

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 551.577.7

КОСМОГЕННЫЙ БЕРИЛЛИЙ-7 В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ

© Е.А. Бураева*, В.С. Малышевский*, В.И. Ратушный**

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

**Волгодонский инженерно-технический институт, филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

Изотоп ${}^7\text{Be}$ один из немногих радионуклидов, содержание которого в атмосфере не зависит от антропогенных факторов. Следовательно, его можно использовать и как монитор для выявления источников поступления в атмосферу радионуклидов техногенного происхождения, таких как нештатные ситуации на радиационноопасных, химически опасных объектах. В статье приведены результаты мониторинга содержания радиоактивного изотопа ${}^7\text{Be}$ в приземной атмосфере в Ростовской области за десятилетний период с 2001 по 2011 г., охватывающий вторую половину 23-го и первую половину 24-го солнечных циклов. Полученные данные подтверждают обратную зависимость среднегодовой объемной активности космогенного ${}^7\text{Be}$ от солнечной активности. Данные наблюдений позволили впервые провести комплексное исследование и выявить корреляционные связи объемной активности космогенного ${}^7\text{Be}$ с основными метеопараметрами, такими как температура воздуха, скорость ветра, количество осадков, относительная влажность и атмосферное давление.

Ключевые слова: атмосферная радиоактивность, приземный слой воздуха, космогенные радионуклиды, ${}^7\text{Be}$, активность, атмосферные аэрозоли.

Поступила в редакцию 14.10.2020

После доработки 02.11.2020

Принята к публикации 06.11.2020

Введение

Исследованию радиоактивности Земной атмосферы придается большое значение как в нашей стране (см., например, обзоры [1, 2] и имеющиеся в них ссылки) так и за рубежом (см., например, одно из ранних исследований [3]). Это обусловлено, главным образом, влиянием климатических и техногенных факторов на содержание и перенос загрязняющих веществ в атмосфере, в том числе радиоактивных изотопов. На сегодняшний день мониторинг содержания радионуклидов в приземном слое атмосферы позволяет сделать вывод о том, что существенный вклад в радиоактивность приземного воздуха дает короткоживущий изотоп ${}^7\text{Be}$ космогенного происхождения (период полураспада 54,4 дня, в результате электронного захвата обнаруживается по пику гамма излучения продукта распада ${}^7\text{Li}$ 477,59 кэВ с квантовым выходом 10,42 %). Вариации содержаний ${}^7\text{Be}$ в воздухе связаны с солнечной активностью и имеют характерный сезонный ход и широтную зависимость [4]. Благодаря быстрому распаду его активность изменяется в растениях в зависимости от синоптических условий. Поэтому ${}^7\text{Be}$ представляет интерес не только с точки зрения радиоактивного воздействия на биологические системы, а также может являться индикатором скоростей обмена в растениях и, как следствие, показателем накопления природными средами загрязняющих веществ, поступающих из атмосферы [5]. Именно это делает его удобным индикатором для быстрой оценки возможного атмосферного загрязнения и воздушного обмена в окружающей природной среде. Более того, ${}^7\text{Be}$ один из немногих радионуклидов, содержание которого в атмосфере не зависит от антропогенных факторов. Следовательно, его можно использовать и как монитор для выявления

источников поступления в атмосферу радионуклидов техногенного происхождения. Поэтому изучение механизмов и закономерностей процессов возникновения, переноса и миграции радионуклида ${}^7\text{Be}$ в объектах экосферы и на границах их раздела весьма актуально и своевременно.

Считается, что основные реакции, приводящие к образованию изотопов бериллия в атмосфере Земли, протекают при взаимодействии частиц ядерно-электромагнитного каскада, вызванного галактическими протонами, с главными составляющими атмосферного воздуха – ядрами азота и кислорода [6, 7]. Это так называемые реакции скалывания ${}^{14}\text{N}(p,X){}^7\text{Be}$, ${}^{16}\text{O}(p,X){}^7\text{Be}$, ${}^{14}\text{N}(n,X){}^7\text{Be}$ и ${}^{16}\text{O}(n,X){}^7\text{Be}$. Другим возможным механизмом образования изотопа бериллия ${}^7\text{Be}$ в верхних слоях атмосферы могут быть фотоядерные реакции ${}^{14}\text{N}(\gamma,X){}^7\text{Be}$, ${}^{16}\text{O}(\gamma,X){}^7\text{Be}$ и ${}^{12}\text{C}(\gamma,X){}^7\text{Be}$. Так в работах [8, 9] проведены измерения средних значений сечений реакций на элементах N, O и C природного изотопного состава в интервале энергий от порога до 90 МэВ. На основании измеренных сечений фотообразования ${}^7\text{Be}$, а также моделирования ядерно-электромагнитного каскада в атмосфере исследован вклад фотоядерного механизма в производство космогенного радиоизотопа ${}^7\text{Be}$ в земной атмосфере и показано, что вклад фотоядерного механизма сравним с вкладом протонного и нейтронного механизмов образования ${}^7\text{Be}$ в атмосфере, и его необходимо учитывать при анализе процессов накопления и переноса ${}^7\text{Be}$ в приземном слое атмосферы.

Почти сразу после образования ядра ${}^7\text{Be}$ осаждаются на аэрозолях субмикронных размеров, и их дальнейшая судьба определяется процессами переноса с воздушными массами, осаждения и вымывания осадками. Таким образом, в приземный слой воздуха радионуклиды, в том числе и ${}^7\text{Be}$, поступают в результате различных процессов: генерации в атмосфере и стратосфере и последующего воздушного переноса (для радионуклидов космогенного происхождения); ветрового подъема пыли с подстилающей поверхности (радионуклиды земного происхождения и искусственные радионуклиды); выбросов предприятий, работающих на углеводородном топливе (главным образом ${}^{210}\text{Pb}$), а также в результате прямых поступлений после аварий на предприятиях ядерного топливного цикла (искусственные радионуклиды).

В стратосфере содержится 70-80 % (скорость генерации $0,041 \text{ ат/см}^2\text{с}$), а в тропосфере 20-30 % изотопов ${}^7\text{Be}$ (скорость генерации $0,027 \text{ ат/см}^2\text{с}$) [6]. Время жизни в стратосфере оценивается в 1,0 – 1,5 года [6, 10] и определяется периодом полураспада ${}^7\text{Be}$ и обменом воздушных масс между стратосферой и тропосферой. В тропосфере распределение ${}^7\text{Be}$ по высоте и широте определяется в основном перемещением воздушных масс и вымыванием аэрозолей. Время жизни ${}^7\text{Be}$ в тропосфере 24-30 сут. [10]. В стратосфере эти процессы существенно менее интенсивны, колебания объемной активности связаны исключительно с вариацией космических лучей и зависят от активности солнца, геомагнитной широты и высоты над уровнем моря.

