземного слоя воздуха и значимому увеличению его вклада в загрязнение атмосферы. По индексу загрязнения атмосферы радионуклидами самая высокая степень радиационной опасности связана с продуктом распада ²²²Rn–²¹⁰Pb. Также следует обращать особое внимание на искусственный ¹³⁷Cs как на потенциально опасный радионуклид в случае крупной ядерной аварии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, в рамках государственного задания в области научной деятельности Южного федерального университета (тема № БАЗ0110/20-3-07ИФ).

1. Grossi C., Ballester J., Serrano I., Galmarini S., Camacho A., Curcol R., Morgui J.A., Rodo X., Duch M.A. Influence of long-range atmospheric transport pathways and climate teleconnection patterns on the variability of surface ²¹⁰Pb and ⁷Be concentrations in southwestern Europe // J. Environ. Radiat. 2016. V. 165. P. 103–114.
2. Chham E., Pinero-García F., Gonzalez-Rodelas P., Ferro-García M.A. Impact of air masses on the distribution of ²¹⁰Pb in the southeast of Iberian Peninsula air // J. Environ. Radiat. 2017. V. 177. P. 169–183.
3. Syarbaini S., Makhsun M., Wahyudi W., Syahrial S., Jasmiyati J. Release of radioactive particulates into the air during forest fire in Riau Province, Indonesia // Atom. Indones. 2019. V. 45, N 2. P. 81–87.
4. Sýkora I., Holý K., Jeskovský M., Müllerová M., Bulko M., Povinec P.P. Long-term variations of radionuclides in the Bratislava air // J. Environ. Radiat. 2017. V. 166. P. 27–35.
5. Inoue M., Shirota Y., Nagao S., Kofuji H., Volkov Y.N., Nishioka J. Migration of the FDNPP-derived ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs along with ²²⁶Ra and ²²⁸Ra concentrations across the northwestern North Pacific Ocean // J. Environ. Radiat. 2016. V. 162–163. P. 33–38.
6. Carvalho F.P., Reis M.C., Oliveira J.M., Malta M., Silva L. Radioactivity from Fukushima nuclear accident detected in Lisbon, Portugal // J. Environ. Radiat. 2012. V. 114. P. 152–156.
7. Панов А.В., Хайнцценберг И., Бурмили В., Отто Р., Чи С., Андреа М. Атмосферные аэрозоли над лесными экосистемами средней Сибири // Изв. РАН. Сер. География. 2013. № 3. С. 47–54.

8. Буряева Е.А., Давыдов М.Г., Зорина Л.В., Мальшевский В.С., Стасов В.В. Содержание ^7Be в приземном слое воздуха г. Ростова-на-Дону // АНРИ. 2007. № 1. С. 63–67.
9. Buraeva E.A., Davydov M.G., Zorina L.V., Malyshevskii V.S., Stasov V.V. Content of cosmogenic ^7Be in the air layer at the ground at temperate latitudes // Atom. Energy. 2007. V. 102, N 6. P. 463–468.
10. Зорина Л.В., Буряева Е.А., Давыдов М.Г., Стасов В.В. Радионуклид ^{210}Pb в атмосферных аэрозолях в приземном слое воздуха и метеопараметры г. Ростова-на-Дону // Изв. вузов. Сев.-Кавказ. регион. Естественные науки. 2008. № 5. С. 108–118.
11. Зорина Л.В., Буряева Е.А., Давыдов М.Г., Стасов В.В. Сезонная зависимость ^{210}Pb в приземном слое воздуха г. Ростова-на-Дону // АНРИ. 2008. № 3. С. 43–48.
12. Стасов В.В., Буряева Е.А., Мальшевский В.С., Нефедов В.С., Дергачева Е.В. Исследование источников
13. поступления и распределения ^{40}K в приземном слое атмосферы г. Ростова-на-Дону // Совр. проблемы науки и образования. 2013. № 5. URL: <http://www.science-education.ru/111-10344> (дата обращения: 1.06.2020).
14. Buraeva E.A., Davydov M.G., Zorina L.V., Stasov V.V. Components of the background of Ge(Li) and Ge detectors in passive shielding // Atom. Energy. 2007. V. 103, N 5. P. 895–900.
15. Bodrov I.V., Buraeva E.A., Davydov M.G., Mareskin S.A. Instrumental determination of Uranium and Thorium in natural objects // Atom. Energy. 2004. V. 96, N 4. P. 246–249.
16. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 225 с.
17. Метеосервис. Передовые технологии. Точные прогнозы. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.meteoservice.ru> (дата обращения 14.05.2020).

T.A. Mikhailova, E.A. Kashchaeva, K.S. Masharov, E.A. Buraeva, Yu.V. Popov, I.A. Verbenko.
Climatic factors of the radionuclide composition of atmospheric aerosols in the conditions of Rostov-on-Don.

We present the results of the study of the radionuclide composition of atmospheric aerosols and seasonal behavior of pollutants in the surface air layer in Rostov-on-Don, located in the steppe zone. The data were obtained from the study of atmospheric aerosol samples taken in 2001–2009. The bulk activity of radionuclides was measured using the gamma-spectrometric radionuclide analysis. It is shown that the seasonal behavior of radionuclides in the atmosphere shows spring-summer maxima and autumn-winter minima in their bulk activity. This behavior is caused by changes in weather parameters. According to the index of atmospheric pollution with radionuclides, it is shown that the highest degree of radiation hazard for the city is associated with the product of ^{222}Rn – ^{210}Pb decay. The special significance of ^{137}Cs as a potentially dangerous radionuclide in the event of a major nuclear accident is noted.