

УДК 550.35: 551.594

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИОНИЗАЦИИ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ ВОЗДУХА С УЧЕТОМ ВКЛАДА ПРИРОДНЫХ РАДИОНУКЛИДОВ****Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н., Петров А.И., Бураева Е.А., Дергачева Е.В., Кубрина В.К., Колесников И.А., Егоров Е.В.***Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону,**e-mail: buraeva\_elen@mail.ru, georgpu@rambler.ru, lera.kubrina@yandex.ru*

В работе представлены данные по мощности эквивалентной дозы (МЭД) гамма-излучения почв ряда регионов Северного Кавказа. Средняя МЭД гамма-излучения составляет 0,14; 0,14; 0,21 и 0,26 мкЗв/ч для Ростовской области, республик Адыгея, Северная Осетия – Алания и Кабардино-Балкария соответственно. Средние удельные активности радионуклидов в почвах отдельных пунктов региона исследования отличаются в 2–5 раз, в зависимости от типа почв, почвообразующих пород, условий формирования почв, особенностей рельефа и климата. Объемная активность  $^{222}\text{Rn}$  в приземном слое воздуха варьирует от 10–15 Бк/м<sup>3</sup> в г. Ростове-на-Дону и в высокогорьях Кабардино-Балкарии и до 100 Бк/м<sup>3</sup> в республике Адыгея. Плотность ионизации приземного слоя воздуха (интенсивность ионообразования) линейно возрастает в зависимости от содержания естественных и искусственных радионуклидов в почве. Значимый вклад в плотность ионизации приземного воздуха дает радиоактивный газ  $^{222}\text{Rn}$ .

**Ключевые слова:** естественные радионуклиды, искусственные радионуклиды, активность, ионизация, приземный слой атмосферы, плотность потока  $^{222}\text{Rn}$

**THE STUDY OF IONIZATION OF SURFACE AIR WITH THE CONTRIBUTION OF NATURAL RADIONUCLIDES****Petrova G.G., Panchishkina I.N., Petrov A.I., Buraeva E.A., Dergacheva E.V., Kubrina V.K., Kolesnikov I.A., Egorov E.V.***Southern Federal University, Rostov-on-Don,**e-mail: buraeva\_elen@mail.ru, georgpu@rambler.ru, lera.kubrina@yandex.ru*

The paper presents data on the equivalent dose rate of gamma radiation of the Northern Caucasus. The average dose rate of gamma radiation is 0,14; 0,14; 0,21 and 0,26 mSv/h for the Rostov Region, Republic of Adygea, Republic of North Ossetia-Alaniya and Republic of Kabardino-Balkar, respectively. The average activity concentrations of radionuclides in the soil of the study region vary in 2–5 times, depending on the type of soil parent rock material, the conditions of soil formation, topography and climate. The volume activity concentration of  $^{222}\text{Rn}$  in the ground layer of air in Rostov-on-Don and in the highlands of Kabardino-Balkaria varies from 10 to 15 Bq/m<sup>3</sup>, and amounts 100 Bq/m<sup>3</sup> in the Republic of Adygea. The surface air ionization density increases linearly as a function of the content of natural and artificial radionuclides in the soil. A significant contribution to the surface air ionization density enables a radioactive gas  $^{222}\text{Rn}$ .

**Keywords:** natural radionuclides and artificial radionuclides, activity, ionization, the surface layer of the atmosphere,  $^{222}\text{Rn}$  flux density

Электрические процессы в приземном слое воздуха и особенно в системе почва – атмосфера достаточно сложны. Атмосферно-электрические характеристики определяются множеством процессов и факторов: перемешиванием атмосферы, интенсивностью ионизации, загрязненностью и увлажненностью воздуха, наличием таких явлений, как туман, дождь, снег; температура и давление воздуха и так далее – также меняются в течение суток и на протяжении года.

