

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
EARTH SCIENCES

УДК 551.79:[550.42] (476)
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-3-355-360>

Поступило в редакцию 23.02.2021
Received 23.02.2021

М. И. Автушко¹, академик А. В. Матвеев², С. А. Исаченко¹

¹*Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь*

²*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**НОВЫЕ ДАННЫЕ О ПОСТУПЛЕНИИ РАДОНА
В СРЕДУ ОБИТАНИЯ ЧЕЛОВЕКА**

Аннотация. Показана значимая роль радона, поступающего к земной поверхности из атмосферы, в формировании уровня его концентрации в приземных слоях атмосферного воздуха. Вынос радона из атмосферы спорадически выпадающими дождями количественно соизмерим с его выделением из грунта в атмосферу. Установлена устойчивая зависимость уровня концентрации радона в приземной атмосфере от влажности воздуха.

Ключевые слова: радон, жидкие атмосферные осадки, относительная влажность атмосферного воздуха, температура воздуха

Для цитирования. Автушко, М. И. Новые данные о поступлении радона в среду обитания человека / М. И. Автушко, А. В. Матвеев, С. А. Исаченко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 3. – С. 355–360. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-3-355-360>

Mikhail I. Autushka¹, Academician Aleksey V. Matveyev², Sergei A. Isachenko¹

¹*Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus*

²*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

RECENT DATA ON RADON ENTRY INTO THE HUMAN ENVIRONMENT

Abstract. Radon transported from the atmosphere to the earth's surface is shown to have a significant role in the formation of its concentration levels in the lowest atmospheric layers. The amount of radon escaping from the atmosphere with sporadically occurred rainfalls is quantitatively comparable with the amounts emitted from the soil into the atmosphere. A stable dependence has been established between the radon concentration levels in the surface atmosphere and the air humidity.

For citation. Autushka M. I., Matveyev A. V., Isachenko S. A. Recent data on radon entry into the human environment. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 3, pp. 355–360 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-3-355-360>

Введение. Влиянию метеорологических факторов на уровни концентрации радона в приземном слое атмосферного воздуха посвящена обширная опубликованная литература [1–5], которая, тем не менее, в связи с высокой вариабельностью данных, полученных разными исследователями, позволяет получить лишь общее и зачастую весьма дискуссионное представление о тенденциях этого влияния. При этом роль атмосферных осадков как переносчика радона к земной поверхности вообще не рассматривается, и их значение обсуждается только в связи с тем, что они вызывают изменения влажности поверхностного слоя грунтов, которые, по предположению, могут оказывать регулирующее влияние на поступление радона из грунта в атмосферу. Между тем, еще в 1970–1980-е годы прошлого столетия исследованиями Института физики земли Литовской ССР было показано, что дождевые капли захватывают и выносят (вымывают) из атмосферы

и доставляют к земной поверхности аэрозольные частицы, представленные новообразованными атомами радионуклидов – дочерних продуктов распада радона (ДПР), а также и атомы самих благородных газов (радона и ксенона) [6; 7]. Из-за высокой концентрации ДПР радона радиоактивность дождевой воды многократно превышает активность воды в поверхностных водоемах, и это несложно установить даже с помощью простого бытового радиометра.

Таким образом, существуют все основания полагать, что поступление радона к земной поверхности с атмосферными осадками может предопределять его повышенное содержание в приземном слое атмосферного воздуха. Вместе с тем достоверные данные о содержании радона в дождевой воде и о вариациях его содержания в воздухе, обусловленных приносом к земной поверхности с выпадающими атмосферными осадками, в научной литературе отсутствуют. Значение атмосферного источника некоторой части радона, поступающего в приповерхностное земное пространство (как в приземный воздух, так и в приповерхностные грунты), остается неисследованным, причем даже предположение о существовании такого источника не принимается во внимание и не обсуждается. До настоящего времени мы располагали только косвенно подтверждающими это предположение собственными данными [8], в соответствии с которыми содержание ДПР радона (^{214}Pb , ^{214}Bi) в дождевой воде может варьировать в пределах 151–1014 Бк/л, что на полтора-два порядка превышает фоновую концентрацию этих радионуклидов в водах открытых водоемов на территории Беларуси (≤ 10 Бк/л). Однако ионы ДПР, находящиеся в атмосфере преимущественно в аэрозольной форме, и химически инертные атомы радона сорбируются дождевыми каплями с заведомо разной интенсивностью, что предопределяет возможность существенного нарушения радиоактивного равновесия между ними. Поэтому результаты одномоментного определения ДПР в дождевой воде позволяют получить только приближенное представление о содержании радона в ней.

