ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 550.35 Научная статья

Особенности сезонной динамики изотопов радона в приземной атмосфере

Г. А. Яковлев[1], В. С. Яковлева[2]

[1] Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Россия
[2] Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия
E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

Исследованы особенности временной динамики изотопов радона и дочерних продуктов их распада для климатических условий Сибири (Российская Федерация). Анализ результатов выявил специфическую сезонную динамику радона: максимальное значение наблюдается зимой, а минимальное — весной. Совершенно другое поведение было обнаружено для торона. Минимальные значения наблюдаются зимой, а максимальные — в теплый период года. Было установлено, что наличие и характеристики снежного покрова сильно влияют на сезонные колебания объемной активности торона. Осадки оказывают существенное влияние на сезонную динамику объемной активности продуктов распада радона. Атмосферная турбулентность сильно влияет на суточную динамику всех характеристик поля радона. Было отмечено, что суточные изменения объемной активности радона и торона четко выражены в периоды без дождя или снега. Максимум объемной активности радона наблюдается в предрассветные часы, а минимум — в дневное время. Кроме того, суточные изменения радона зимой характеризуются утренним максимумом в 8-9 часов, что на 1-2 часа позже, чем в летний период.

Ключевые слова: радон, торон, изотоп, дочерний продукт распада, атмосфера, динамика, метеорологическая величина

DOI: 10.26117/2079-6641-2020-31-2-129-138

Поступила в редакцию: 25.03.2020 В окончательном варианте: 13.05.2020

Для цитирования. Яковлев Г. А., Яковлева В. С. Особенности сезонной динамики изотопов радона в приземной атмосфере // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2020. Т. 31. № 2. С. 129-138. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-31-2-129-138

Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru)

© Яковлев Г. А., Яковлева В. С., 2020

Введение

Изучение поведения изотопов радона в приземной атмосфере является актуальной задачей, поскольку радон и торон являются отличными индикаторами динамических процессов, таких как вертикальный и горизонтальный перенос воздушных масс, газообмен в системе литосфера-атмосфера (дыхание Земли) [1–10].

Финансирование. Исследование выполнялось без финансирования

Поведение изотопов радона связано с изменениями погодных условий, состояния атмосферы и поверхностного слоя почвы. Радон и торон, в отличие от других индикаторных газов, достаточно легко измерить. Кроме того, из-за различий в ядерно-физических свойствах этих изотопов, а именно, постоянных радиоактивного распада, радона и торон, при совместном измерении они могут нести информацию о динамических процессах разных временных масштабов.

По мнению многих экспертов, радон является основным источником вариаций радиационного фона приземной атмосферы [1–3]. Изучение уровней радона в атмосфере может быть полезно для решения прикладных задач в таких областях, как радиоэкология и радиобиология, для оценки влияния малых доз радиации на население. В геофизике и климатологии изотопы радона могут быть полезны для изучения электрических свойств атмосферы.

Динамика изотопов радона в приземной атмосфере сильно зависит от местных климатических и погодных особенностей. Следовательно, зависимости, обнаруженные в одном географическом регионе, могут существенно отличаться или даже быть противоположными для других регионов.

По регионам Западной Сибири до сих пор нет данных о систематических исследованиях динамики изотопов радона в приземной атмосфере. Во многом это связано с относительно высокой стоимостью радиометров радона, а также строгими требованиями к их техническим характеристикам, которые должны работать в широком диапазоне температур от минус 50 до плюс 50 ^{o}C. Знание характеристик динамики радона в суточном и годовом масштабе позволит выявить взаимосвязи и взаимозависимости между объемной активностью (ОА) изотопов радона, их короткоживущих дочерних продуктов распада (ДПР) и характеристиками атмосферных динамических процессов.

Вышеизложенное определило цель данной работы - изучение динамики радона и торона в приземной атмосфере и выявление особенностей его вариаций на разных временных масштабах от суточного до годового.