В целом атмосферу можно рассматривать как коллоидную систему, в которой растворителем является смесь газов – воздух, а растворенной субстанцией являются твердые и жидкие примеси – аэрозоли. К аэрозольным компонентам природного происхождения приземного слоя воздуха относятся: минеральная и вулканическая

пыль, частицы, образовавшиеся в результате конденсации летучих органических соединений, дым от лесных и степных пожаров, выхлопы автомобилей и промышленные выбросы (дым, сажа, дорожная пыль и др.), продукты химических реакций газов, частицы почвенного происхождения, океанические аэрозоли и пр. Частицы, размером 0,01–0,2 мкм, оказывают существенное влияние на значения величин атмосферного электричества.

Основными ионизаторами приземной атмосферы в рамках всего земного пространства являются радиоактивные излучения естественных и искусственных радионуклидов, содержащихся в литосфере и атмосфере, солнечная радиация и космическое излучение. Причем в зависимости от геолого-географической характеристики

региона вклады земной и космогенной составляющей в процессы ионизации атмосферы могут существенно варьировать.

**Целью** работы является оценка вклада природных радионуклидов в ионизацию приземного слоя воздуха.

**Материалы и методы исследования**

Северный Кавказ расположен на крайнем юго-западе России (между 47°12' и 41°11' с.ш. и 36°32' и 48°35' в.д.) на стыке умеренного и субтропического климатических поясов. На территории Северного Кавказа расположены 7 Республик: Адыгея, Карачаево-Черкесия, Кабардино-Балкария, Северная Осетия – Алания, Ингушетия, Чеченская республика, Дагестан; 2 края: Краснодарский, Ставропольский; а также частично районы Ростовской области и Калмыкии. В природном отношении Северный Кавказ включает в себя два различных типа территорий – равнины бассейна Дона и Предкавказья и горная и предгорная части Кавказа.

Исследования проводились в различных регионах Северного Кавказа, преимущественно в горных районах: Республики Адыгея, Северная Осетия, Кабардино-Балкария и на ряде степных территорий Ростовской области. Измерения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД, мкЗв/ч), объемной активности <sup>222</sup>Rn в воздухе и отбор почвенных проб были проведены в экспедициях 2013–2015 годов.

Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения определяли дозиметрами-радиометрами СРП-88н, ДРБП-03, ДКС-96; радионуклидный состав почв – гамма-спектрометрическим методом с использова-

нием сцинтилляционного спектрометра «Прогресс-Гамма». Для измерения объемной активности <sup>222</sup>Rn в воздухе применяли радиометры радона РРА-01М-03 с пробоотборным устройством ПОУ-04. Методики отбора и подготовки проб использовали стандартные.

**Результаты исследования и их обсуждение**

В табл. 1 приведены сводные данные по мощности эквивалентной дозы гамма-излучения территорий Северного Кавказа, определенные в экспедициях 2013–2014 годов.

С увеличением высоты над уровнем моря, по сравнению с равнинными территориями, МЭД в высокогорье возрастает, как видно по нашим данным, почти вдвое [2]. Это обусловлено возрастанием интенсивности космического излучения в высокогорных районах. Также для горных территорий характерны выходы пород с повышенным содержанием естественных радионуклидов. Горным породам присуща повышенная эманация <sup>222</sup>Rn, особенно на территориях с тектоническими нарушениями (разломы и трещины земной коры). В табл. 2 приведены средние удельные активности естественных радионуклидов и искусственного <sup>137</sup>Cs в верхнем (0–5 см) слое почвы на различных территориях Северного Кавказа.

