

Временная изменчивость концентрации висмута-214 в приземном слое атмосферы Севастопольского региона

Д. А. Кременчуцкий*, Г. Ф. Батраков, Ю. С. Куринная

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**e-mail: d.kremenchutskii@mhi-ras.ru*

Поступила: 31.08.2020 г.; принята к публикации 11.11.2020 г.; опубликована 25.12.2020 г.

В статье приводятся результаты мониторинга концентрации висмута-214 в атмосферных аэрозолях в приземном слое атмосферы Севастопольского региона в 2007–2020 гг. Висмут-214 – это дочерний продукт распада радона-222, он является одним из основных радионуклидов, формирующих естественный гамма-фон приземной атмосферы. Целью настоящей работы является получение количественных характеристик временной изменчивости концентрации висмута-214 в приземном слое атмосферы Севастопольского региона и оценка среднегодовой эффективной дозы от облучения радоном-222 вне помещений. За период исследований было отобрано и обработано 2701 проба аэрозолей. Измерения активности висмута-214 в пробах атмосферных аэрозолей были выполнены с использованием низкофонового гамма-спектрометра со сцинтилляционным детектором NaI(Tl). Концентрация радионуклида в индивидуальных пробах изменялась от 0.1 до 11.4 Бк·м⁻³, среднее значение составило 2.7 ± 1.5 Бк·м⁻³. Во временной изменчивости концентрации висмута-214 выделяются периодичности в 29, 66, 110 сут и 1 год. Повышенные значения концентрации висмута-214 характерны для периода июль – октябрь ($3.1\text{--}3.5$ Бк·м⁻³), пониженные – для периода декабрь – апрель ($2.1\text{--}2.2$ Бк·м⁻³). Показано, что сезонная вариация происхождения атмосферного аэрозоля в исследуемом регионе может быть тем фактором, который обуславливает изменение в сезонном цикле концентрации висмута-214 по сравнению с ожидаемым циклом радона-222. В последний год наблюдений отмечается рост концентрации висмута-214 в среднем на 22 % по сравнению со средней многолетней величиной его концентрации, а также изменение в его годовом цикле, что, вероятно, связано со строительными работами, проводимыми в центральной части города. Получены количественные оценки эффективной дозы облучения радоном вне помещений.

Ключевые слова: висмут-214, радон-222, Севастопольский регион, атмосферные аэрозоли, приземный слой атмосферы, временная изменчивость.

Благодарности: данные для исследования были получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 0827-2020-0004. Анализ данных проводился при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и города Севастополя, проект № 20-45-920007.

© Кременчуцкий Д. А., Батраков Г. Ф., Куринная Ю. С., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Кременчуцкий Д. А., Батраков Г. Ф., Куринная Ю. С. Временная изменчивость концентрации висмута-214 в приземном слое атмосферы Севастопольского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 4. С. 103–116. doi:10.22449/2413-5577-2020-4-103-116

Temporal Variability of Bismuth-214 Activity Concentration in the Atmospheric Surface Layer of Sevastopol Region

D. A. Kremenchutskii*, G. F. Batrakov, Y. S. Kurinnaya

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: d.kremenchutskii@mhi-ras.ru*

Submitted 31.08.2020; revised 11.11.2020; published 25.12.2020

The article presents the results of monitoring of bismuth-214 activity concentration in atmospheric aerosols in the atmospheric surface layer of the Sevastopol region in 2007–2020. Bismuth-214 is a daughter product of the decay of radon-222. It is one of the main radionuclides that form the natural gamma background of the surface atmosphere. The aim of this work is to obtain quantitative characteristics of the temporal variability of the concentration of bismuth-214 in the atmospheric surface layer of the Sevastopol region and to estimate the annual effective dose due to outdoor radon-222 exposure. During the study period, 2701 aerosol samples were taken and processed. Measurements of the activity of bismuth-214 in atmospheric aerosol samples were performed using a low-background gamma-spectrometer with a NaI (Tl) scintillation detector. The concentration of the radionuclide in individual samples varied from 0.1 to 11.4 Bq m⁻³, the average value was 2.7 ± 1.5 Bq m⁻³. There is periodicity of 29, 66, 110 days and 1 year in the temporal variability of the activity concentration of bismuth-214. Higher values of bismuth-214 activity concentration are typical for the period from July to October (3.1–3.5 Bq m⁻³), lower values are typical for the period from December to April (2.1–2.2 Bq m⁻³). It is shown that the seasonal variation in the origin of atmospheric aerosol in the region under study can be the factor determining the change in the seasonal cycle of bismuth-214 concentration in comparison with the expected cycle of radon-222. In the last year of observations, there is an increase in the concentration of bismuth-214 by an average of 22% compared with the average long-term value of its concentration and a change in its annual cycle, which is probably associated with construction work carried out in the central part of the city. Quantitative estimates of the effective dose due to outdoor radon-222 exposure have been obtained.

Keywords: bismuth-214, radon-222, Sevastopol region, atmospheric aerosols, surface layer of the atmosphere, temporal variability.

Acknowledgments: collection of data for this study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. 0827-2020-0004. Data analysis was funded by the Russian Foundation for Basic Research and the city of Sevastopol, project no. 20-45-920007.