В настоящем сообщении рассматриваются полученные авторами новые данные о поступлении радона из атмосферы в приземный слой атмосферного воздуха, т. е. непосредственно в среду обитания человека.

Материалы и методы исследования. Измерение концентрации (объемной активности) радона (OA_{Rn} , Бк/м³) в воздушной среде производили с помощью портативного радонового зонда «TERA TSR-3» (фирма «Tesla», Чешская Республика) на территории радонометрического полигона Института радиобиологии НАН Беларуси (Гомель). Зонд устанавливали на высоте 1,5 м от земной поверхности. В ходе измерения концентрации радона зонд фиксировал также температуру (t , °C) и относительную влажность воздуха (φ , %).

Концентрацию радона в выпадающей дождевой воде определяли по методике, основанной на определении гамма-излучающего ДПР радона – радионуклида ^{214}Bi . Измеряемое количество ^{214}Bi в дождевой воде состоит из двух пулов – атмосферного (Bi_{at}) и радонового (Bi_{Rn}). Bi_{at} образуется при распаде радона еще в атмосфере и захватывается дождевыми каплями на пути к земной поверхности, Bi_{Rn} образуется при распаде вынесенного из атмосферы радона, происходящем непосредственно в пробе дождевой воды. Очевидно, что в таком случае суммарная концентрация ^{214}Bi в дождевой воде не может быть количественно эквивалентной (равновесной) концентрации содержащегося в ней радона. Поэтому оценку атмосферного и радонового пулов ^{214}Bi производили отдельно, для чего определение радионуклида в пробах дождевой воды выполняли дважды. Первое измерение, выполненное непосредственно после отбора пробы, давало суммарную оценку концентрации ^{214}Bi в пробе. Второе измерение выполняли через четыре часа после отбора пробы. Предполагалось, что за это время (4 ч \approx 12,2 периода полураспада ^{214}Bi), Bi_{at} распадется до незначимой величины ($< 0,1$ % от исходного количества), и результат повторного измерения покажет только концентрацию Bi_{Rn} , который непрерывно нарабатывается в пробе воды в количествах, равновесных и эквивалентных концентрации содержащегося в ней радона.

Результаты и их обсуждение. Результаты измерения концентрации радона в воздухе с помощью радонового зонда показаны на рис. 1. Измерения выполняли непрерывно на протяжении шести суток (с 3 по 9 апреля) с временным шагом 3 ч. В течение этого периода дождь выпадал два раза: 12 мм в течение получаса (23:45 – 00:15) в ночь 6–7 апреля и 4 мм в течение 16 мин (00:15 – 00:31) 9 апреля. Отбирали пробы дождевой воды, измеряли концентрацию ^{214}Bi в них, и по описанной выше методике рассчитывали концентрацию радона (таблица).