Из-за наличия между стратосферой и тропосферой слоя мощной температурной инверсии (тропопаузы) ${}^7\text{Be}$ переносится в осенне-летний период перестройки атмосферы из стратосферы в тропосферу. Кроме того, в самой тропосфере генерируется ${}^7\text{Be}$. Скорость генерации ${}^7\text{Be}$ в атмосфере одна из самых высоких и примерно равна $0,081 \text{ ат/см}^2\text{с}$ (выше только скорость генерации ${}^3\text{H}$ и ${}^{14}\text{C}$). Вариации концентрации ${}^7\text{Be}$ у земной поверхности зависят от процессов обмена воздушных масс между резервуарами стратосферы и тропосферы, процессов сухих и мокрых выпадений; процессов в тропосфере (вертикальный перенос, адвекция и пр.).

В литературе достаточно много данных по мониторингу содержания ${}^7\text{Be}$ в земной атмосфере на различных широтах и в различных климатических условиях (см., например, работы [11-14] и содержащиеся в них ссылки). Имеются некоторые общие закономерности. Так, процессы обмена между стратосферой и тропосферой определяют сезонный ход среднемесячных значений объемной активности ${}^7\text{Be}$. В

сезонном ходе объемной активности ^7Be , как правило, имеется весенний (летний) максимум и осенний (зимний) минимум.

При изменении солнечной активности (которую принято определять по числу пятен на Солнце или по т.н. числам Вольфа) в пределах 11-ти летнего солнечного цикла и аperiодических вспышках активности Солнца изменяется геомагнитное поле, в нем отклоняются галактические протоны и, соответственно, изменяется скорость образования ^7Be [4]. При этом возрастанию солнечной активности (т.е. увеличению чисел Вольфа) соответствует уменьшение скорости образования ^7Be и наоборот. Из-за влияния геомагнитного поля Земли на распределение частиц ядерно-электромагнитного каскада скорость образования ^7Be зависит и от географических координат станции наблюдения.

На территории России оценка содержания ^7Be в приземном слое воздуха ранее проводилась главным образом для Москвы, Санкт-Петербурга и Ростова-на-Дону [15, 16]. Например, по данным Московского центра ГСЭН среднее значение содержания ^7Be (с 1996 по 2001 гг.) составило $4,3 \text{ мБк/м}^3$ (для сравнения, приводимое в справочниках значение – $3,0 \text{ мБк/м}^3$). Минимальное содержание ^7Be – $1,0 \text{ мБк/м}^3$ зарегистрировано 08.12.2000 г., а максимальное – $12,2 \text{ мБк/м}^3$ 9.06.1999 г., т.е. содержание ^7Be варьирует в пределах порядка. Прослеживается чёткая зависимость между содержанием ^7Be и временем года. Зима, осень – низкие значения, лето, весна – высокие. Это может быть связано с вымыванием зимой и осенью из атмосферы аэрозолей, на которых сорбируется ^7Be .

Для надежного установления связи содержания ^7Be в приземном слое воздуха с солнечной активностью на фоне вариаций факторов иного происхождения необходимы длительные (более 2-х циклов солнечной активности) систематические определения ^7Be на глобальной сети станций. В данной работе приведены результаты изучения содержания космогенного ^7Be в приземном слое атмосферы за период 2001-2011 гг. на примере индустриального города (Ростов-на-Дону) с умеренно-континентальным климатом.

Материалы и методы

Отбор проб атмосферных аэрозолей проводился на Аспирационной станции Южного федерального университета в г. Ростове-на-Дону ($47^\circ 14'$ с.ш и $39^\circ 42'$ в.д) показан на рисунке 1.



Рисунок 1 – Аспирационная станция Южного федерального университета (г. Ростов-на-Дону) [Aspiration station of the Southern Federal University (Rostov-on-Don)]

Фильтровентиляционная установка оснащена электровентилятором мощностью 0,676 кВт и производительностью 600 м³/час, обеспечивающим давление 335 мм.рт.ст. На фильтродержателе (цилиндр из металлической сетки) устанавливается фильтр из ткани Петрянова ФПП-15-1.7 общей площадью 0.56 м³ (в том числе торцевой части площадью 0.028 м³). Воздух через заборный патрубок поступает в герметичную камеру с фильтром и через воздухоотводящий патрубок и электровентилятор выбрасывается в атмосферу. Контроль расхода воздуха проводится сразу после установки и перед снятием фильтра с помощью измерительной диафрагмы с определением разницы статических давлений в воздуховоде до и после диафрагмы (расположенной в сечении воздуховода) микроманометром ММН-240.

По результатам измерений расход воздуха составляет около 630 м³/час в начале экспозиции («свежий» фильтр) и около 510 м³/час в конце 7-дневной экспозиции (аэрозоли экспонированного фильтра создают дополнительное сопротивление потоку воздуха). Для определения чистого времени экспозиции использовали электронный хронометр.

Экспонированный фильтр просушивали на воздухе и запрессовывается в таблетки диаметром 35 мм и высотой 10 – 30 мм. Через 14 суток после снятия фильтра его гамма-спектр измеряется в течении 24 часов. Содержание ⁷Ве в атмосферных аэрозолях определяли гамма-спектрометрическим методом радионуклидного анализа по пику 477,59 кэВ (10,42 %) с использованием низкофоновой камеры с GeHP-детектором и набором аттестованных счетных геометрий. Эффективность детектора составляла 25% в диапазоне 30-1500 кэВ, а отношением пик/комpton 51,7:1 (модель 7229N-7500sl-2520, фирмы Canberra). Погрешность определения объемной активности ⁷Ве не превышала 10%.

Анализ результатов

В результате непрерывных измерений объемной активности ⁷Ве в приземном слое воздуха г. Ростова-на-Дону за период 2001-2011 гг. установлено, что его содержание в атмосферных аэрозолях варьируется в пределах, от 0,025 мБк/м³ до 27,0 мБк/м³, при среднем содержании за все время наблюдений 5,107 мБк/м³. В основном, большинство измеренных значений содержания ⁷Ве попадает в диапазон 3-7 мБк/м³, что соответствует мощности поглощенной эквивалентной дозе примерно 10⁻⁸ мЗв/год.

Исследования радиоактивности приземной атмосферы г. Ростова-на-Дону охватывают вторую половину 23-го (2001-2007 гг.) и первую половину 24-го (2007-2011 гг.) солнечных циклов. Полученные данные (рис. 2) подтверждают обратную зависимость среднегодовой объемной активности ⁷Ве от солнечной активности. На максимум чисел Вольфа (111,0) приходится минимум содержания ⁷Ве (3,2 мБк/м³).