For citation: Kremenchutskii, D.A., Batrakov, G.F. and Kurinnaya, Y.S., 2020. Temporal Variability of Bismuth-214 Activity Concentration in the Atmospheric Surface Layer of Sevastopol Region. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 103–116. doi:10.22449/2413-5577-2020-4-103-116 (in Russian).

Введение

Человек подвергается непрерывному облучению от ряда естественных источников излучения космического и земного происхождения. Космическое излучение подразделяют на первичное и вторичное. Первичное излучение имеет солнечное и галактическое происхождение и представлено протонами, альфа-частицами и ядрами более тяжелых химических элементов. Вторичное космическое излучение формируется первичным и представлено мюонами, электронами и фотонами. Поток космического излучения у поверхности Земли слабо меняется во времени. Его суточные вариации не выходят за пределы 1.5 %, сезонные в умеренных широтах – не превышают 3 %. Вклад этого излучения в суммарную дозу облучения человека в среднем составляет 16 %¹⁾.

Земное излучение формируется радионуклидами (ряд урана-238, ряд тория-232, калий-40 и др.) и разделяется на внешнее и внутреннее²⁾. Внешнее облучение обусловлено радионуклидами, находящимися вне организма человека, внутреннее облучение – радионуклидами, находящимися внутри человеческого организма, которые попадают туда при дыхании, приеме пищи и воды.

Около 64 % от суммарной величины дозы облучения человек получает от радона и его дочерних продуктов [1].

Радон – это газ без цвета и запаха. Он относится к группе благородных газов и в окружающей среде находится в виде отдельных атомов. В природе существует три изотопа радона: радон-222, радон-220 (торон) и радон-219 (актинон). Доля радона-222 в смеси этих радионуклидов в атмосферном воздухе составляет от 92 до 99 %.

Радон-222 образуется в результате распада радия-226. Период полураспада радона-222 составляет 3.8 сут. Радон-222 (далее радон) распадается с образованием относительно долгоживущего изотопа свинец-210 ($T_{1/2} = 22.2$ г.) через цепочку радионуклидов: полоний-218 ($T_{1/2} = 3.1$ мин), свинец-214 ($T_{1/2} = 26.8$ мин), висмут-214 ($T_{1/2} = 19.9$ мин) и полоний-214 ($T_{1/2} = 164$ мкс).

В атмосферу радон поступает в результате выделения (эксгаляции) из твердых и жидких сред, содержащих материнский изотоп радий. Поток радона из почв характеризуется обычно значениями в пределах $(5-30) \cdot 10^{-3}$ Бк·м⁻²·с⁻¹ [2]. Впервые исследования временной изменчивости потока радона-222 из почвы и факторов, определяющих эту изменчивость, были проведены в 1969 г. в США [3]. Было установлено, что эксгаляция имеет суточную и сезонную изменчивость. При суточной изменчивости максимум обычно наблюдается после полудня, а при сезонной – в конце лета. Эксгаляция зависит от метеорологической обстановки. Повышение температуры, уменьшение давления, усиление ветра приводят к росту эксгаляции, осадки уменьшают ее. Аналогичные исследования были проведены в ряде регионов Земли [4–7].

Концентрация радона в атмосфере изменяется в пространстве от нескольких сотых долей Бк·м⁻³ до сотен Бк·м⁻³ [8–10]. Сезонная изменчивость

¹⁾ Сивинцев Ю. В. Насколько опасно облучение? : (Радиация и человек). 2-е изд. М. : ИздАТ, 1991. 112 с. ; Филиппов Е. М. Радиационная экология: учебное пособие. Севастополь : СНИЯЭиП, 2004. 244 с.

²⁾ Сивинцев Ю. В. Насколько опасно облучение ... 112 с.

концентрации радона находится под влиянием атмосферных осадков, температуры, атмосферного давления и ветра [4, 6, 7, 11].

Висмут-214 связан с радоном уравнением эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона для неравновесной смеси короткоживущих дочерних продуктов распада в воздухе³⁾. В силу методических особенностей (мониторинг концентрации висмута – очень трудоемкий процесс) литературные данные о временной изменчивости концентрации висмута крайне немногочисленны и обычно ограничены эпизодическими измерениями, охватывающими период от нескольких дней до одного года [11–17]. Установлено, что интенсификация вертикального обмена приводит к снижению концентрации висмута. Данные о сезонной изменчивости концентрации висмута в доступной литературе отсутствуют.

Целью настоящей работы является получение количественных характеристик временной изменчивости концентрации висмута в приземном слое атмосферы Севастопольского региона и оценка среднегодовой эффективной дозы от облучения радоном вне помещений.

Материалы и методы

Измерения концентрации висмута в приземной атмосфере выполняются с помощью высокопроизводительной ($525 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$) воздухофильтрационной установки. Концентрирование атмосферных аэрозолей проводится с использованием фильтрующего полотна Петрянова ФПП-15-1,5 размером 100×45 см. Смена фильтра происходит в будние дни в 11:00 по местному времени. Фильтр располагается на фильтродержателе цилиндрической формы. Фильтродержатель расположен в герметичной камере, в которую воздух затягивается с крыши здания Морского гидрофизического института (вышшение 3 м относительно уровня крыши, 12 м относительно уровня земли). По окончании отбора пробы атмосферных аэрозолей с помощью гидравлического пресса фильтру придаётся геометрия, идентичная эталонной (таблетка диаметром 52 мм и высотой 5 мм). Измерения активности висмута проводятся на низкофоновом гамма-спектрометре со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) (размер кристалла: диаметр 63 мм, высота 63 мм; разрешение 7 % по фотопику цезия-137). Определение активности висмута в гамма-спектре проводится по линии 1120 кэВ. Калибровка детектора выполнена с использованием сертифицированных источников. Расчет концентрации висмута в пробах атмосферных аэрозолей проводился по формуле [18]

$$C_{\text{Bi}} = \frac{N_{1120}}{1.61 \cdot 10^6 \varepsilon_{1120} \eta_{1120} V} - 2.53 C_{\text{Pb}}, \quad (1)$$