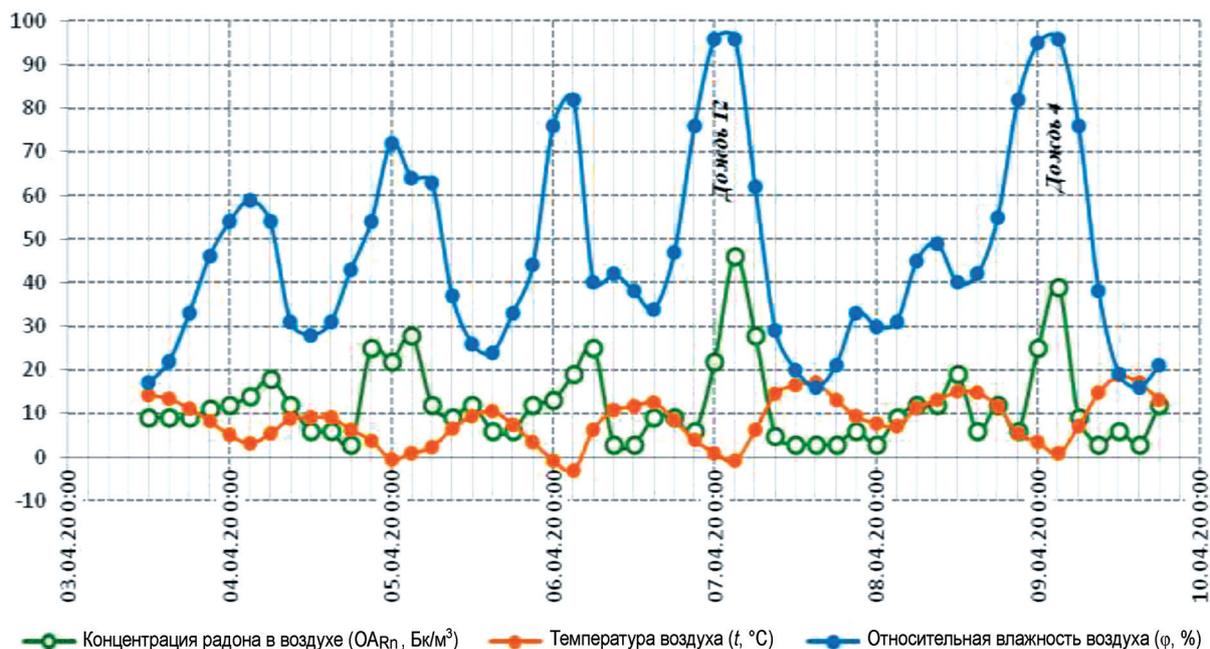


Рис. 1. Динамика метеорологических факторов и концентрации радона в воздухе в течение периода наблюдений

Fig. 1. Dynamics of meteorological factors and radon concentration in the air during the observation period

Концентрация ДПР радона в пробах дождевой воды

Concentration of daughter radon decay products in rainwater

Дата Date	Время отбора проб Sampling time		²¹⁴ Bi, Бк/л (суммарная концентрация) ²¹⁴ Bi, Bq/l (total concentration)	Bi _{Rn} = OA _{Rn} , Бк/л Bi _{Rn} = VA _{Rn} , Bq/l	Bi _{air} , Бк/л Bi _{air} , Bq/l
	начало start	завершение completion			
6–7.04.2020	23:49	00:01	222	224	283
7.04.2020	23:59	00:07	198	206	237
7.04.2020	00:08	00:15	181	184	199
9.04.2020	00:20	00:27	412	333	391
Средние значения			253 ± 79	237 ± 48	278 ± 60

Приведенные в таблице оценки количества радона, приносимого к земной поверхности дождем, следует считать заниженными, поскольку при барботировании дождевой воды в водосборной емкости под воздействием падающих капель существенная часть инертного газа радона уходит из раствора (по предварительным оценкам до 40–80 %, в зависимости от продолжительности и интенсивности дождя), за счет чего увеличивается его концентрация в приземном воздухе. То же происходит при разбрызгивании дождевых капель, падающих на твердые поверхности (на грунт, на траву, на листья деревьев). С учетом этого, при среднегодовом количестве осадков в Гомеле, равном 550 мм, количество радона, поступающее к земной поверхности с дождевой водой, может колебаться в пределах 182–235 кБк/м² в год. Поступление радона из грунта в атмосферу на радонометрической площадке, где производились измерения концентрации радона в воздухе, оценивается выполненными определениями плотности потока радона в 6,9 ± 5,3 мБк/с·м², что соответствует 217,8 ± 167,3 кБк/м² в год. Из этих данных следует, что поступление радона к земной поверхности за счет выноса из атмосферы спорадически выпадающими дождями в регионе Гомеля, находящегося в среднеширотной субконтинентальной климатической зоне, может быть количественно оценено как соизмеримое (по меньшей мере) с его выделением из грунта в атмосферу.

Данные таблицы и рис. 1 свидетельствуют о высокой суточной вариабельности измеренной величины OA_{Rn} и значений метеорологических факторов – температуры и относительной влажности воздуха. Так, средняя величина OA_{Rn} для дневного времени суток (9.00–18.00) составила $6,9 \pm 2,8$ Бк/м³ (от 3 до 19 Бк/м³, коэффициент вариации $K_v = 0,46$), для ночного (21.00 – 06.00) – $17,0 \pm 9,4$ Бк/м³ (от 6 до 46 Бк/м³, $K_v = 0,55$). Данные рис. 1 свидетельствуют о синхронной повторяемости повышенной относительной влажности воздуха и повышенной концентрации радона в нем как во время дождей, так и в периоды без выпадения дождя, приуроченные к ночному времени суток (от 00 часов до 3 часов), и между уровнями ϕ и уровнями OA_{Rn} наблюдается тесная положительная корреляционная связь (рис. 2).