Материалы и методы

Непрерывный мониторинг объемной активности радона, торона и продуктов его распада в приземной атмосфере был произведен с конца 2016 года в Томской обсерватории радиоактивности и ионизирующего излучения (ТОРИИ) с помощью радонового радиометра типа EQF 3200 (Германия). Приборный парк ТОРИИ расположен на нижней смотровой площадке геофизической обсерватории Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН в Томске (Академгородок).

Радиометр был помещен в термостатический бокс с автоматически регулируемым нагревом и установлен на расстоянии 1 м от земли. Радиометр основан на методе прокачки воздуха через мембранный фильтр с параллельной альфа-спектрометрией с помощью одного внешнего и нескольких,расположенных во внутренней измерительной камере, полупроводниковых детекторов.

Радиометр EQF 3200 измеряет ОА как самих изотопов радона, так и дочерних продуктов их распада. Процесс мониторинга полностью автоматизирован, прокачка воздуха осуществляется непрерывно. Длительность одного измерения была установлена 30 минут. Радиометр EQF 3200 позволяет измерять следующие характеристики поля радона: объемную активность радона и торона; объемную активность продук-

тов распада радона и торона, выраженную в значении эквивалентной равновесной концентрации (EEC); концентрацию потенциальной альфа-энергии (PAEC) ДПР радона; количество импульсов от изотопов полония. Изотопы ^{218}Po и ^{216}Po представляют собой продукты распада радона, а ^{214}Po, ^{212}Po представляют собой ДПР торона. Внешний вид экспериментальной площадки, с вагончиком, внутри которого установлена компьютерная техника, а на внешней стене установлен радиометр, показан на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид нижней экспериментальной площадки геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН

Для выявления основных влияющих факторов, а также суточных и сезонных закономерностей поведения изучаемых значений радиации были получены основные метеорологические параметры, такие как температура воздуха, давление, относительная влажность, скорость и направление ветра, осадки и др. с сайта «Расписание Погоды» http://rp5.ru, который находится в свободном доступе.

Результаты и обсуждение

Сначала проанализируем годовую динамику объемной активности изотопов радона и продуктов распада радона, которая показана на рис. 2.

Там же показаны изменения основных метеорологических параметров сверху вниз: температура воздуха, давление; атмосферные осадки; толщина снежного покрова.

Результаты анализа показали, что сезонный тренд для ОА радона выражен слабо. В то же время, в течение всего года наблюдаются кратковременные изменения объемной активности радона большой амплитуды. Минимальные значения наблюдаются в период таяния снежного покрова, а также в конце осени, при формировании снежного покрова. Максимальные значения ОА радона чаще наблюдаются в зимнее и летнее время года.

Для торона было обнаружено совершенно другое поведение. Зимой наблюдаются минимальные значения, а в теплый период года - максимальные. Из-за короткого