где C_{Bi} – концентрация висмута, $\text{Бк} \cdot \text{м}^{-3}$; N_{1120} – площадь фотопика висмута; ε_{1120} – эффективность регистрации гамма-квантов с энергией 1120 кэВ; η_{1120} – выход гамма-квантов с энергией 1120 кэВ; V – скорость прокачки воздуха, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; C_{Pb} – концентрация свинца-214 в атмосферных аэрозолях, определяемая по формуле

³⁾ Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) СанПиН 2.6.1.2523-09: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.

$$C_{\text{Pb}} = \frac{N_{352}}{2.9 \cdot 10^6 \varepsilon_{352} \eta_{352} V} \quad (2)$$

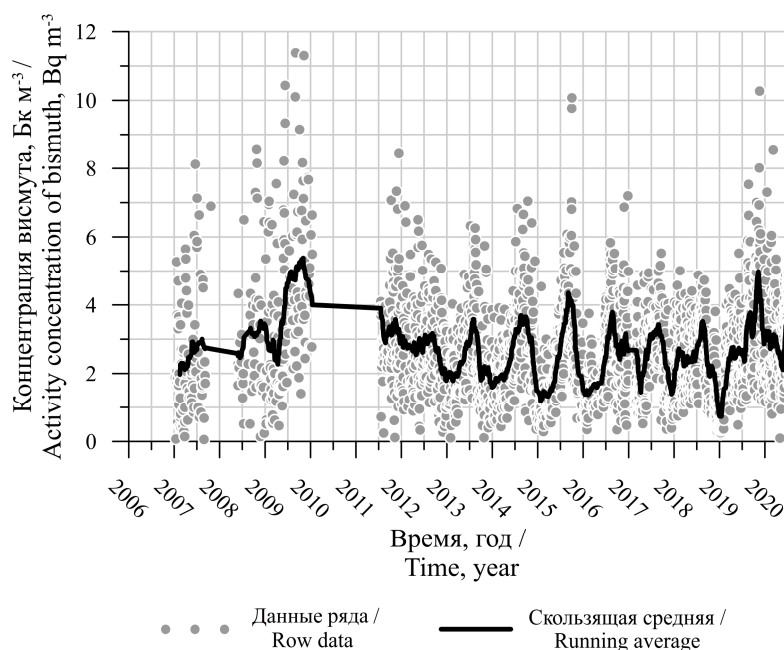
Обозначения в формуле (2) аналогичны обозначениям в (1).

Получаемые данные о концентрации висмута относятся к оценкам содержания этого радионуклида в последние два часа до смены фильтра [18], т. е. к промежутку времени с 9:00 до 11:00 по местному времени (UTC + 3:00). Суммарная погрешность расчета концентрации висмута не превышает 10 %.

Результаты и обсуждение

С 10 января 2007 г. по 3 августа 2020 г. была отобрана и обработана 2701 проба атмосферных аэрозолей. Полученный ряд наблюдений представлен на рис. 1. Статистические характеристики исходной совокупности полученных значений концентрации висмута представлены в таблице.

Концентрация висмута в индивидуальных пробах атмосферных аэрозолей за период исследований изменялась от 0.1 до 11.4 Бк·м⁻³. Среднее значение концентрации составило 2.7 ± 1.5 Бк·м⁻³. Коэффициент вариации составляет 54 % и указывает на значительную изменчивость концентрации висмута за период наблюдений. Из рис. 2 и таблицы видно, что распределение концентрации висмута одновершинное, но отличное от нормального. Среднее и медианное значения концентрации не равны друг другу (при нормальном распределении они равны). Распределение более островершинное по сравнению с нормальным (положительный эксцесс) и его «хвост» сдвинут в сторону больших значений (положительный коэффициент асимметрии).



Р и с . 1 . Временная изменчивость концентрации висмута
F i g . 1 . Temporal variability of bismuth activity concentration

Статистические параметры ряда наблюдений о висмуте

Statistical parameters for the bismuth time series

| Радионуклид | <i>AM</i> | <i>GM</i> | <i>ME</i> | <i>Min</i> | <i>Max</i> | <i>SD</i> | <i>PC10</i> | <i>PC90</i> | <i>SK</i> | <i>KU</i> |
|---|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| Висмут, Бк·м ⁻³ / Bismuth, Bq m ⁻³ | 2.7 | 2.3 | 2.5 | 0.1 | 11.4 | 1.5 | 1.1 | 4.5 | 1.2 | 2.7 |

Примечание: *AM* – среднее арифметическое; *GM* – среднее геометрическое; *ME* – медианное значение; *Min*, *Max* – минимальное и максимальные значения; *SD* – стандартное отклонение; *PC10* – 10-й процентиль; *PC90* – 90-й процентиль; *SK* – асимметрия; *KU* – эксцесс.