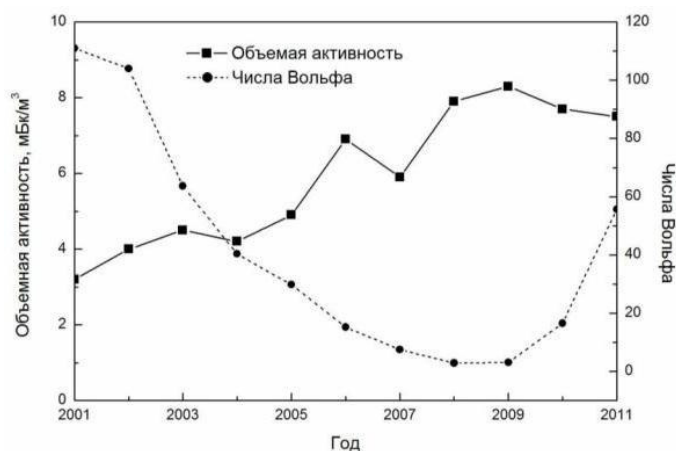


Рисунок 2 – Среднегодовые значения объемной активности ⁷Ве в приземной атмосфере и чисел Вольфа за период наблюдения с 2001 по 2011 гг. [Average annual values of the volumetric activity of ⁷Be in the surface atmosphere and Wolf numbers for the observation period from 2001 to 2011]

Детальное (среднемесячное) поведение объемной активности ^7Be и чисел Вольфа также демонстрируют их обратную зависимость (рис. 3а). Соответствующая диаграмма рассеяния приведена на рисунке 3б. Вычисленный коэффициент корреляции составляет величину $k = -0,42$. При этом явные солнечные вспышки (например, событие 29 октября 2003 г.) не сказываются на годовом поведении ^7Be в атмосфере, что, по-видимому, связано с дополнительным совокупным влиянием метеопараметров и времени года на сезонное распределение данного радионуклида.

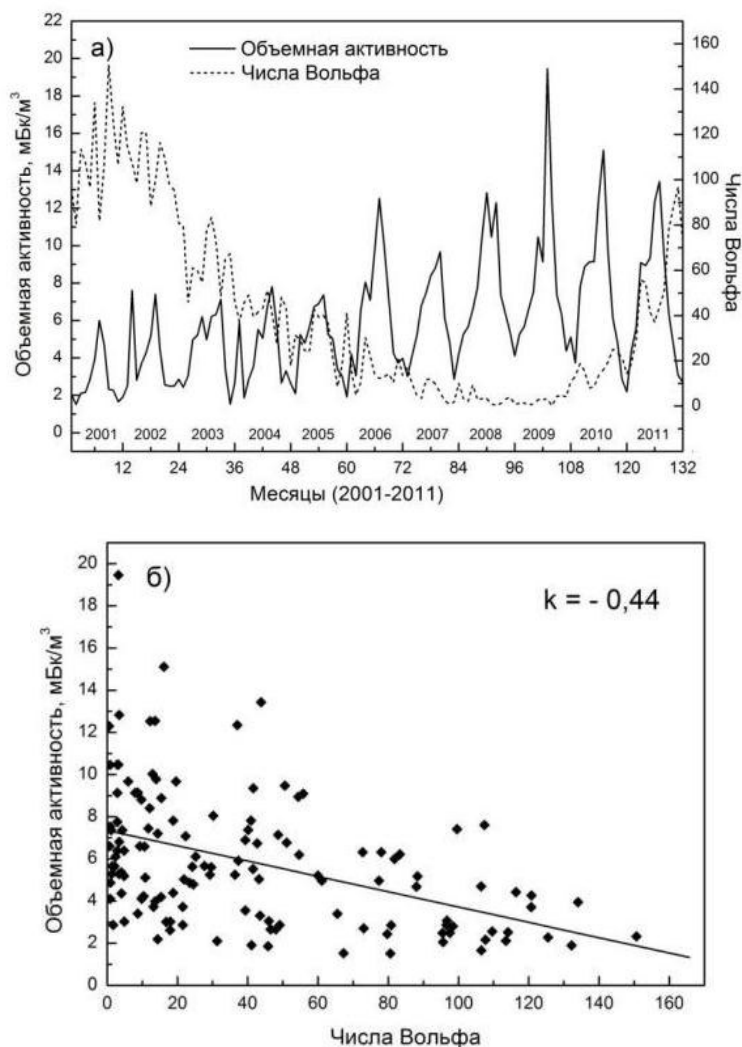


Рисунок 3 – а) Среднемесячные значения объемной активности ^7Be в приземной атмосфере и чисел Вольфа за период наблюдения с 2001 по 2011 гг.; б) Диаграмма рассеяния, иллюстрирующая корреляционную связь среднемесячных значений объемной активности и чисел Вольфа за период наблюдений с 2001 по 2011 гг. [а) Monthly mean values of the volumetric activity of ^7Be in the surface atmosphere and Wolf numbers for the observation period from 2001 to 2011; б) Scatter diagram illustrating the correlation between the monthly mean values of volumetric activity and Wolf numbers for the observation period from 2001 to 2011]

В сезонном ходе объемной активности ^7Be в атмосфере г. Ростова-на-Дону, имеют место максимум в весенне-летний период и минимум – в осенне-зимний. Как уже отмечалось выше, подобное поведение объемной активности ^7Be связано с весенне-летней перестройкой атмосферы и началом вегетационного периода. В сезонном поведении ^7Be (рис. 4), усредненном за период 2001-2011 гг., имеется явно выраженный максимум объемной активности приходящийся на июль. Максимальные среднемесячные значения содержания ^7Be зафиксированы в 2009 г. (июль) – $19,5 \text{ мБк/м}^3$, а минимум в 2001 г. (февраль) – $1,51 \text{ мБк/м}^3$. В целом, в сезонном

поведении ^7Be четкий максимум объемной активности прослеживается с июля по август, как за весь период наблюдений, так и за каждый год (см., например, рис. 3).