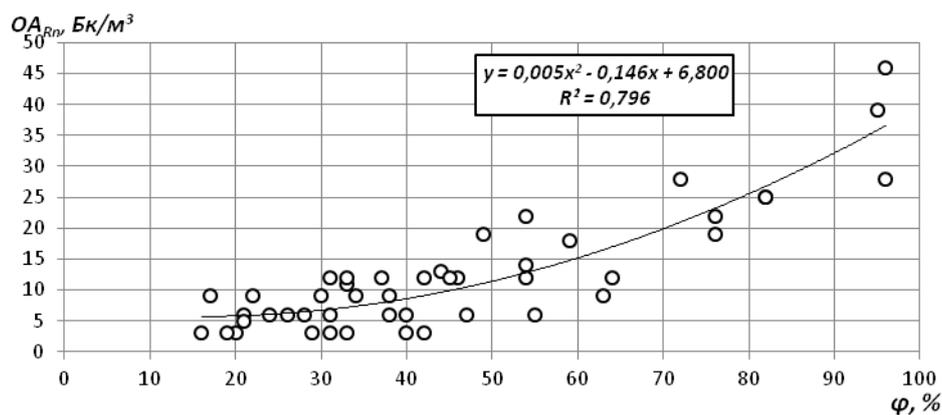


Рис. 2. Зависимость между концентрацией радона в приземном слое воздуха и его относительной влажностью

Fig. 2. The relationship between the concentration of radon in the surface layer of air and its relative humidity

Максимальные значения OA_{Rn} в воздухе соответствовали времени выпадения дождей, достигая 46 Бк/м³ в течение первого дождя (6.04–7.04) и 39 Бк/м³ в течение второго дождя (9.04), и к этим же временным интервалам приурочены максимальные значения влажности воздуха ($\phi = 95$ –96 %, т. е. практически на уровне точки росы). Повышенное содержание радона в приземном воздухе при выпадении дождей объясняется приносом его с дождевой водой. Однако подобная же тесная связь между величинами OA_{Rn} и ϕ выявляется и без выпадения дождя, причем повышенные значения этих величин фиксируются синхронно и приурочены к ночному времени суток (от 00 часов до 3 часов), так же как и во время дождей. Очевидно, что колебания OA_{Rn} не связаны с поступлением радона из грунта: в дневное время фиксируются низкие значения OA_{Rn} , не превышающие 10 Бк/м³, в ночное время величина OA_{Rn} в 2–3 раза превышает дневной уровень даже при отсутствии дождя. Высокие значения ϕ неизбежно приводят к увеличению влажности грунта, что обуславливает, как известно [1; 9], снижение поступления радона из грунта в атмосферу вплоть до полного его прекращения, и если исходить из представлений о грунтовой источнике радона, то объяснить эффект увеличения OA_{Rn} при высокой ночной влажности среды невозможно. К тому же при повышении температуры воздуха в дневное время происходит хотя бы незначительное высыхание поверхности грунта, что должно приводить к возрастанию потока радона из грунта в приземную атмосферу, тогда как данные рис. 1 демонстрируют обратную картину: с увеличением температуры воздуха величина OA_{Rn} снижается до наблюдаемого минимума. Таким образом, полученные данные свидетельствуют, что установленные в ходе исследования колебания OA_{Rn} в приземном воздухе обусловлены поступлением радона из более высоких слоев атмосферы и не связаны с поступлением его из грунта.

Поиски в мировой научной литературе данных, подтверждающих достоверность результатов наших исследований, привели к работе германских ученых [10], в которой показаны итоги многолетнего изучения пространственной и временной изменчивости концентрации ²²²Rn в приповерхностных грунтах в регионе Мюнхена. В работе показано, что среднемноголетняя концентрация радона в грунтах составляла 28 ± 15 на глубине 0,5 м, и 21 ± 9 на глубине 1,0 м, т. е. на

глубине 0,5 м концентрации радона в среднем были в 1,3 раза более высокими, чем на глубине 1,0 м. При этом значения коэффициента вариации (K_V) концентраций радона для верхнего приповерхностного слоя грунтов (0,54) значительно выше по сравнению с более глубокими грунтовыми горизонтами (0,43), что обусловлено, очевидно, вариабельностью поступающего к земной поверхности количества радона, связанной со спорадичностью выпадения дождевых осадков. Эти данные достаточно отчетливо свидетельствуют о влиянии атмосферного источника радона на его концентрацию в верхнем (0,5-метровом) слое грунтов, и менее существенное влияние этого источника в более глубоких слоях.