Note: *AM* – arithmetic mean; *GM* – geometric mean; *ME* – median; *Min*, *Max* – minimum and maximum values; *SD* – standard deviation; *PC10* – 10th percentile; *PC90* – 90th percentile; *SK* – skewness; *KU* – kurtosis.

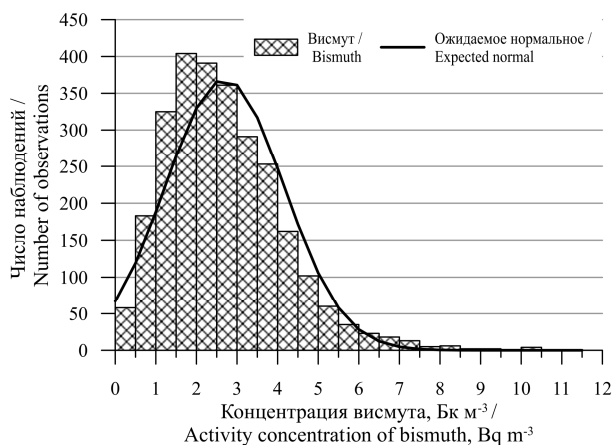


Рис. 2. Частота повторяемости значений концентрации висмута, аппроксимированная нормальным распределением

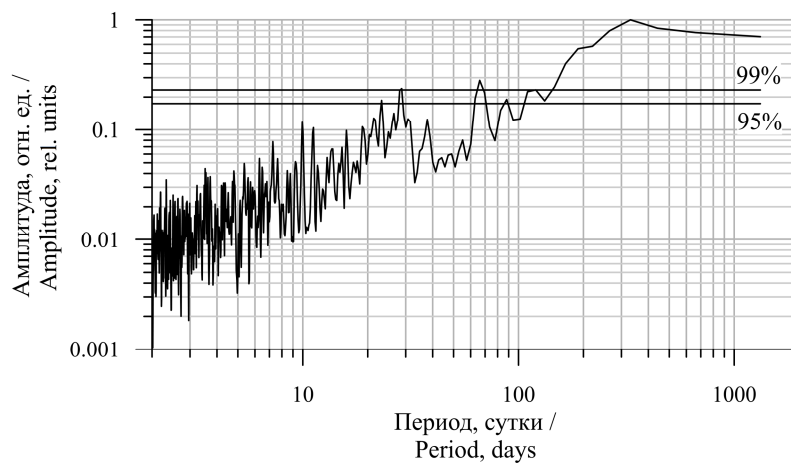
Fig. 2. Frequency distributions of bismuth fitted by a normal distribution

Полученный диапазон изменения концентрации висмута согласуется с литературными данными: 3.1–11.5 Бк·м⁻³ в Салониках, Греция [17], и 1.1–13.1 Бк·м⁻³ в Пекине, Китай [14].

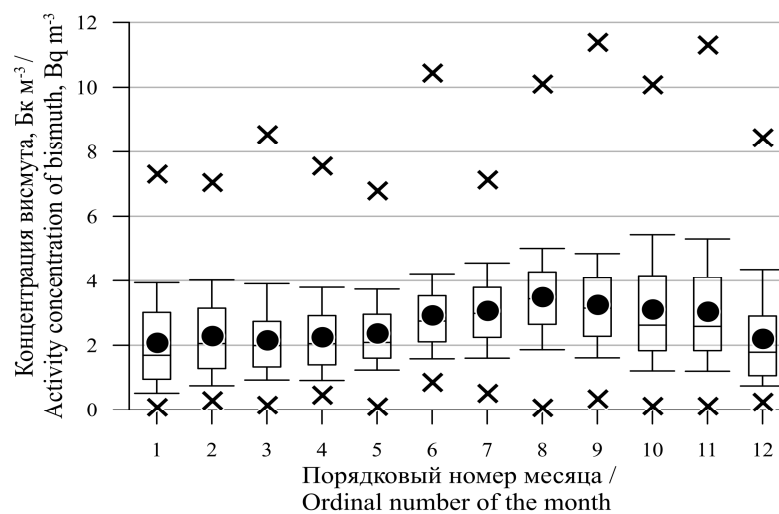
Результаты спектрального анализа указывают на наличие периодичности в 29, 66, 110 сут и 1 год (рис. 3). Периодичность в 29 сут обычно связывают с влиянием лунных циклов через приливы [19]. Периодичности в 66 и 110 сут связаны с сезонной изменчивостью циркуляции, которая направляет континентальные и морские воздушные массы через прибрежные районы [6]. Годовая периодичность связана с влиянием метеопараметров на поток радона в атмосферу и его вертикальное распределение в последней [6].

Сезонная изменчивость

На рис. 4 представлена внутригодовая изменчивость концентрации висмута, осредненная за весь период наблюдений. Относительно повышенные значения концентрации висмута характерны для периода июль – октябрь (3.1–3.5 Бк·м⁻³), относительно пониженные – для периода декабрь – апрель (2.1–2.2 Бк·м⁻³). Максимальная среднемесячная концентрация висмута наблюдается в августе, минимальная – в декабре. Таким образом, в течение года среднемесячный максимум концентрации больше минимума в 1.7 раза.