**Таблица 1**

Мощность эквивалентной дозы (МЭД) на различных территориях

Регион	Высота над уровнем моря, м	Количество измерений	МЭД, мкЗв/ч		
			Минимум	Максимум	Среднее арифметическое
Ростовская область (степные районы)	10–200	1168	0,05	0,29	0,13
Республика Адыгея (горные районы)	500–800	977	0,02	0,35	0,14
Республика Северная Осетия – Алания (Дигорский район)	2000–2200	3722	0,14	0,43	0,21
Республика Кабардино-Балкария (пики Чегет и Терскол)	3050–3150	1248	0,11	0,57	0,26

**Таблица 2**

Средние удельные активности радионуклидов в 0–5 см почвенном слое

Район	Средняя удельная активность ± Погрешность, Бк/кг			
	<sup>137</sup> Cs	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K
Ростовская область (степные районы)	34,9 ± 3,5	22,3 ± 2,4	25,1 ± 2,6	380,4 ± 40,1
Республика Адыгея (горные районы)	42,0 ± 3,8	29,8 ± 2,7	30,8 ± 3,1	447,3 ± 45,5
Республика Северная Осетия – Алания (Дигорский район)	230,2 ± 24,2	41,1 ± 3,9	38,7 ± 3,5	667,3 ± 63,2
Республика Кабардино-Балкария (пики Чегет и Терскол)	53,6 ± 5,4	39,8 ± 4,1	58,2 ± 5,4	681,0 ± 70,5

Содержание естественных радионуклидов  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  в высокогорных районах Северной Осетии и Кабардино-Балкарии почти в два раза выше, чем в степях Ростовской области, что обусловлено влиянием радионуклидного состава почвообразующих пород на радиоактивность почв [5]. В горных районах имеют место выходы пород с высоким содержанием естественных радионуклидов (граниты, гранодиориты и др.). На высокое содержание  $^{226}\text{Ra}$  в почвах может оказывать влияние повышенное содержание урана в почвообразующих породах, характерное для территорий с тектоническими нарушениями.

Значимые вариации искусственного  $^{137}\text{Cs}$  связаны как с неравномерностью выпадений данного радионуклида после аварии на Чернобыльской АЭС и испытаний ядерного оружия, так и с влиянием особенностей рельефа и процессов почвообразования в регионах исследования.

Одним из наиболее важных атмосферно-электрических параметров является электропроводность атмосферы, которая для приземного слоя, толщиной в несколько десятков метров, на 80% обеспечивается мгновенным значением концентрации ионов в воздухе, образованных полями ионизирующих излучений, генерируемых при

распаде радиоактивных элементов, находящихся в почве и атмосфере [1, 6].

В данной работе для оценки зависимостей плотности ионизации атмосферы от удельной активности почвенных радионуклидов и плотности ионизации от высоты над поверхностью земли была использована модель [3]. Вертикальные распределения плотности ионизации атмосферы за счет почвенных радионуклидов были аппроксимированы функцией

$$q(z) = Be^{Cz + Dz^E}, \quad (1)$$

где  $B$  – переменный коэффициент, зависящий от типа  $i$ -го радионуклида и его удельной активности  $A_i$ , Бк/кг;  $C$ ,  $D$  и  $E$  – постоянные коэффициенты, зависящие от типа  $i$ -го радионуклида.

Из рис. 1 видно, что плотность ионизации линейно возрастает в зависимости от удельной активности естественных радионуклидов. Максимальное влияние на ионизацию оказывают  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{40}\text{K}$ . Значение плотности ионизации, обусловленной радионуклидами  $^{232}\text{Th}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , примерно в два раза меньше. Ниже приведены особенности высотного распределения плотности ионизации, обусловленной разными радионуклидами на различных территориях.