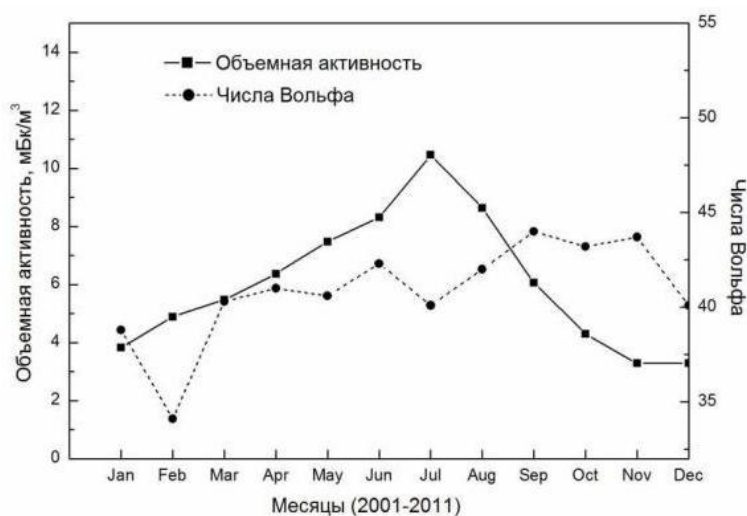


Рисунок 4 – Сезонный ход объемной активности ^7Be в приземной атмосфере и чисел Вольфа, усредненный за период наблюдений с 2001 по 2011 гг. [Seasonal variation of the volumetric activity of ^7Be in the surface atmosphere and Wolf numbers averaged over the observation period from 2001 to 2011]

Полученные данные наблюдений за десять лет впервые позволили провести комплексное исследование связи объемной активности космогенного ^7Be с такими метеопараметрами, как температура воздуха, скорость ветра, количество осадков, относительная влажность и атмосферное давление.

В таблице 1 приведены усредненные метеопараметры для г. Ростова-на-Дону за период наблюдений.

Таблица 1 – Усреднённые метеопараметры [Average meteorological parameters]

Год	Количество осадков, мм	Температура, °C	Скорость ветра, м/с	Относительная влажность, %	Атмосферное давление, мм.рт.ст.
2001	67,0	10,0	1,9	71,7	755,5
2002	46,0	10,3	1,8	69,2	756,0
2003	52,0	9,0	1,9	70,8	756,8
2004	78,0	10,2	1,7	75,1	755,3
2005	58,0	10,8	1,9	71,6	756,2
2006	47,0	10,4	3,1	69,8	755,9
2007	31,0	12,3	4,2	64,8	755,3
2008	36,0	10,8	4,3	69,5	756,3
2009	51,0	10,9	4,4	70,8	755,5
2010	45,0	11,9	5,1	68,8	755,0
2011	48,0	10,1	4,4	69,2	756,1

Максимумы среднегодового количества осадков приходится на 2001 и 2004 гг., самыми засушливыми были 2007 и 2008 годы. Температура воздуха, в целом, изменяется в пределах 10-36 %, максимум среднегодовой температуры воздуха зафиксирован в 2007 году. В целом, в условиях г. Ростова-на-Дону максимум

температуры воздуха и минимум количества осадков и относительной влажности приходится, в основном, на август (реже – на июль). Практически не изменились среднегодовые значения относительной влажности воздуха и атмосферного давления.

За период наблюдений скорость ветра с 2006 г., возросла почти в два раза. Начиная с 2006 г., увеличилась повторяемость ветров восточного и северо-восточного направления. В 2009 г. преобладал ветер восточного направления, далее, при неизменном количестве восточных ветров усиливается повторяемость ветра западного направления. Эти изменения метеопараметров в сочетании (в первую очередь направления и силы ветра, а также относительной влажности воздуха) способствуют ветровому подъему почвенной пыли и поступлению радионуклидов в приземную атмосферу, в то время как количество осадков играет определяющую роль в вымывании аэрозольной пыли. На рисунке 5а,б приведены зависимости объемной активности ^7Be от среднемесячной скорости ветра и соответствующая диаграмма рассеяния, подтверждающие эффективность ветрового подъема. Коэффициент корреляции $k = 0,34$.

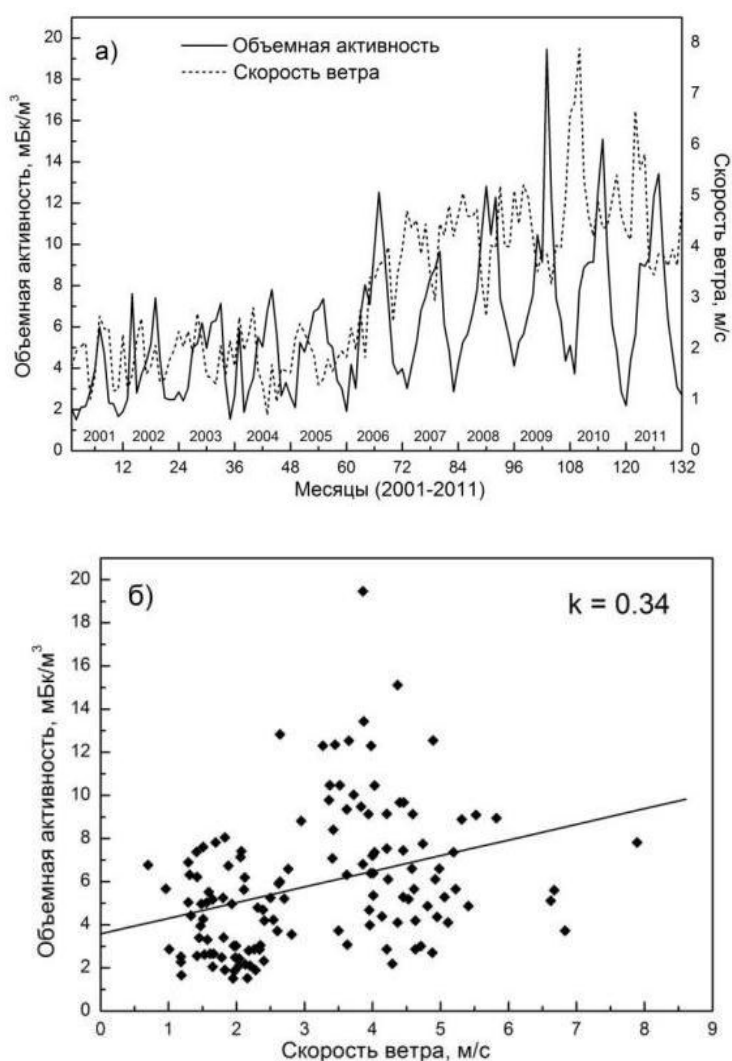


Рисунок 5 – а) Среднемесячные значения объемной активности ^7Be в приземной атмосфере и скорости ветра за период наблюдения с 2001 по 2011 гг.; б) Диаграмма рассеяния, иллюстрирующая корреляционную связь среднемесячных значений объемной активности и скорости ветра за период наблюдений с 2001 по 2011 гг. [a) Monthly mean values of ^7Be volumetric activity in the surface atmosphere and wind speed for the observation period from 2001 to 2011; b) Scatter diagram illustrating the correlation between the monthly mean values of volumetric activity and wind speed for the observation period from 2001 to 2011]

Зависимость ^7Be от количества осадков (рис.6а) более сложная. Для Ростова-на-Дону минимальное количество осадков (0-20 мм) в весенне-летний период приходится, как правило, на май, июль, август и сентябрь. В целом, имеет место обратная зависимость объемной активности ^7Be в приземном слое воздуха от количества выпавших осадков с коэффициентом корреляции $k = -0,21$ (рис. 6б).