Р и с . 3. Периодограмма ряда данных о концентрации висмута с указанием доверительных интервалов 95 и 99 %
 Fig. 3. Periodogram of the bismuth time series with 95 and 99% confidence levels



Р и с . 4. Сезонная изменчивость концентрации висмута, представленная в виде диаграммы размаха («ящик с усами»). Границы «ящика» характеризуют 25-й и 75-й процентиль, центральная линия – 50-й процентиль (медиана). «Усы ящика» относятся к 10-му и 90-му процентилю. Минимальное и максимальное значения представлены в виде крестов, среднее значение – в виде кружков
 Fig. 4. Seasonal variation of bismuth activity concentration presented as a box and whiskers plot. Box boundaries represent the 25th and 75th percentiles, the central horizontal line represents the 50th (median) percentile. The whiskers refer to the 10th and 90th percentiles. The minimum and maximum values are plotted as crosses, the circles refer to the mean value

Выявленные особенности внутригодовой изменчивости концентрации висмута нетривиальны, поскольку из литературных данных известно, что в большинстве регионов Земли максимум концентрации радона в приземном слое атмосферы наблюдается в осенне-зимний период, минимум – в весенне-летний [1, 4, 6, 7]. Сезонные различия (месяц, в котором наблюдается максимум или минимум) обычно обусловлены региональными особенностями циркуляции воздушных масс и внутригодовым распределением атмосферных осадков. Данные о внутригодовой изменчивости радона в Севастопольском регионе отсутствуют. Из литературных данных известно о нарушении равновесия между концентрациями радона (полония), свинца и висмута над сушей: они соотносятся в среднем как 1:0.7:0.4 [17]. Также известно, что в аэрозолях морского происхождения наблюдается сдвиг равновесия в сторону висмута, в результате чего соотношение концентраций свинца и висмута может достигать 0.5:1 [13]. Данные о соотношении радона и висмута в аэрозолях морского происхождения отсутствуют.

Анализ полувековой изменчивости ветрового режима в районе Севастополя, представленный в работе [20], показал, что в период с октября по март преобладающими являются ветры северо-северо-восточного направления, с апреля по июнь – юго-восточного и южного направлений, с июля по сентябрь отмечаются ветры как северных и северо-северо-восточных направлений, так и юго-юго-восточных и южных. Основываясь на этих результатах, можно заключить, что в происхождении атмосферных аэрозолей в Севастопольском регионе имеет место сезонная изменчивость: в теплый период года доминируют аэрозоли морского происхождения, в холодный – континентального. В работе [17] приводятся результаты исследования сезонной изменчивости концентрации радона в г. Салоники, Греция. Ее авторами было показано, что в течение года среднемесячный максимум концентрации превышает минимум в 1.5 раза. Используя этот результат и данные о соотношении полония (радона) и висмута в аэрозолях континентального происхождения (1:0.4), а также оценки среднемесячных значений концентрации в Севастопольском регионе, можно оценить концентрацию радона в зимний и летний сезоны. Согласно полученным оценкам в зимний сезон концентрация радона составляет $5.3 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ (значение получено путем нормирования концентрации висмута в декабре на 0.4), в летний сезон – $3.5 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ (концентрация радона в декабре, нормированная на 1.5). Если предположить, что в аэрозолях морского происхождения концентрация висмута близка к равновесной концентрации радона, то полученные оценки концентрации радона в летний сезон хорошо согласуются с данными о концентрации висмута. Таким образом, сезонная вариация происхождения атмосферного аэрозоля в исследуемом регионе может быть тем фактором, который обуславливает изменение в сезонном цикле концентрации висмута.

Отметим, что в последний год наблюдается рост среднегодового значения концентрации висмута ($3.3 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$) по сравнению со средним многолетним ($2.7 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$) на 22 %, а также изменение в его внутригодовом цикле (рис. 5). Так, максимум среднемесячной концентрации висмута пришелся на ноябрь 2019 г. и составил $5.1 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$. Отмечается также повышение среднемесячных значений концентрации висмута в период с октября 2019 г.

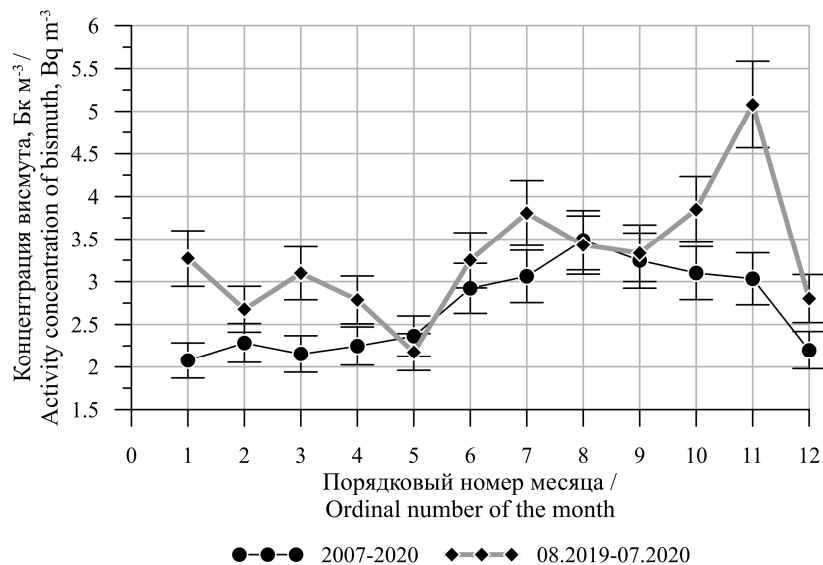


Рис. 5. Сезонная изменчивость концентрации висмута в различные периоды

Fig. 5. Seasonal variability in activity concentration of bismuth in different periods

по апрель 2020 г. в среднем на 38 % по сравнению со средними многолетними значениями за аналогичный период. Наиболее вероятно, что такие изменения связаны со строительными работами (реконструкция центральной части города, возведение новых строений), проводимыми вблизи места отбора проб атмосферных аэрозолей. Эти работы увеличивают содержание пыли в приземной атмосфере. Рост концентрации пыли приводит к росту концентрации радона за счет его выделения с этих частиц.

Оценка эффективной дозы

Эффективную дозу (D) от облучения радоном вне помещений можно оценить следующим образом:

$$D = C_{Rn} \cdot \varepsilon_d \cdot F \cdot t, \quad (3)$$

где C_{Rn} – среднегодовая концентрация радона, $\text{Bк}\cdot\text{м}^{-3}$; ε_d – коэффициент пересчета дозы, $\varepsilon_d = 9.0 \cdot 10^{-6} \text{ мЗв} (\text{Bк}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{ч})^{-1}$; F – коэффициент равновесия между радоном и его короткоживущими дочерними продуктами, $F = 0.6$; t – среднегодовое количество времени, которое человек проводит вне помещения, $t = 1760 \text{ ч}\cdot\text{год}^{-1}$.

Расчет среднегодовой концентрации радона был выполнен путем осреднения представленных выше оценок его концентрации в летний и зимний сезоны. В результате было получено значение $4.4 \text{ Bк}\cdot\text{м}^{-3}$. Такой среднегодовой концентрации радона соответствует среднегодовая эффективная доза от облучения радоном вне помещений в $0.042 \text{ мЗв}\cdot\text{год}^{-1}$. Полученные оценки не противоречат глобальной среднегодовой концентрации радона в $10 \text{ Bк}\cdot\text{м}^{-3}$ и глобальной среднегодовой эффективной дозе в $0.095 \text{ мЗв}\cdot\text{год}^{-1}$ [1].

Выводы

Получены натурные данные о временной изменчивости концентрации висмута-214 в атмосферных аэрозолях в приземном слое атмосферы Севастопольского региона в 2007–2020 гг. За период исследования концентрация висмута-214 в индивидуальных пробах изменялась от 0.1 до 11.4 Бк·м⁻³, среднее значение 2.7 ± 1.5 Бк·м⁻³.

По результатам спектрального анализа было установлено, что во временной изменчивости концентрации висмута-214 выделяются периодичности в 29, 66, 110 сут и 1 год.

Получены количественные характеристики сезонной изменчивости концентрации висмута. Так, повышенные концентрации висмута-214 характерны для периода июль – октябрь (3.1–3.5 Бк·м⁻³), пониженные – для периода декабрь – апрель (2.1–2.2 Бк·м⁻³). Показано, что сезонная вариация происхождения атмосферного аэрозоля в исследуемом регионе может быть тем фактором, который обуславливает изменение в сезонном цикле концентрации висмута-214 по сравнению с ожидаемым циклом концентрации радона-222. Установлено, что в последний год наблюдений отмечается рост концентрации висмута-214 в среднем на 22 % по сравнению со средним многолетним значением его концентрации, а также изменение в его годовом цикле, что, вероятно, связано со строительными работами, проводимыми в центральной части города.

Выполнены оценки среднегодового значения концентрации радона-222 и среднегодовой эффективной дозы от облучения радоном вне помещений. По результатам этих оценок среднегодовая концентрация радона-222 составила 4.4 Бк·м⁻³. Такой среднегодовой концентрации радона-222 соответствует среднегодовая эффективная доза от облучения радоном вне помещений в 0.042 мЗв·год⁻¹.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Exposures from natural radiation sources / UNSC // Sources and effects of ionizing radiation : UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. New York : UN, 2000. Vol. 1. P. 83–156. URL: https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf (date of access: 20.11.2020).
2. Сисюгина Т. И. Оценка эксхалации радона с поверхности больших территорий // Ядерная метеорология / Под ред. С. Г. Малахова и К. П. Махонько. М. : Атомиздат, 1972. Вып. 25. № 2. С. 59–64.
3. Pearson J. E., Jones G. E. Soil concentrations of “emanating radium-226” and the emanation of radon-222 from soils and plants. Tellus. 1966. Vol. 18, iss. 2–3. P. 655–662. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1966.tb00282.x>
4. Annual variation in the atmospheric radon concentration in Japan / Y. Kobayashi [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. 2015. Vol. 146. P. 110–118. doi:10.1016/j.jenvrad.2015.04.007
5. Monitoring of soil radon by SSNTD in Eastern India in search of possible earthquake precursor / A. Deb [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. 2018. Vol. 184–185. P. 63–70. doi:10.1016/j.jenvrad.2018.01.009