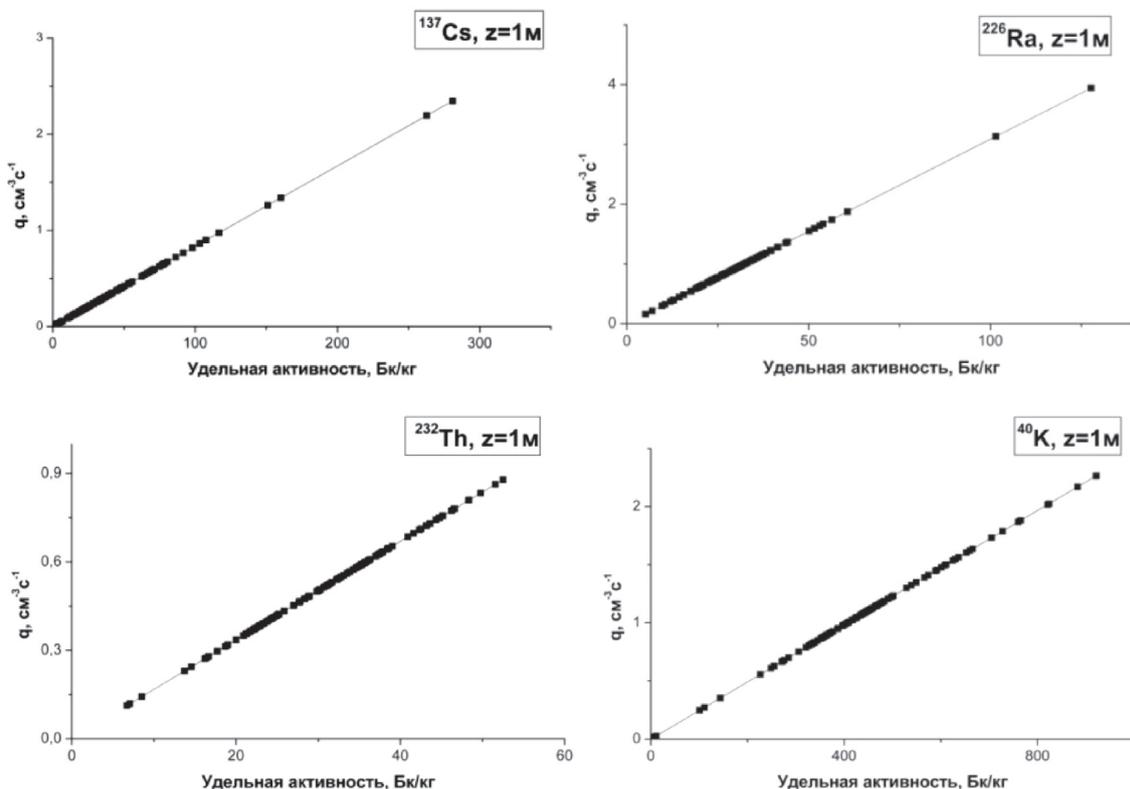


Рис. 1. Графики зависимости функции плотности ионизации от удельной активности почвенных радионуклидов