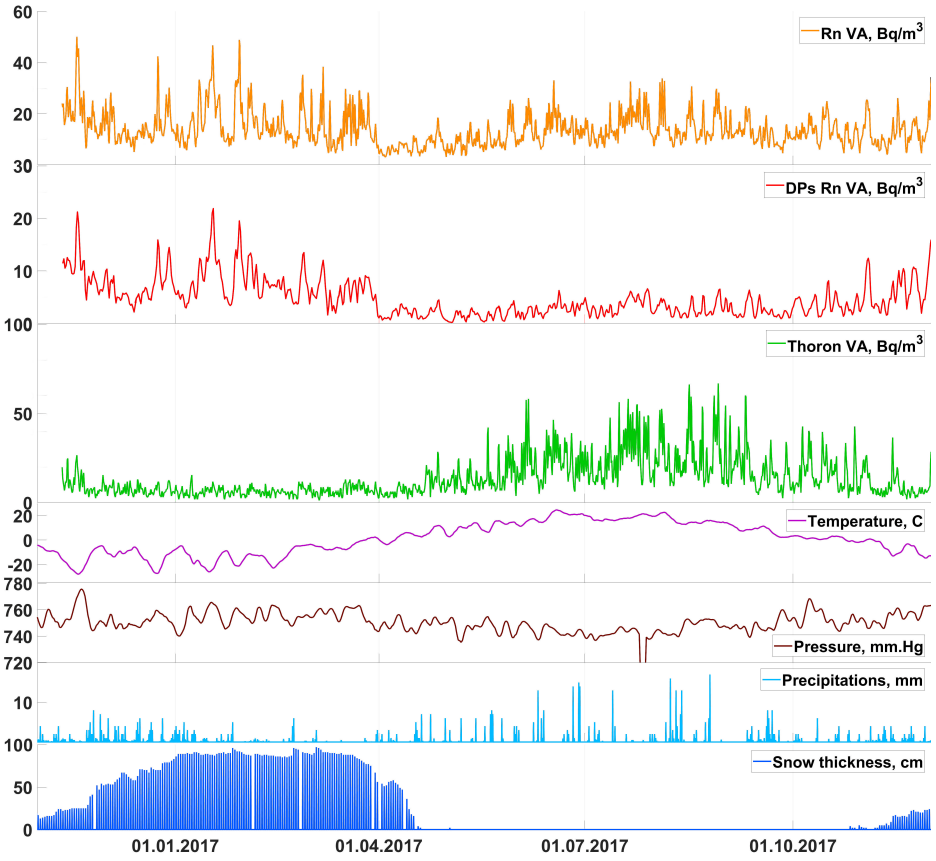


Рис. 2. Динамика ОА изотопов радона, ДПР радона и метеорологических величин

периода полураспада торона, всего 56 секунд, он не успевает диффундировать через слой снега. Это проявляется минимумом в период снежного покрова и максимумом в летнее время года. Диапазон вариаций ОА торона также достаточно велик в теплый период года.

Объемная активность продуктов распада радона (величина ЭРОА) ведет себя по-разному и показывает максимальные значения в холодное время года и минимальные значения в теплый период.

Диапазон и среднемесячные значения ОА изотопов радона и продуктов распада радона на высоте 1 м от поверхности земли, измеренные в 2016–2017 годах, показаны на рис. 3. Получено, что наибольшее изменение значений наблюдается для радона в августе, для торона – в июле, а для дочерних продуктов распада радона – в феврале. В то же время максимальные средние за месяц значения ОА радона были получены в январе и декабре, для ОА торона – в августе, а для ОА ДПР радона – в декабре.

Минимальные средние за месяц значения характеристик поля радона в приземной атмосфере в основном совпадают с минимальным диапазоном изменения 30-минутных значений в течение месяца. Минимальные значения ОА радона (рис. 3) наблюдаются в апреле.

Для дочерних продуктов распада радона разница в величине ОА между холодным и теплым периодом года более очевидна, а минимум сдвинут на май.

В отличие от радона и продуктов его распада, торон имеет совершенно другую динамику с минимумом в январе. Годовой ход ОА радона его ДПР очень схож, но с некоторыми различиями в теплый период года. Объяснением этого может служить