6. Characterising fifteen years of continuous atmospheric radon activity observations at Cape Point (South Africa) / R. Botha [et al.] // *Atmospheric Environment*. 2018. Vol. 176. P. 30–39. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.12.010
7. Radon behavior investigation based on cluster analysis and atmospheric modeling / I. Gutiérrez-Álvarez [et al.] // *Atmospheric Environment*. 2019. Vol. 201. P. 50–61. doi:10.1016/j.atmosenv.2018.12.010
8. Evaluating gas transfer velocity parameterizations using upper ocean radon distributions / M. L. Bender [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2011. Vol. 116, iss. C2. C02010. doi:10.1029/2009JC005805
9. Constraining annual and seasonal radon-222 flux density from the Southern Ocean using radon-222 concentrations in the boundary layer at Cape Grim / W. Zahorowski [et al.] // *Tellus B: Chemical and physical meteorology*. 2013. Vol. 65, iss. 1. 19622. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.19622>
10. *Батраков Г. Ф., Земляной А. Д., Карпов В. С.* Радон-222 в приводной атмосфере Средиземного моря и восточной Атлантики // *Морской гидрофизический журнал*. 1988. № 2. С. 59–61.
11. *Tchorz-Trzeciakiewicz D. E., Klos M.* Factors affecting atmospheric radon concentration, human health // *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 584–585. P. 911–920. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.01.137
12. *Rangarajan C., Eapen C. D.* $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb}$ activity ratios in the atmosphere // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1981. Vol. 86, iss. C4. P. 3194–3198. doi:10.1029/JC086iC04p03194
13. *Shapiro M. H., Forbes-Resha J. L.* $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb}$ ratios in air at a height of 20 m // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1975. Vol. 80, iss. 12. P. 1605–1613. doi:10.1029/JC080i012p01605
14. Field measurement of the ^{218}Po , ^{214}Pb and ^{214}Bi concentrations in typical indoor and outdoor environments in Beijing / T. Zhao [et al.] // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2017. Vol. 313. P. 379–384. doi:10.1007/s10967-017-5309-8
15. *Porstendörfer J., Butterweck G., Reineking A.* Diurnal variation of the concentrations of radon and its short-lived daughters in the atmosphere near the ground // *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*. 1991. Vol. 25, iss. 3–4. P. 709–713. doi:10.1016/0960-1686(91)90069-J
16. *Turekian V. C., Graustein W. C., Turekian K. K.* The ^{214}Bi to ^{214}Pb ratio in lower boundary layer aerosols and aerosol residence times at New Haven, Connecticut // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1999. Vol. 104, iss. D9. P. 11593–11598. doi:10.1029/1999JD900031
17. *Stoulos S., Ioannidou A.* Radon and its progenies variation in the urban polluted atmosphere of the Mediterranean city of Thessaloniki, Greece // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. P. 1160–1166. doi:10.1007/s11356-019-07051-4
18. *Батраков Г. Ф., Земляной А. Д.* О методике расчета концентраций RaA (Pb-214), RaB (Bi-214) в приземной атмосфере по гамма-спектрам // *Системы контроля окружающей среды*. Севастополь : МГИ НАН Украины, 2008. С. 357–363.
19. *Шемьи-Заде А. Э.* Трансформация импульса солнечно-геомагнитной активности в возмущения радонового и аэроионного полей планеты // *Биофизика*. 1992. Т. 37, № 4. С. 690–699.

20. Ациховская Ж. М., Богданова Т. А. Изменчивость ветрового режима в районе Севастополя // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. № 10. С. 103–108.

Об авторах:

Кременчуцкий Дмитрий Александрович, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8747-6612**, **ResearcherID: AAC-1673-2020**, *d.kremenchtiskii@mhi-ras.ru*

Батраков Геннадий Федорович, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-6863-2448**, *batrakovgf@gmail.com*

Куринная Юлия Сергеевна, инженер, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-9826-4789**, *kurinnaya-jul@yandex.ru*

Заявленный вклад авторов:

Кременчуцкий Дмитрий Александрович – участие в получении данных, их анализ и написание черновика статьи

Батраков Геннадий Федорович – участие в получении данных и обсуждение полученных результатов, вычитка текста статьи

Куринная Юлия Сергеевна – участие в получении данных и обсуждение полученных результатов, вычитка текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

REFERENCES

1. UNSC, 2000. Exposures from natural radiation sources. In: UNSC, 2000. *Sources and effects of ionizing radiation : UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. I*. New York: UN, 2000, pp. 84–156. Available at: https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf [Accessed: 9 December 2020].
2. Sisigina, T.I., 1972. [Assessment of Radon Exhalation from the Surface of Large Territories]. In: S. G. Malakhov and K. P. Makhonko, eds., 1965. [*Nuclear Meteorology*]. Moscow: Atomizdat, pp. 59–64 (in Russian).
3. Pearson, J.E. and Jones, G.E., 1966. Soil Concentrations of “Emanating Radium-226” and the Emanation of Radon-222 from Soils and Plants. *Tellus*, 18(2–3), pp. 655–662. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1966.tb00282.x>
4. Kobayashi, Y., Yasuoka, Y., Omori, Y., Nagahama, H., Sanada, T., Muto, J., Suzuki, T., Homma, Y., Ihara, H. [et al.], 2015. Annual Variation in the Atmospheric Radon Concentration in Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*, 146, pp. 110–118. doi:10.1016/j.jenvrad.2015.04.007
5. Deb, A., Gazi, M., Ghosh, J., Chowdhury, S. and Barman, Ch., 2018. Monitoring of Soil Radon by SSNTD in Eastern India in Search of Possible Earthquake Precursor. *Journal of Environmental Radioactivity*, 184–185, pp. 63–70. doi:10.1016/j.jenvrad.2018.01.009

6. Botha, R., Labuschagne, C., Williams, A.G., Bosman, G., Brunke, E.-G., Rossouw, A. and Lindsay, R., 2018. Characterising Fifteen Years of Continuous Atmospheric Radon Activity Observations at Cape Point (South Africa). *Atmospheric Environment*, 176, pp. 30–39. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.12.010
7. Gutiérrez-Álvarez, I., Guerrero, J.L., Martín, J.E., Adame, J.A., Vargas, A. and Bolívar, J.P., 2019. Radon Behavior Investigation based on Cluster Analysis and Atmospheric Modeling. *Atmospheric Environment*, 201, pp. 50–61. doi:10.1016/j.atmosenv.2018.12.010
8. Bender, M.L., Kinter, S., Cassar, N. and Wanninkhof, R., 2011. Evaluating Gas Transfer Velocity Parameterizations Using Upper Ocean Radon Distributions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C2), C02010. doi:10.1029/2009JC005805
9. Zahorowski, W., Griffiths, A.D., Chambers, S.D., Williams, A.G., Law, R.M., Crawford, J. and Werczynski, S., 2013. Constraining Annual and Seasonal Radon-222 Flux Density from the Southern Ocean Using Radon-222 Concentrations in the Boundary Layer at Cape Grim. *Tellus B: Chemical and physical meteorology*, 65(1), pp. 19622. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.19622>
10. Batrakov, G.F., Zemlyanoy, A.D. and Karpov, V.S., 1988. Radon-222 in the Near-Water Atmosphere of the Mediterranean Sea and the East Atlantic. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, (2), pp. 59–61 (in Russian).
11. Tchorz-Trzeciakiewicz, D.E. and Kłós, M., 2017. Factors Affecting Atmospheric Radon Concentration, Human Health. *Science of the Total Environment*, 584–585, pp. 911–920. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.01.137
12. Rangarajan, C. and Eapen, C.D., 1981. $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb}$ Activity Ratios in the Atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C4), pp. 3194–3198. doi:10.1029/JC086iC04p03194
13. Shapiro, M.H. and Forbes-Resha, J.L., 1975. $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb}$ Ratios in Air at a Height of 20 m // *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 80(12), pp. 1605–1613. doi:10.1029/JC080i012p01605
14. Zhao, T., Zhang, L., Guo, Q. and Dong, W., 2017. Field Measurement of the ^{218}Po , ^{214}Pb and ^{214}Bi Concentrations in Typical Indoor and Outdoor Environments in Beijing. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 313, pp. 379–384. doi:10.1007/s10967-017-5309-8
15. Porstendorfer, J., Buterweck, G. and Reineking, A., 1991. Diurnal Variation of the Concentrations of Radon and its Short-Lived Daughters in the Atmosphere near the Ground. *Atmospheric Environment*, 25(3–4), pp. 709–713. doi:10.1016/0960-1686(91)90069-J
16. Turekian, V.C., Graustein, W.C. and Turekian, K.K., 1999. The ^{214}Bi to ^{214}Pb Ratio in Lower Boundary Layer Aerosols and Aerosol Residence Times at New Haven, Connecticut. *Journal of Geophysical Research*, 104(D9), pp. 11593–11598. doi:10.1029/1999JD900031
17. Stoulos, S. and Ioannidou, A., 2020. Radon and its Progenies Variation in the Urban Polluted Atmosphere of the Mediterranean City of Thessaloniki, Greece. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, pp. 1160–1166. doi:10.1007/s11356-019-07051-4
18. Batrakov, G.F. and Zemlyanoy, A.D., 2008. [On the Method of Calculating the Concentrations of RaA (Pb-214), RaB (Bi-214) in the Surface Atmosphere from Gamma Spectra]. In: MHI, 2008. *Monitoring Systems of Environment*. Sevastopol: MHI NAS of Ukraine, pp. 357–363 (in Russian).

19. Shemyzade, A.E., 1992. Transformation of the Solar-Geomagnetic Activity Impulses on Ecological Effective Disturbances of the Radon and Aeroion Fields of the Earth. *Biofizika*, 37(4), pp. 690–699.
20. Atsikhovskaya, G.M. and Bogdanova, T.A., 2004. Variability of Wind Regime near Sevastopol. In: MHI, 2004. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources], 10, pp. 103–108 (in Russian).

About the authors:

Dmitrii A. Kremenchutskii, Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0002-8747-6612**, **ResearcherID: AAC-1673-2020**, *d.kremenchutskii@mhi-ras.ru*

Gennady F. Batrakov, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0002-6863-2448**, *batrakovgf@gmail.com*

Yuliya S. Kurinnaya, engineer, Marine Hydrophysical Institute RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-9826-4789**, *kurinnaya-jul@yandex.ru*

Contribution of the authors:

Dmitrii A. Kremenchutskii – participation in data collection and their analysis, article draft writing

Gennady F. Batrakov – participation in data collection, discussion of the obtained results, article text editing

Yuliya S. Kurinnaya – participation in data collection, discussion of the obtained results, article text editing

All the authors have read and approved the final manuscript.