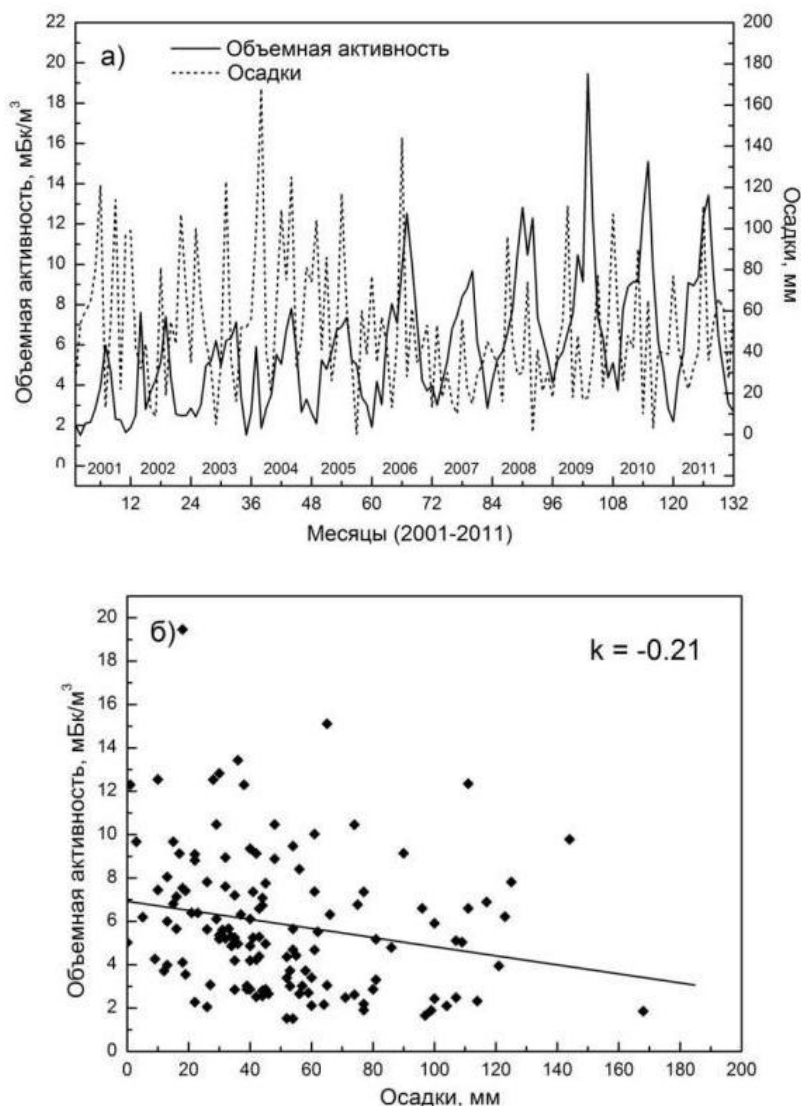


Рисунок 6 – а) Среднемесячные значения объемной активности ^7Be в приземной атмосфере и количества осадков за период наблюдения с 2001 по 2011 гг.; б) Диаграмма рассеяния, иллюстрирующая корреляционную связь среднемесячных значений объемной активности и количества осадков за период наблюдений с 2001 по 2011 гг. [a) The mean monthly values of the ^7Be volumetric activity in the surface atmosphere and the amount of precipitation for the observation period from 2001 to 2011; b) A scatter plot illustrating the correlation between the monthly mean values of volumetric activity and the amount of precipitation for the observation period from 2001 to 2011]

Зависимость объемной активности ^7Be в приземной атмосфере от относительной влажности воздуха также обратная (рис. 7а,б). В основном, на максимумы объемной активности ^7Be в приземном слое воздуха приходятся минимумы относительной влажности воздуха с коэффициентом корреляции $k = -0,62$. В большинстве случаев максимумы объемной активности ^7Be приходятся на период июль-сентябрь с минимальными значениями относительной влажности воздуха (менее 50 %). Подобная зависимость активности ^7Be в атмосферных аэрозолях от количества выпавших осадков и относительной влажности воздуха подтверждает факт вымывания аэрозолей осадками.