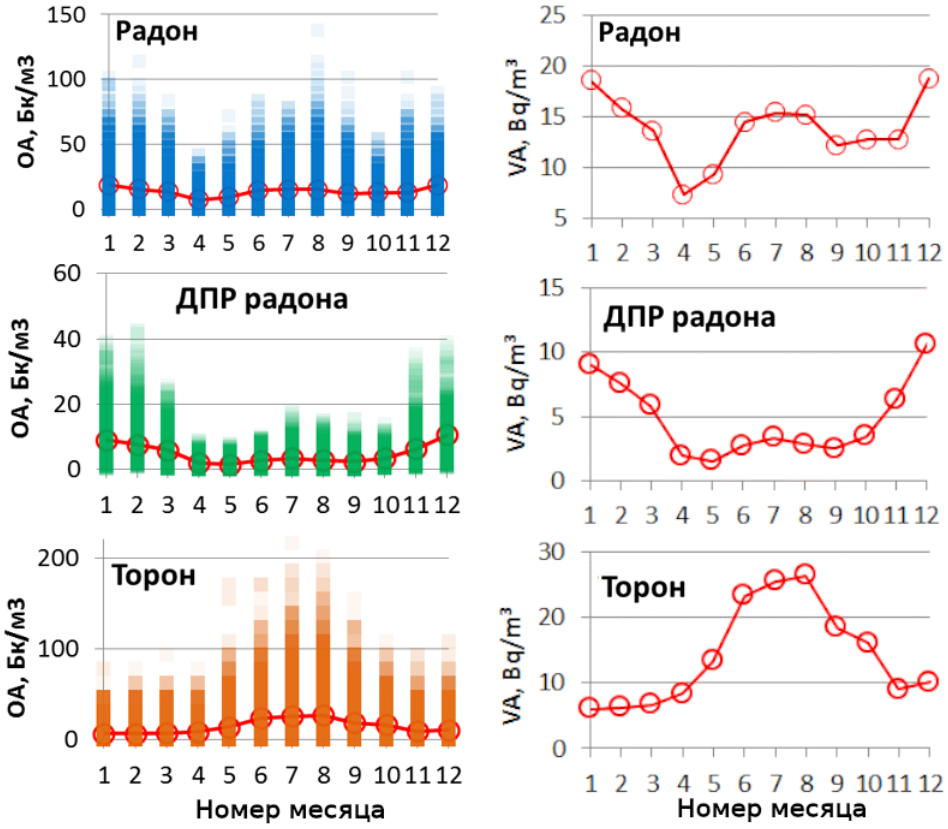


Рис. 3. Изменение среднемесячных значений ОА изотопов радона и ДПР радона

влияние осадков на аэрозольные продукты распада радона, которые вымываются из атмосферы, и их активность заметно снижается.

Результаты анализа научной литературы по изучению годовых особенностей динамики радона [6–10] обобщены в таблице, где указаны сезоны года, в которых наблюдаются минимальные и максимальные значения.

Таблица

Сезоны года с максимальными и минимальными значениями ОА радона в разных странах

Страна	Максимальное значение ОА радона	Минимальное значение ОА радона
Россия (Томск) (данное исследование)	Зима	Весна
Финляндия (юг) [6]	Зима	Весна
Корея [7]	Зима	Лето
Словакия [8]: - FMPI - SMI	 Зима Лето	 Весна Весна
Япония [9]	Осень	Лето
Польша [10]	Лето	Зима

Полученные в Томске данные о сезонной динамике радона хорошо согласуются с результатами исследований в Финляндии [6]. Возможно, это связано с похожим климатом. Аналогичная годовая тенденция наблюдалась в Словакии и Корее [7, 8]. В Польше, напротив, было получено, что максимальные значения радона наблюдаются в теплый период, а минимальные – в холодный период года [10]. Эти различия связаны с климатическими особенностями, в частности, с характеристиками атмосферных инверсий.

Интересно отметить, что в пределах одной страны, в разных регионах страны, могут наблюдаться противоположные зависимости в зимний и летний периоды года (Словакия). В Японии был обнаружен совершенно иной годовой ход ОА радона, который отличается от других стран [9].

Теперь перейдем к рассмотрению динамики радона на суточном масштабе (рис. 4).