Наблюдаемое соответствие повышенных значений влажности воздуха минимальным значениям его температуры (рис. 1) связано, по-видимому, с характерной для этого времени года суточной инверсией атмосферной влаги, обусловленной колебаниями температуры вблизи точки росы. Чем меньшей оказывается температура воздуха и, следовательно, чем она ближе к точке росы, тем большее количество паров воды конденсируется, образуя взвешенные в воздухе микрокапли, которые способны сорбировать радон и удерживать его от осаждения в грунт. Полученные данные позволяют утверждать, что повышенная концентрация радона в приземном воздухе обусловлена сорбцией радионуклида взвешенной в воздухе влагой. При этом вначале достигается определенный уровень относительной влажности, обусловленный приближением снижающейся температуры воздуха к точке росы, что способствует образованию и росту количества микрокапель, сорбирующих радон, и в ходе сорбции формируется соответствующая этому уровню влажности концентрация радона. Учитывая эту тенденцию, можно предположить, что к моменту выпадения дождя процесс конденсации достигал своего экстремума, и что наблюдавшиеся кратковременные дожди не связаны с прохождением дождевых облаков, а обусловлены снижением температуры приземного слоя воздуха и достижением точки росы.

Заключение. Показана значимая роль радона, поступающего к земной поверхности из атмосферы, в формировании уровня его концентрации в приземных слоях атмосферного воздуха. Вынос радона из атмосферы спорадически выпадающими дождями количественно соизмерим с его выделением из грунта в атмосферу. Установлена устойчивая зависимость уровня концентрации радона в приземной атмосфере от влажности воздуха, способствующей удержанию радона от осаждения на земную поверхность вследствие его сорбции микрокаплями воды.

Полученные результаты указывают на существование фундаментальной природной закономерности, регулирующей уровни концентрации радона в приземных слоях воздуха, которую необходимо учитывать при использовании радона в качестве маркера при оценке массопереноса вещества в атмосфере.

Список использованных источников

1. Иванова, Т. М. Оценка воздействия метеорологических факторов на объемную активность радона в породах и плотность потока из грунта / Т. М. Иванова // АНРИ. – 2001. – № 2. – С. 9–16.
2. Рогалис, В. С. Исследование влияния временных и погодных условий на потоки радона на строительных площадках г. Москвы / В. С. Рогалис, С. Г. Кузьмич, О. Г. Польский // АНРИ. – 2001. – № 4. – С. 57–61.
3. A nationwide survey of outdoor radon concentration in Japan / S. Oikawa [et al.] // J. Environ. Radioact. – 2003. – Vol. 65, N 2. – P. 203–213. [https://doi.org/10.1016/s0265-931x\(02\)00097-8](https://doi.org/10.1016/s0265-931x(02)00097-8)
4. Sesana, L. Long period study of outdoor radon concentration in Milan and correlation between its temporal variations and dispersion properties of atmosphere / L. Sesana, E. Caprioli, G. M. Marcazzan // J. Environ. Radioact. – 2003. – Vol. 65, N 2. – P. 147–160. [https://doi.org/10.1016/s0265-931x\(02\)00093-0](https://doi.org/10.1016/s0265-931x(02)00093-0)
5. Микляев, П. С. Научные основы оценки потенциальной радоноопасности платформенных территорий / П. С. Микляев. – М., 2015. – 307 с.
6. К вопросу о возможной корреляции концентраций долгоживущих продуктов распада радона в приземном воздухе с атмосферной циркуляцией / Б. И. Лукшене [и др.] // Физика атмосферы. Вып. 3: Радиоактивные трассеры. Радиоактивность атмосферы и гидросферы: сб. науч. тр. – Вильнюс, 1977. – С. 15–26.
7. Оценка вымывания радиоактивных инертных газов облаками и дождем / Д. Ю. Блувштейн [и др.] // Физика атмосферы. Вып. 11: Радиоактивные трассеры. Радиоактивность атмосферы и гидросферы: сб. науч. тр. – Вильнюс, 1986. – С. 115–119.
8. Автушко, М. И. О содержании ДПР радона в дождевой воде / М. И. Автушко, Л. В. Жукова // АНРИ. – 2007. – № 4. – С. 14–16.