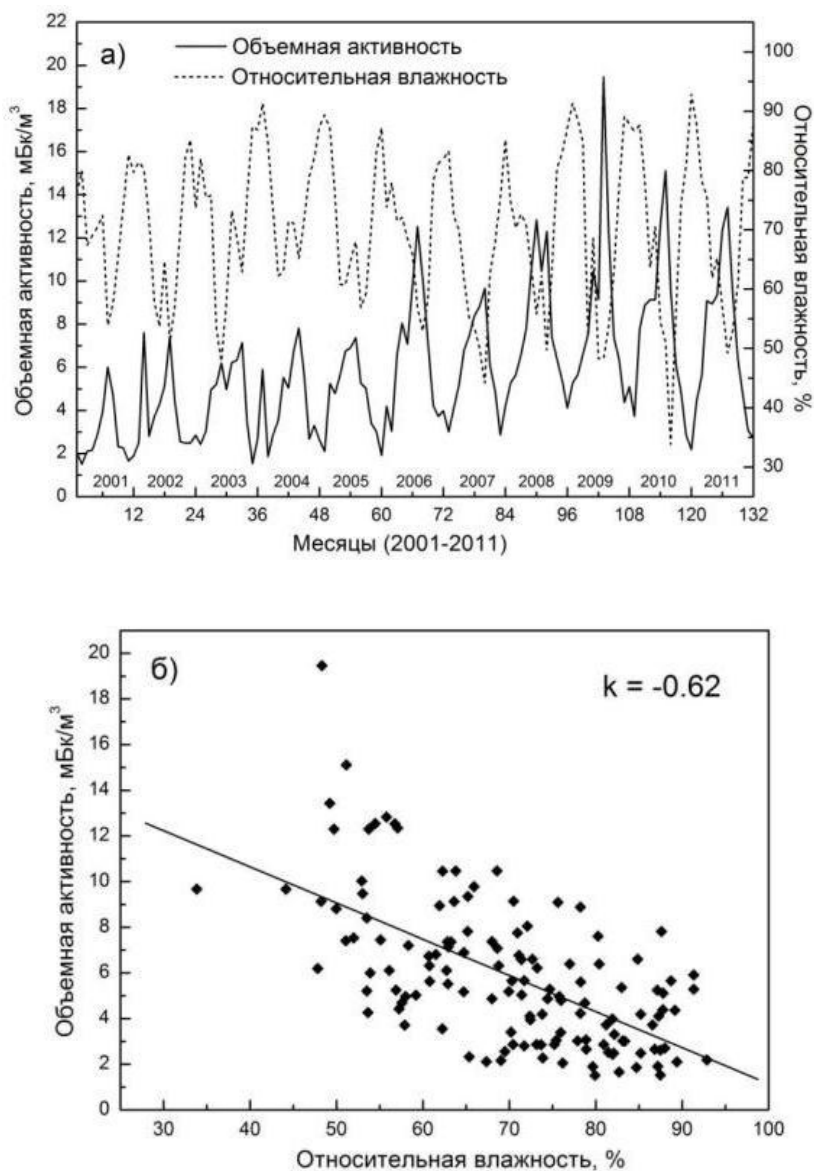


Рисунок 7 – а) Среднемесячные значения объемной активности ${}^7\text{Be}$ в приземной атмосфере и относительной влажности за период наблюдения с 2001 по 2011 гг.; б) Диаграмма рассеяния, иллюстрирующая корреляционную связь среднемесячных значений объемной активности и относительной влажности за период наблюдений с 2001 по 2011 гг. [а) Monthly mean values of the volumetric activity of ${}^7\text{Be}$ in the near-ground atmosphere and relative humidity for the observation period from 2001 to 2011; б) Scatter diagram illustrating the correlation between the monthly mean values of volumetric activity and relative humidity for the observation period from 2001 to 2011]

На рисунках 8а,б и 9а,б приведены зависимости объемной активности ${}^7\text{Be}$ от температуры воздуха и атмосферного давления, соответственно. В целом, сезонный ход ${}^7\text{Be}$ повторяет изменение температуры за период 2001-2011 г. и имеет место прямая зависимость данных параметров с коэффициентом корреляции $k = 0,61$, показанном на диаграмме рассеяния рис 8б. Что касается атмосферного давления, то, как и следовало ожидать, наблюдается обратная зависимость с коэффициентом корреляции $k = -0,54$ (рис. 9б). Такое поведение объясняется тем фактом, что понижение давления обычно сопровождается увеличением осадков и, как следствие, дополнительным вымыванием аэрозолей из приземного слоя атмосферы.

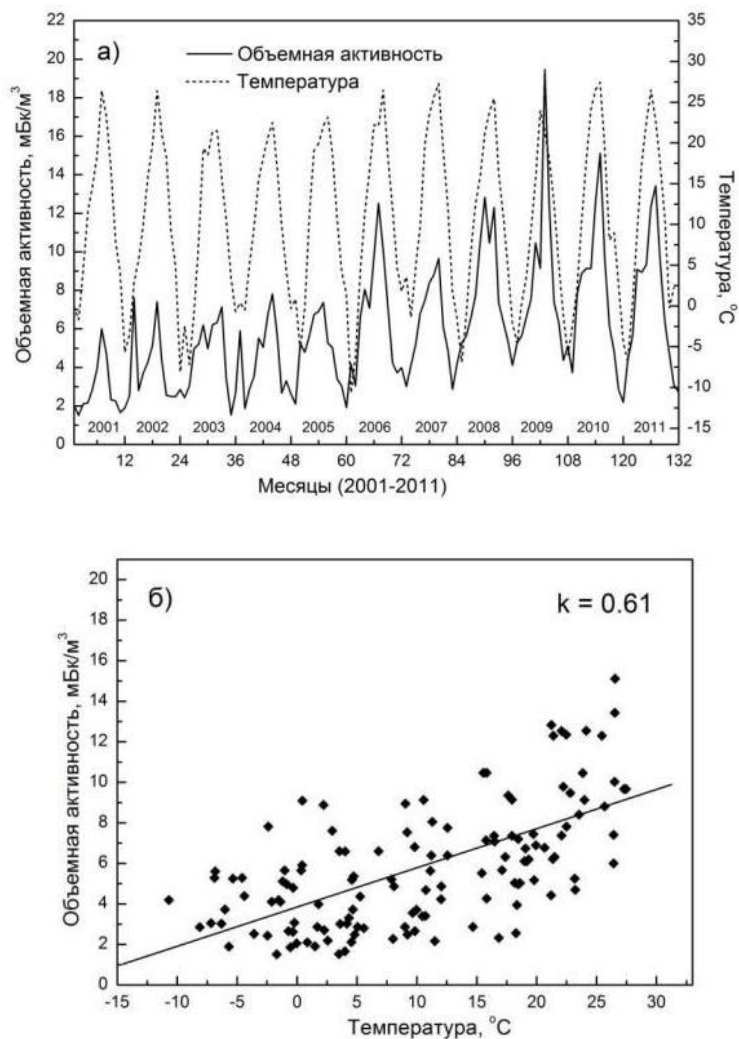
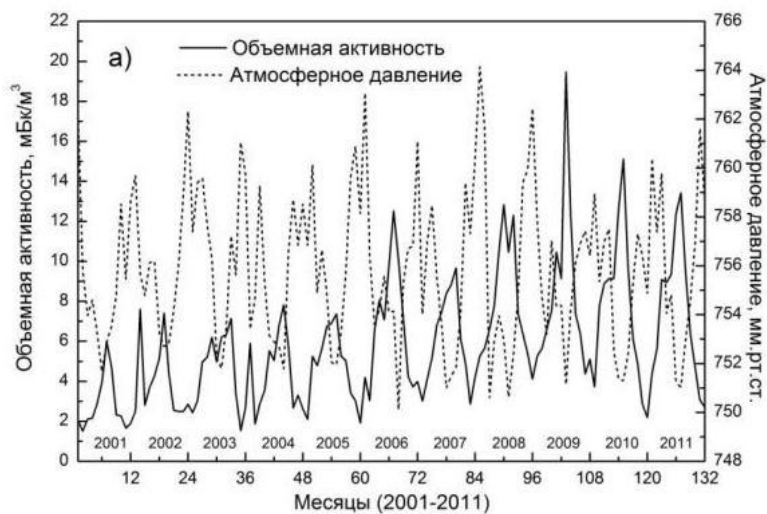


Рисунок 8 – а) Среднемесячные значения объемной активности ^7Be в приземной атмосфере и температуры воздуха за период наблюдения с 2001 по 2011 гг.; б) Диаграмма рассеяния, иллюстрирующая корреляционную связь среднемесячных значений объемной активности и температуры воздуха за период наблюдений с 2001 по 2011 гг. [a) Monthly values of the ^7Be volumetric activity in the surface atmosphere and air temperature for the observation period from 2001 to 2011; b) Scatter diagram illustrating the correlation between the monthly mean values of volumetric activity and air temperature for the observation period from 2001 to 2011]