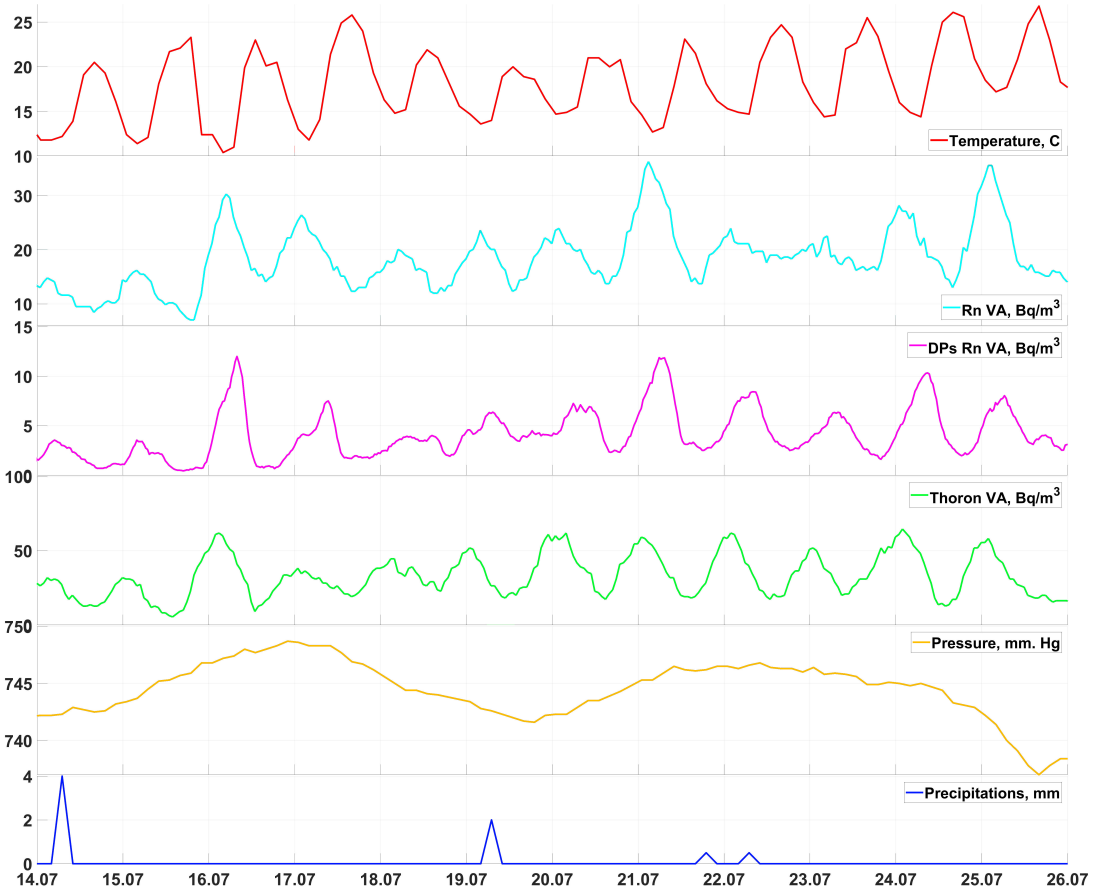


Рис. 4. Суточные изменения объемной активности изотопов радона, ДПР и метеорологических величин

Суточные вариации объемной активности радона, торона и продуктов их распада намного больше, чем сезонные вариации. Суточные изменения характеристик поля радона четко выражены в периоды без дождя или снега. Максимальное значение ОА изотопов радона наблюдается в предрассветные часы, когда атмосфера наименее подвижна, а минимальное – в дневное время, когда вертикальное перемешивание воздуха за счет турбулентной диффузии максимально.

Для дочерних продуктов распада радона существует временной сдвиг в несколько часов при появлении максимумов и минимумов по сравнению с радоном. Эта задержка объясняется их ядерно-физическими характеристиками, а именно, постоянными радиоактивного распада.

Только в условиях «хорошей погоды» наблюдаются четко выраженные суточные вариации объемной активности радона, торона и продуктов распада в разные времена года. Это хорошо видно в июле 2017 года, как показано на рис. 4. Максимальные значения наблюдаются в предрассветные часы, а минимальные значения – днем (когда турбулентность атмосферы максимальна). В такие периоды была выявлена значительная отрицательная корреляция с температурой атмосферного воздуха, а положительная корреляция — с влажностью атмосферного воздуха. На рис. 4 также видно, что из-за осадков с низкой интенсивностью стандартные дневные вариации слегка нарушены.

Корреляционный анализ с метеорологическими значениями показал, что при рассмотрении большого периода времени, равного примерно 1 месяцу и более, не было выявлено никакой значимой корреляции между радиоактивностью (характеристиками поля радона) и метеорологическими (температура, давление и влажность атмосферы, осадки, ветер) величинами. Однако, в определенные периоды года, в условиях «хорошей погоды», все характеристики поля радона демонстрируют значительную отрицательную корреляцию с температурой атмосферного воздуха, пример такого случая показан на рис. 4.