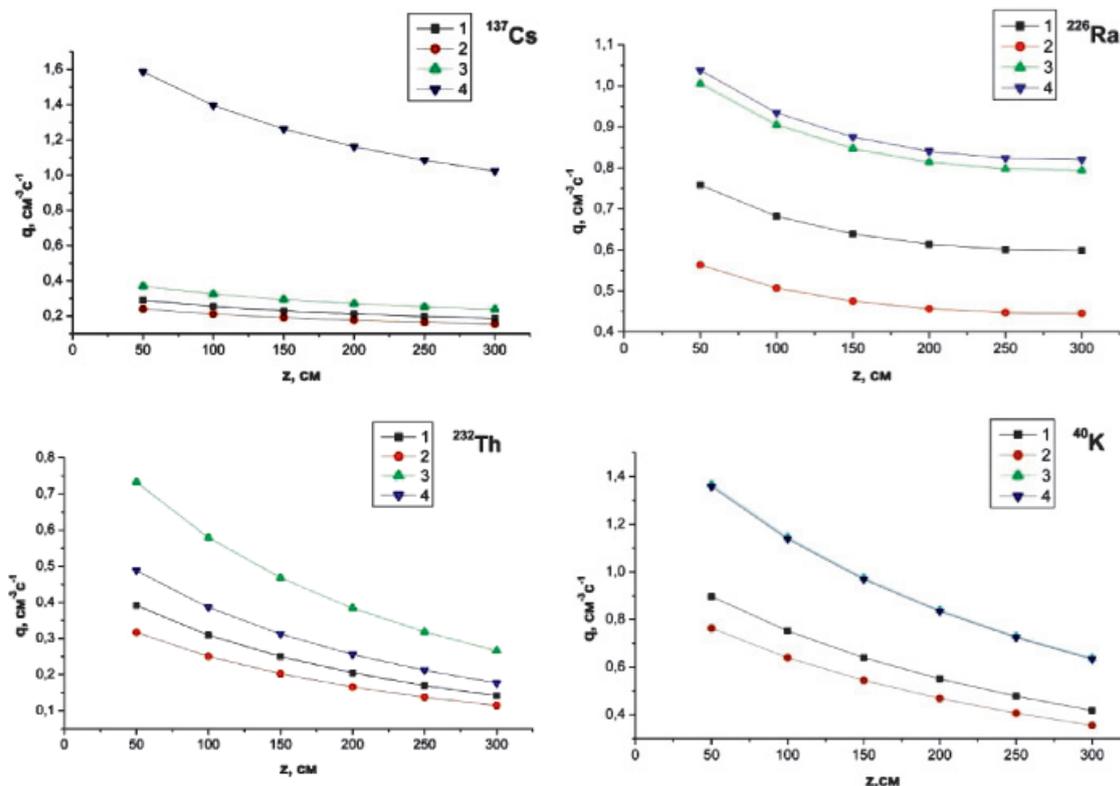


Рис. 2. Графики зависимости плотности ионизации от природных радионуклидов и  $^{137}\text{Cs}$  от высоты над земной поверхностью:

1 – Адыгея; 2 – Ростовская область; 3 – Кабардино-Балкария; 4 – Северная Осетия

Снижение плотности ионизации с ростом высоты над поверхностью земли может быть обусловлено длиной пробега ионизирующих частиц в приземном слое атмосферы.

Также имеет место эманация  $^{222}\text{Rn}$ . Авторы работы [1] предлагают следующую модель интенсивности ионообразования от  $^{222}\text{Rn}$ :

$$q_{Rn} = kRn, \quad (2)$$

где  $Rn$  – концентрация  $^{222}\text{Rn}$ , Бк/м<sup>3</sup>;  $k$  – коэффициент, показывающий, сколько пар ионов образуется в 1 см<sup>3</sup> за 1 с при одном  $\alpha$ -распаде, то есть при  $Rn = 1$  Бк/м<sup>3</sup> (1 Бк = 1 распад/с).

$$k = \frac{E}{\omega\tau} \approx 0,2 \text{ пар ионов/сБк,}$$

где  $E$  – энергия  $\alpha$ -частиц (3 МэВ);  $\omega \approx 33$  эВ – средняя энергия ионообразования;  $\tau \approx 3,8$  дней – период полураспада  $^{222}\text{Rn}$  [4].

На территории Республик Адыгея и Кабардино-Балкария объемную активность  $^{222}\text{Rn}$  измеряли на высоте 1 м от поверхности земли, на территории г. Ростова-на-Дону – на высоте 15 м от поверхности земли (табл. 3). В целом интенсивность ионообразования в приземном слое воздуха максимальна на территориях с высоким содержанием  $^{222}\text{Rn}$ .

По литературным данным [1] вклад в ионизацию приземного слоя воздуха от почвенных радионуклидов составляет 35–45%. В данной работе был оценен вклад от почвенных радионуклидов (естественного и искусственного происхождения) в плотность

Таблица 3

Интенсивность ионообразования в приземном слое воздуха от  $^{222}\text{Rn}$  на различных территориях (дневные часы)

Район	Объемная активность $^{222}\text{Rn}$ , Бк/м <sup>3</sup>	Интенсивность ионообразования, см <sup>-3</sup> с <sup>-1</sup>
г. Ростов-на-Дону	10–15	2–3
Республика Адыгея (горные районы)	50–110	10–22
Республика Кабардино-Балкария (пики Чегет и Терскол)	10–20	2–4

ионизации приземного слоя воздуха. Использовали средние арифметические удельные активности радионуклидов в 0–5 см почвенном слое без учета их вариаций по площади.

радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$  наземных экосистем при фоновом содержании земных радионуклидов, вклад радиоцезия в плотность ионизации приземного слоя воздуха может оказаться существенным.

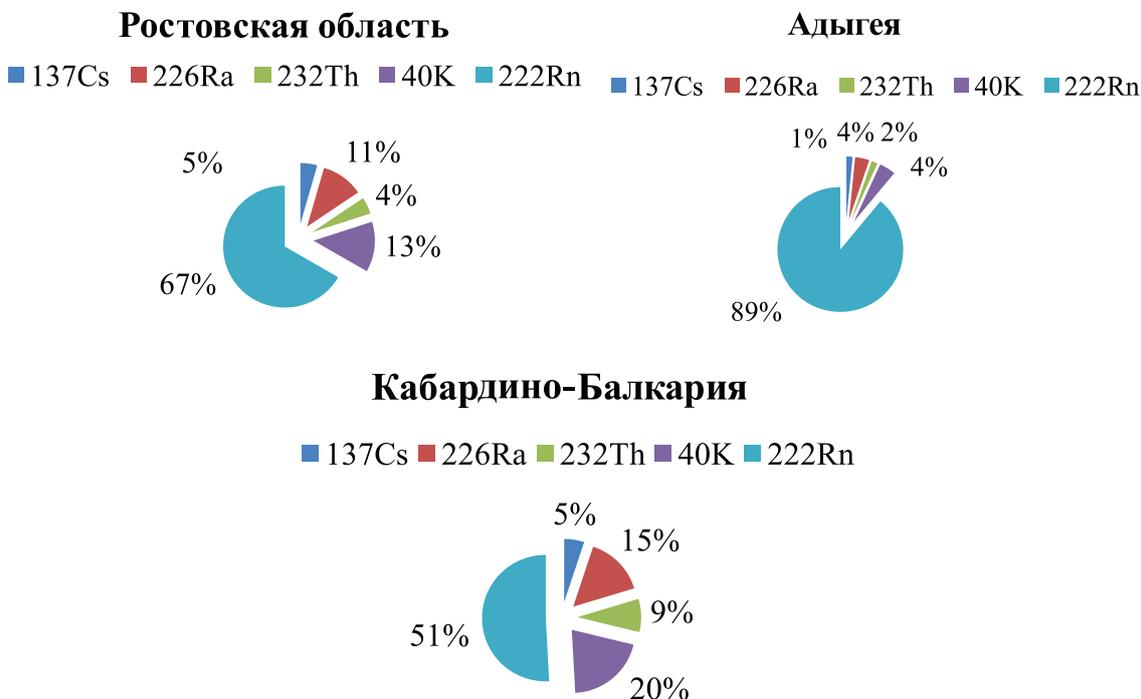


Рис. 3. Вклад почвенных радионуклидов в плотность ионизации приземного слоя воздуха

Как видно из рис. 3, вклад естественных радионуклидов  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и искусственного  $^{137}\text{Cs}$  в плотность ионизации приземного слоя воздуха на уровне земли в зависимости от удельной активности радионуклидов в верхнем почвенном слое может достигать от 20–25 % (для республики Адыгея) до 50 % (для республики Кабардино-Балкария). Причем значимую роль в ионизации приземной атмосферы могут играть  $\alpha$ -излучающий радионуклид  $^{226}\text{Ra}$  и  $\beta$ -излучающий  $^{40}\text{K}$ . Так как плотность ионизации практически линейно возрастает в зависимости от содержания радионуклидов в почве, вклады данных элементов в ионизацию приземного слоя воздуха могут существенно варьировать.