9. Комплексные измерения радона и его дочерних продуктов вблизи границы раздела почва–воздух / В. В. Батанин [и др.] // Тр. ИЭМ. – 1971. – № 27. – С. 39–41.
10. Winkler, R. Radon concentration in soil gas: a comparison of the variability resulting from different methods, spatial heterogeneity and seasonal fluctuations / R. Winkler, F. Ruckerbauer, K. Bunzl // *Science of the Total Environment*. – 2001. – Vol. 272, N 1–3. – P. 273–282. [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(01\)00704-5](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(01)00704-5)

References

- Ivanova T. M. Impact assessment of meteorological factors on radon volumetric activity in soil formations and its soil flux density. *ANRI*, 2001, no. 2, pp. 9–16 (in Russian).
- Rogalis V. S., Kuzmich S. G., Polsky O. G. The study of the effects of seasonal and weather conditions on radon fluxes at Moscow-city construction sites. *ANRI*, 2001, no. 4, pp. 57–61 (in Russian).
- Oikawa S., Kanno N., Sanada T., Ohashi N., Uesugi M., Sato K., Abukawa J., Higuchi H. A nationwide survey of outdoor radon concentration in Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2003, vol. 65, no. 2, pp. 203–213. [https://doi.org/10.1016/s0265-931x\(02\)00097-8](https://doi.org/10.1016/s0265-931x(02)00097-8)
- Sesana L., Caprioli E., Marcazzan G. M. Long period study of outdoor radon concentration in Milan and correlation between its temporal variations and dispersion properties of atmosphere. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2003, vol. 65, no. 2, pp. 147–160. [https://doi.org/10.1016/s0265-931x\(02\)00093-0](https://doi.org/10.1016/s0265-931x(02)00093-0)
- Miklyaev P. S. *The science behind the assessment of potential radon-induced hazard in platform areas*. Moscow, 2015. 307 p. (in Russian).
- Lukshene B. I., Spirkauskajte N. K., Styro B. I., Salavejus S. S. On the potential correlation between concentrations of long-lived radon decay products in the ground air and atmospheric circulation. *Fizika Atmosfery = Atmosferos Fizika = Atmospheric Physics, 3. Radioactive Tracers in Research of Atmosphere and Hydrosphere. Collection of Scientific Papers*. Vilnius, 1977, pp. 15–26 (in Russian).
- Bluvstein D. Yu., Butkus D. V., Styro B. I., Zemkajus K. K. Assessment of radioactive inert gases washed out with the clouds and rainfalls. *Fizika Atmosfery = Atmosferos Fizika = Atmospheric Physics, II. Aerosol and Gaseous Impurities in the Environment. Collection of Scientific Papers*. Vilnius, 1986, pp. 115–119 (in Russian).
- Autushka M. I., Zhukava L. V. On the concentrations of radon and its daughters in rainwater. *ANRI*, 2007, no. 4, pp. 14–16 (in Russian).
- Bataniin V. V., Begun E. Ya., Kirichenko L. V., Ivanova L. D. Complex measurements of radon and its daughter products near the soil-air border. *Trudy IEM "Nekotorye voprosy fiziki atmosfery"* [Proceedings of the Institute of Experimental Meteorology "Certain Issues of Atmospheric Physics"], 1971, no. 27, pp. 39–41 (in Russian).
- Winkler R., Ruckerbauer F., Bunzl K. Radon concentration in soil gas: a comparison of the variability resulting from different methods, spatial heterogeneity and seasonal fluctuations. *Science of the Total Environment*, 2001, vol. 272, no. 1–3, pp. 273–282. [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(01\)00704-5](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(01)00704-5)

Информация об авторах

Автушко Михаил Иванович – канд. геол.-минер. наук, вед. науч. сотрудник. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: awtushka@tut.by.

Матвеев Алексей Васильевич – академик, д-р геол.-минер. наук, гл. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: matveyev@nature-nas.by.

Исаченко Сергей Александрович – ст. науч. сотрудник. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: s.a.isachenko@gmail.com.

Information about the authors

Autushka Mikhail I. – Ph. D. (Geology and Mineralogy), Lead researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninsky Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: awtushka@tut.by.

Matveyev Aleksey V. – Academician, D. Sc. (Geology and Mineralogy), Chief researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoryna Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: matveyev@nature-nas.by.

Isachenko Sergei A. – Senior researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninsky Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: s.a.isachenko@gmail.com.