Установлено, что в Томске суточные вариации радона в зимний период года характеризуются утренним максимумом в 8–9 часов, что на 1-2 часа позже, чем в летний период. Результаты, полученные в ходе нашего эксперимента, в частности, по суточной динамике объемной активности радона, достаточно хорошо согласуются с результатами, полученными в других странах, таких как Финляндия, Япония и Корея [6, 7, 9], но с небольшими отличиями.

Заключение

Анализ экспериментальных данных позволил выявить ряд закономерностей, проявляющихся на суточном и годовом масштабах в динамике объемной активности изотопов радона и их продуктов распада, а также определить основные влияющие факторы.

1. Анализ выявил закономерность сезонной динамики радона: максимальные значения наблюдаются зимой, а минимальные — весной. Совершенно другое поведение было обнаружено для торона. Минимальные значения наблюдаются зимой, а максимальные — в теплый период года.

2. Наличие и характеристики снежного покрова сильно влияют на сезонные колебания объемной активности торона. Осадки оказывают существенное влияние на сезонную динамику объемной активности ДПР радона. Атмосферная турбулентность сильно влияет на суточную динамику всех характеристик поля радона.

3. Суточные вариации объемной активности изотопов радона и продуктов распада намного больше, чем сезонные вариации. Суточные изменения объемной активности радона и торона четко выражены в периоды без дождя или снега. Максимум ОА радона наблюдается в предрассветные часы, а минимум – в дневное время. Суточные

изменения радона зимой характеризуются утренним максимумом в 8–9 часов, что на 1–2 часа позже, чем в летний период.

Конкурирующие интересы. Авторы заявляют, что конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Все авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

Список литературы/References

[1] Podstawczyńska A. et al., “Seasonal and diurnal variation of outdoor radon (222Rn) concentrations in urban and rural area with reference to meteorological conditions”, *Nukleonika*, **55**:4 (2010), 543-547.

[2] Pal S. et al., “Investigation of the atmospheric boundary layer depth variability and its impact on the 222Rn concentration at a rural site in France”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120** (2015), 623–643.

[3] Barbosa S. M. et al., “Multiyear to daily radon variability from continuous monitoring at the Amram tunnel, southern Israel”, *Geophysical Journal International*, **182**:2 (2010), 829-842.

[4] Baciu A. C., “Radon and thoron progeny concentration variability in relation to meteorological conditions at Bucharest (Romania)”, *Journal of environmental radioactivity*, **83**:2 (2005), 171-189.

[5] Tchorz-Trzeciakiewicz D. E., Klos M., “Factors affecting atmospheric radon concentration, human health, Science of the Total Environment”, *Science of the Total Environment*, **584-585** (2017), 911-920.

[6] Chen X. et al., “Responses of the atmospheric concentration of radon-222 to the vertical mixing and spatial transportation”, *Boreal Environ. Res.*, **21** (2016), 299-318.

[7] Kim W. H. et al., “Background Level of Atmospheric Radon-222 Concentrations at Gosan Station, Jeju Island, Korea in 2011”, *Bull. Korean Chem. Soc.*, **35**:4 (2014), 1149.

[8] Holy K. et al., “Outdoor 222Rn behaviour in different areas of Slovakia”, *Nukleonika*, **61**:3 (2016), 281-288.

[9] Hayashi K. et al., “Normal seasonal variations for atmospheric radon concentration: a sinusoidal model”, *Journal of environmental radioactivity*, **139** (2015), 149-153.

[10] Tchorz-Trzeciakiewicz D. E., Solecki A. T., “Seasonal variation of radon concentrations in atmospheric air in the Nowa Ruda area (Sudety Mountains) of southwest Poland”, *Geochemical Journal*, **45**:6 (2011), 455-461.

Список литературы (ГОСТ)

[1] Podstawczyńska A. et al. Seasonal and diurnal variation of outdoor radon (222Rn) concentrations in urban and rural area with reference to meteorological conditions // Nukleonika. 2010. vol. 55. no. 4. pp. 543-547.