В целом в почвах Северного Кавказа удельная активность  $^{226}\text{Ra}$  может достигать нескольких сотен Бк/кг, а  $^{40}\text{K}$  – нескольких тысяч Бк/кг. Также необходимо учитывать и  $\alpha$ -излучающий радионуклид земного происхождения  $^{232}\text{Th}$  на территориях с ториевыми аномалиями. А в регионах со значительными загрязнениями искусственным

Также в работе не учитывался вклад в ионизацию приземного слоя воздуха от остальных радионуклидов, входящих в семейства урана ( $^{238}\text{U}$ ), актиноурана ( $^{235}\text{U}$ ) и тория ( $^{232}\text{Th}$ ) –  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{225}\text{Ac}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{208}\text{Tl}$  и др., а также радиоактивных газов торона и актинона ( $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{219}\text{Rn}$ ).

#### Заключение

В работе проанализированы данные по мощности эквивалентной дозы гамма-излучения Северного Кавказа. Средняя МЭД гамма-излучения составляет 0,14; 0,14; 0,21 и 0,26 мкЗв/ч для Ростовской области, республик Адыгея, Северная Осетия и Кабардино-Балкария соответственно. Подобное распределение МЭД гамма-излучения обусловлено излучением почвенных радионуклидов, эманацией  $^{222}\text{Rn}$  и космическим излучением на исследуемых территориях.

Средние удельные активности естественных и искусственных радионуклидов в почвах отдельных пунктов региона исследования отличаются в 2–5 раз,

в зависимости от типа почв, почвообразующих пород, условий формирования почв, особенностей рельефа и климата. Объемная активность  $^{222}\text{Rn}$  в приземном слое воздуха г. Ростова-на-Дону и в высокогорьях Кабардино-Балкарии составляет 10–15 Бк/м<sup>3</sup>, в республике Адыгея может достигать 100 Бк/м<sup>3</sup>.

Плотность ионизации приземного слоя воздуха линейно возрастает в зависимости от содержания естественных и искусственных радионуклидов в почве. Доля радионуклидов земного происхождения и искусственного радиоцеция в суммарной плотности ионизации атмосферы может составлять от 20 до 50 % и существенно зависит от радиоактивности почв территорий исследования. Значимый вклад в плотность ионизации приземного воздуха вносит радиоактивный газ  $^{222}\text{Rn}$ .

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант 16-05-00930 А.*

### Список литературы

1. Березинский Н.А. Влияние процессов подготовки землетрясений на концентрацию радона и электропроводность приземной атмосферы / Н.А. Березинский и др. // Геология и геофизика Юга России. – 2011. – № 2. – С. 14–21.
2. Бураева Е.А., Малышевский В.С., Нефедов В.С., Тимченко А.А., Горлачев И.А., Семин Л.В., Шиманская Е.И., Триболина А.Н., Кубрин С.П., Гуглев К.А., Толпыгин И.Е., Мартыненко С.В. Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения природных и урбанизированных территорий Северного Кавказа // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10–5. – С. 1073–1077.
3. Закау В.В. Ионизация приземной атмосферы излучением почвенных радионуклидов / В.В. Закау и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317, № 2. – С. 171–175.
4. Морозов В.Н. Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учетом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ. – СПб.: РГТУ, 2011. – 253 с.
5. Неганова К.С., Бураева Е.А., Давыденко А.М., Нефедов В.С., Дергачева Е.В., Стасов В.В., Аветисян С.Р., Гончарова Л.Ю., Вардуни Т.В., Данилова А.А. Особенности распределения радионуклидов в аллювиальных почвах Северного Кавказа // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12–1. – С. 131–135.
6. Редин А.А. Математическое моделирование электродинамических процессов в приземном слое в условиях аэрозольного загрязнения атмосферы / А.А. Редин и др. // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 8. – С. 111–121.