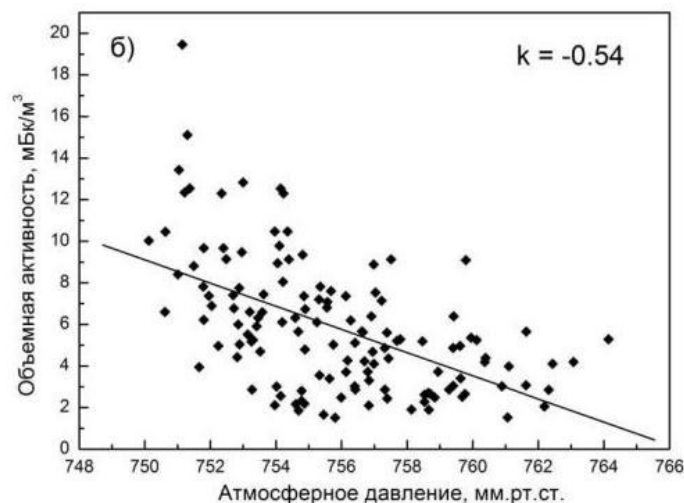


Рисунок 9 – а) Среднемесячные значения объемной активности ⁷Be в приземной атмосфере и атмосферного давления за период наблюдения с 2001 по 2011 гг.; б) Диаграмма рассеяния, иллюстрирующая корреляционную связь среднемесячных значений объемной активности и атмосферного давления за период наблюдений с 2001 по 2011 гг. [a) Monthly mean values of ⁷Be volumetric activity in the surface atmosphere and atmospheric pressure for the observation period from 2001 to 2011; b) Scatter diagram illustrating the correlation between the monthly mean values of volumetric activity and atmospheric pressure for the observation period from 2001 to 2011]

Выводы

В целом, среди множества радионуклидов, поступающих в приземный слой воздуха в результате различных процессов, только легко определяемый ⁷Be практически не связан с деятельностью человека и в минимальной степени зависит от состояния земной поверхности. Поэтому анализ отношений содержания какого-либо из радионуклидов к содержанию ⁷Be в приземном слое воздуха может быть использован, во-первых, для выявления источников и оценки особенностей поступления других радионуклидов в атмосферу, а во-вторых, для использования его как трассера вертикального перемещения загрязняющих веществ в приземном слое воздуха.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание в области научной деятельности, Южный федеральный университет, 2020.). Тема № БАЗ0110/20-3-07ИФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеева, Ю. М. Российские исследования в области атмосферной радиации в 2003-2006 гг. / Ю. М. Тимофеева, Е. М. Шульгина // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 45. № 2. – С. 193-208.
2. Тимофеева, Ю. М. Российские исследования в области атмосферной радиации в 2007-2010 гг. / Ю. М. Тимофеева, Е. М. Шульгина // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 49, №1. – С. 19-36.
3. Carvalho, Fernando P. Origins and concentrations of ²²²Rn, ²¹⁰Pb, ²¹⁰Bi and ²¹⁰Po in the surface air at lisbon, portugal, at the atlantic edge of the european continental landmass // Atmospheric Environment. 1995. V. 29, № 15. P. 1809-1819.
4. Terzi, L., Kalinowski, M. World-wide seasonal variation of ⁷Be related to large-scale atmospheric circulation dynamics // Journal of Environmental Radioactivity 2017, V. 178-179, P. 1-15.
5. Буряева, Е. А. Содержание космогенного ⁷Be в приземном слое воздуха умеренных широт / Е. А. Буряева [и др.] // Атомная энергия. 2007. Т.102, №.6. С. 370-374.
6. Hisao Nagoi, Wataru Tada, Takayuki Kobayashi. Production rates of ⁷Be and ¹⁰Be in the atmosphere // Nucl. Instr and Methods in Phys. Res. 2001. V. 172B. P.796-801.
7. Usoskin, I. G., Kovaltsov, G. A. Production of cosmogenic ⁷Be isotope in the atmosphere: Full 3-D modeling // J. Geophys. Res. 2008. V. 113(D12), P. D12107(1-12).

8. Безуглов, М. В. Фотоядерный канал образования космогенного ^7Be в атмосфере Земли / М. В. Безуглов // Ядерная физика. – 2012. – Т. 75, № 4. – С. 427-431.
9. Bezuglov, M. V. Photonuclear production of cosmogenic beryllium-7 in the terrestrial atmosphere / M. V. Bezuglov, V. S. Malyshevsky, G. V. Fomin, A. V. Torgovkin, B. I. Shramenko, T. V. Malykhina // Physical Review C. 2012. V.86. P.024609(1-12).
10. Koch, D. M., Jacob, D. J., Graustein, W. C. Vertical transport of tropospheric aerosols as indicated by ^7Be and ^{210}Pb in chemical tracer model // J. Geophys. Res. 1996. V.101, P.18651-18661.
11. Gerasopoulos, E. A climatology of ^7Be at four high-altitude stations at the Alps and the Northern Apennines / E. A. Gerasopoulos, P. Stohl, A. Zanis, C.S. Zerefos, C. Papastefanou, W. Ringer, L. Tobler, S. Hubener, H. W. Gaggeler, H. J. Kanter, L. Tositti, S. Sandrini // Atmospheric Environment. 2001. № 35. P. 6347-6360.
12. Azahra, M. Seasonal ^7Be concentrations in near-surface air of Granada (Spain) in the period 1993-2001 / M. Azahra, A. Camacho-Garcia, C. Gonzalez-Gomez, J.J. Lopez-Penalver, T. Bardouni // Applied Radiation and Isotopes. 2003. № 59. P. 159-164.
13. Ioannidou, A. Temporal changes of ^7Be and ^{210}Pb concentrations in surface air at temperate latitudes (40°N) / A. Ioannidou, M. Manolopoulou, C. Papastefanou // Applied Radiation and Isotopes. 2005. № 63. P. 277-284.
14. Kulan, A. Distribution of ^7Be in surface air of Europe / A. Kulan, A. Aldahan, G. Possnert, I. Vintersved // Atmospheric Environment. 2006. №40. P. 3855-3868.
15. Петрова, Т. Б. Содержание бериллия-7 в атмосферном воздухе г. Москвы / Т. Б. Петрова, С. Е. Охрименко, В. К. Власов, П. С. Микляев // АНРИ. – 2007. – № 2. – С. 29-35.
16. Бурева, Е. А. Содержание ^7Be в приземном слое воздуха г. Ростова-на-Дону / Е. А. Бурева, М. Г. Давыдов, Л. В. Зорина, В. С. Малышевский, В. В. Стасов // АНРИ. – 2007. – № 1. – С. 63-67.

REFERENCES

- [1] Timofeeva Yu.M., Shulgina E.M. Rossiyskiye issledovaniya v oblasti atmosfernoj radiatsii v 2003-2006 gg. [Russian Studies in the Field of Atmospheric Radiation in 2003-2006]. Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics of Atmosphere and Ocean]. 2009. T.45. No 2. P.193-208 (in Russian).
- [2] Timofeeva, Yu.M., Shulgina E.M. Rossiyskiye issledovaniya v oblasti atmosfernoj radiatsii v 2007-2010 gg. [Russian Studies in the Field of Atmospheric Radiation in 2007-2010]. Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics of Atmosphere and Ocean]. 2013. T.49. No 1. P.19-36 (in Russian).
- [3] Carvalho Fernando P. Origins and Concentrations of ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{210}Bi and ^{210}Po in the Surface Air at Lisbon, Portugal, at the Atlantic Edge of the European Continental Landmass // Atmospheric Environment. 1995. V.29. № 15. P.1809-1819.
- [4] Terzi L., Kalinowski M. World-Wide Seasonal Variation of ^7Be Related to Large-Scale Atmospheric Circulation Dynamics // Journal of Environmental Radioactivity 2017. V.178-179. P.1-15.
- [5] Buraeva E.A. [et al.] Soderzhaniye kosmogennogo ^7Be v prizemnom sloye vozdukha umerennykh shirot [The Content of Cosmogenic ^7Be in the Surface Layer of the Air of Temperate Latitudes]. Atomnaya energiya [Atomic Energy]. 2007. Vol.102, No 6. P. 370-374 (in Russian).
- [6] Hisao Nagoi, Wataru Tada, Takayuki Kobayashi. Production Rates of ^7Be and ^{10}Be in the Atmosphere // Nucl. Instr and Methods in Phys. Res. 2001. V.172B. P.796-801.
- [7] Usoskin I.G., Kovaltsov G.A. Production of Cosmogenic ^7Be Isotope in the Atmosphere: Full 3-D Modeling // J. Geophys. Res. 2008. V.113(D12). P.D12107(1-12).
- [8] Bezuglov M.V. Fotoyadernyy kanal obrazovaniya kosmogennogo ^7Be v atmosfere Zemli [Photo-Nuclear Channel of Cosmogenic ^7Be Formation in the Earth Atmosphere]. Yadernaya fizika [Nuclear physics]. 2012. T.75. No 4. P.427-431 (in Russian).
- [9] Bezuglov M.V., Malyshevsky V.S., Fomin G.V., Torgovkin A.V., Shramenko B.I., Malykhina T.V. Photonuclear Production of Cosmogenic Beryllium-7 in the Earth Atmosphere// Physical Review C. 2012. V. 86. P024609 (1-12).
- [10] Koch D.M., Jacob D.J., Graustein W.C. Vertical Transport of Tropospheric Aerosols as Indicated by ^7Be and ^{210}Pb in Chemical Tracer Model // J. Geophys. Res. 1996. V.101. P.18651-18661.
- [11] Gerasopoulos E.A., P. Stohl, A. Zanis, C.S. Zerefos, C. Papastefanou, W. Ringer, L. Tobler, S. Hubener, H.W. Gaggeler, H.J. Kanter, L. Tositti, S. Sandrini Climatology of ^7Be at Four High-Altitude Stations at the Alps and the Northern Apennines // Atmospheric Environment. 2001. No 35. P. 6347-6360.

- [12] Azahra M., Camacho-Garcia A., Gonzalez-Gomez C., Lopez-Penalver J.J., Bardouni T. Seasonal ^7Be Concentrations in Near-Surface Air of Granada (Spain) in the Period 1993-2001 // Applied Radiation and Isotopes. 2003. No 59. P. 159-164.
- [13] Ioannidou A., Manolopoulou M., Papastefanou C. Temporal Changes of ^7Be and ^{210}Pb Concentrations in Surface Air at Temperate Latitudes (40°N) // Applied Radiation and Isotopes. 2005. № 63. P. 277-284.
- [14] Kulan, A. Distribution of ^7Be in Surface Air of Europe / A. Kulan, A. Aldahan, G. Possnert, I. Vintersved // Atmospheric Environmen. 2006. № 40. P. 3855-3868.
- [15] Petrova T.B., Okhrimenko S.E., Vlasov V.K., Miklyayev P.S. Soderzhaniye berilliya-7 v atmosfernom vozdukhe g. Moskv [The Content of Beryllium-7 in the Atmospheric Air of Moscow]. ANRI. 2007. No 2. P. 29-35 (in Russian).
- [16] Buraeva E.A., Davydov M.G., Zorina L.V., Malyshevsky V.S., Stasov V.V. Soderzhaniye ^7Be v prizemnom sloye vozdukha g. Rostova-na-Donu [Content of ^7Be in the Surface Layer of Air in Rostov-on-Don]. ANRI. 2007. No 1. P. 63-67 (in Russian).

Cosmogenic Beryllium-7 in the Earth Atmosphere

E.A. Buraeva ^{*1}, V.S. Malyshevsky ^{**2}, V.I. Ratushny ^{**3}

^{*}*Southern Federal University, Sorge st., 5, Rostov-on-Don, Russia 344090*

^{**}*Volgodonsk Engineering-Technical Institute – Branch of NRNU «MEPhI», Lenina street, 73/94, Volgodonsk, Russia 347360*

¹*ORCID: 0000-0002-8474-3746*

WoS ResearcherID:

e-mail: buraeva@sfedu.ru

²*ORCID: 0000-0003-4538-5496*

e-mail: vsmalyshtvsky@sfedu.ru

³*ORCID: 0000-0002-5701-6279*

e-mail: viratush@mail.ru

Abstract – ^7Be isotope is one of the few radionuclides, the content of which in the atmosphere does not depend on anthropogenic factors. Consequently, it can also be used as a monitor to identify sources of technogenic radionuclides entering the atmosphere such as emergency situations at radiation hazardous, chemically hazardous facilities. The article presents the results of monitoring the content of the ^7Be radioactive isotope in the surface atmosphere in the Rostov region for a ten-year period from 2001 to 2011, covering the second half of the 23rd and the first half of the 24th solar cycles. The data obtained confirm the inverse dependence of the average annual volumetric activity of ^7Be cosmogenic on solar activity. The observational data allowed for the first time to carry out a comprehensive study and to reveal correlations between the volumetric activity of ^7Be cosmogenic with the main meteorological parameters such as: air temperature, wind speed, precipitation, relative humidity and atmospheric pressure.

Keywords: atmospheric radioactivity, surface air layer, cosmogenic radionuclides, ^7Be , activity, atmospheric aerosols.