[2] Pal S., M. Lopez, M. Schmidt, M. Ramonet, F. Gibert, I. Xueref-Remy, and P. Ciais (2015), Investigation of the atmospheric boundary layer depth variability and its impact on the 222Rn concentration at a rural site in France // J. Geophys. Res. Atmos. 2015. vol. 120. pp. 623–643. doi:10.1002/2014JD022322

[3] Barbosa S. M. et al. Multiyear to daily radon variability from continuous monitoring at the Amram tunnel, southern Israel // Geophysical Journal International. 2010. vol. 182. no. 2. pp. 829-842.

[4] Baciu A. C. Radon and thoron progeny concentration variability in relation to meteorological conditions at Bucharest (Romania) // Journal of environmental radioactivity. 2005. vol. 83. no. 2. pp. 171-189.
[5] Tchorz-Trzeciakiewicz D. E., Klos M. Factors affecting atmospheric radon concentration, human health, Science of the Total Environment // Science of the Total Environment. 2017. vol. 584–585. pp. 911–920.
[6] Chen X. et al. Responses of the atmospheric concentration of radon-222 to the vertical mixing and spatial transportation // Boreal Environ. Res. 2016. vol. 21. pp. 299-318.
[7] Kim W. H. et al. Background Level of Atmospheric Radon-222 Concentrations at Gosan Station, Jeju Island, Korea in 2011 //Bull. Korean Chem. Soc. 2014. vol. 35. no. 4. pp. 1149.
[8] Holý K. et al. Outdoor 222Rn behaviour in different areas of Slovakia // Nukleonika. 2016. vol. 61. no. 3. pp. 281-288.
[9] Hayashi K. et al. Normal seasonal variations for atmospheric radon concentration: a sinusoidal model // Journal of environmental radioactivity. 2015. vol. 139. pp. 149-153.
[10] Tchorz-Trzeciakiewicz D. E., Solecki A. T. Seasonal variation of radon concentrations in atmospheric air in the Nowa Ruda area (Sudety Mountains) of southwest Poland // Geochemical Journal. 2011. vol. 45. no. 6. pp. 455-461.

Vestnik KRAUNC. Fiz.-Mat. Nauki. 2020. vol. 31. no. 2. pp. 129–138. ISSN 2079-6641

INSTRUMENTS AND METHODS OF MEASUREMENT

MSC 86A10 Research Article

Features of seasonal dynamics of radon isotopes in surface atmosphere

G. A. Yakovlev[1], V. S. Yakovleva[2]

[1] Tomsk State University, Tomsk, Lenina avenue, 36, Russia
[2] Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Lenina avenue, 30, Russia
E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

Features of seasonal dynamics of radon isotopes and their decay products were investigated for Siberian (Russian Federation) climatic conditions. The analysis of results revealed a specific in the seasonal dynamics of radon: the maximum value is observed in winter, and the minimum—in spring. A completely different behavior was revealed for thoron. Minimal values are observed in winter and maximal values—in the warm period of the year. It was found that the presence and characteristics of snow cover greatly influence the seasonal variations in thoron volume activity. Precipitation has a significant impact on the seasonal dynamics of the radon decay products volumetric activity. Atmospheric turbulence strongly influences the daily dynamics of all the characteristics of the radon field. It was observed that diurnal variations of radon and thoron volumetric activity are clearly expressed during periods without rain or snow. The maximum of radon volumetric activity is observed in the pre-dawn hours, and the minimum—in the daytime. Moreover, diurnal variations of radon in the winter are characterized by a morning maximum of 8-9 o'clock, which is 1-2 hours later compared to the summer period.

Key words: radon, thoron, isotope, daughter decay product, atmosphere, dynamics, meteorological parameter.

DOI: 10.26117/2079-6641-2020-31-2-129-138

Original article submitted: 25.03.2020 Revision submitted: 13.05.2020

For citation. Yakovlev G. A., Yakovleva V. S. Features of seasonal dynamics of radon isotopes in surface atmosphere. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2020, **31**: 2, 129-138. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-31-2-129-138

Competing interests. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru)

© Yakovlev G. A., Yakovleva V. S., 2020

Funding. This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors