

УДК 546.45:551.510:551.521.6

ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ ^7Be В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ

Т.Б. Петрова, П.С. Микляев¹, В.К. Власов, А.М. Афиногенов, О.В. Кирюхин(кафедра радиохимии; e-mail: afin63@radio.chem.msu.ru; ¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН)

В статье приведены и обсуждаются данные измерений объемной активности ^7Be в приземном слое атмосферы, проводимые на средних широтах в течение 5,5 лет. Исследования позволили определить, что ход изменения объемной активности (ОА) ^7Be во времени является суперпозицией и взаимодействием трех видов колебаний: короткопериодных нерегулярных, обусловленных влиянием метеорологических факторов; сезонных колебаний, связанных с поступлением ^7Be из стратосферы в тропосферу, и многолетних, определяющихся изменением потока галактических космических лучей.

Ключевые слова: бериллий-7, атмосфера, объемная активность, космические лучи, солнечная активность, аэрозоли.

Радионуклид космогенного происхождения ^7Be – компонент естественного радиационного фона. Очевидно, что естественный радиационный фон является “точкой отсчета” при оценке антропогенной нагрузки. Так, в отчете Научного комитета ООН по действию атомной радиации, представленном Генеральной Ассамблее, уровни профессионального облучения, наибольшие годовые дозы, полученные после аварии на ЧАЭС, и т.д. сравниваются с фоновыми уровнями.

Образование ^7Be в атмосфере Земли происходит в результате ядерных реакций при взаимодействии протонов и нейтронов галактических космических лучей (ГКЛ) с ^{14}N и ^{16}O атмосферы. Преобладающие реакции образования ^7Be следующие: $^{14}\text{N}(p, 4p4n)^7\text{Be}$; $^{16}\text{O}(p, 5p5n)^7\text{Be}$. Тип радиоактивного превращения ^7Be – двойной K -захват, конечный продукт – стабильный ^7Li . Период полураспада 53,3 сут. До 80% ^7Be образуется в стратосфере [1–3].

В литературе имеются следующие данные по вариациям содержания ^7Be в природе: в приземном слое атмосферы диапазон изменения объемной активности 0,08 – 30 мБк/м³; в среднем – 3 мБк/м³ [1, 2, 4]; в гидросфере в среднем – 0,7 мБк/м³ [1]; в дождевой воде: 0,2 – 4,1 Бк/л [4, 5]; скорость выпадения из атмосферы на земную поверхность: 1,2 – 21,1 Бк/м²·сут или 28,8 – 506,4 Бк/м²·месяц, 854–1242 Бк/м²·год [4, 6, 7]. Для сравнения скорость выпадения естественного ^{210}Pb – 49 Бк/м²·месяц. Выпадения техногенных радионуклидов составляют:

^{137}Cs – 0,04 Бк/м²·мес, ^{90}Sr – 0,02 Бк/м²·мес, ^3H – 110 Бк/м²·мес [7].

Методы измерения

Измерения объемной активности ^7Be проводили в течение 5,5 лет в ЦГСЭН (Москва). Воздухозаборное устройство было расположено в чердачном помещении административного здания на высоте около 50 м. Воздух прокачивали в течение трех суток еженедельно через фильтры Петрянова-Соколова рабочей площадью 2205 см². Объем прокаченного воздуха за один цикл составлял около 30 000 м³. Объемную активность (ОА) ^7Be измеряли на спектрометре гамма-излучения “SILENA” (HPGD, относительная эффективность регистрации 25%). Относительная погрешность измерений не превышала 15%. Результаты измерений приводились к дате съема фильтра.

Результаты исследований

График изменения объемной активности ^7Be в приземной атмосфере (Москва) в период с 1996 по 2001 г. приведен на рис. 1.

Содержание ^7Be в атмосфере зависит от многих параметров [8]: 1) скорости генерирования ^7Be в стратосфере (резервуар “S”) и в тропосфере (резервуар “T”) флюенсом спектральных распределений протонов и нейтронов в области энергий от 10 МэВ за среднее время жизни ^7Be в соответствующем

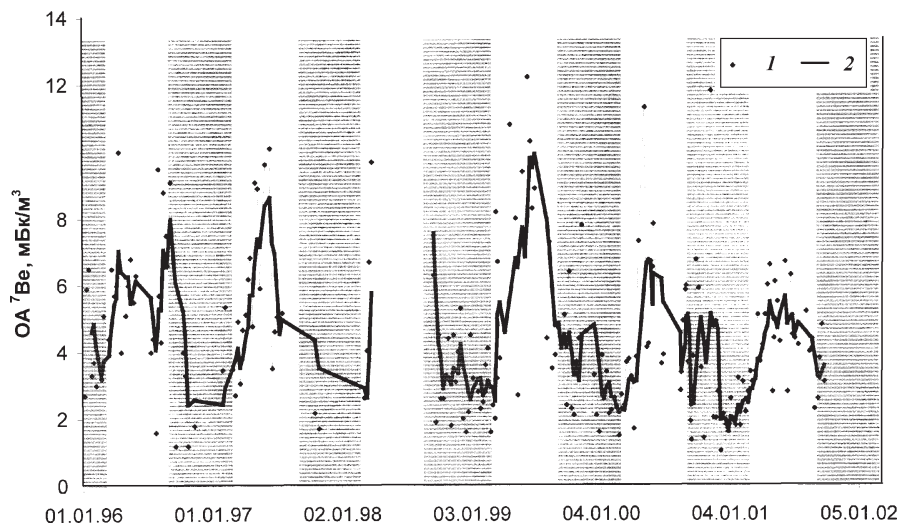


Рис. 1. Колебания объемной активности ⁷Ве в приземной атмосфере (Москва) в период с 1996 по 2001 гг.: 1 – ⁷Ве, 2 – 4-линейный фильтр ⁷Ве

резервуаре; 2) сорбции ⁷Ве на аэрозолях; 3) обмена между резервуарами “S” и “Т”; 4) вымывания и сухого осаждения аэрозоля, содержащего ⁷Ве из тропосферы. Все вышеперечисленные параметры, зависящие от локальных метеорологических условий в месте отбора пробы и сезона, схематически представлены в табл. 1.

Рассмотрим подробнее каждый из факторов, влияющих на изменения ОА ⁷Ве.

Галактические космические лучи

По данным [2, 3] в стратосфере содержится 70–80% атмосферного ⁷Ве, скорость образования которого составляет 0,041 ат/см²·с), в тропосфере содержится 20–30% (скорость образования 0,027 ат/см²·с). Изменение содержания ⁷Ве в стратосфере определяется изменением потока ГКЛ, величина которого определяется активностью солнца, геомагнитной широтой и высотой над уровнем моря. Изменение потока

ГКЛ обратно пропорционально количеству солнечных пятен, характеризующих солнечную активность (11-летние циклы). При высокой солнечной активности поток галактических лучей минимален, содержание ⁷Ве в стратосфере уменьшается. При низкой солнечной активности содержание ⁷Ве увеличивается [8, 9]. Время жизни ⁷Ве в стратосфере составляет от одного до полутора лет [3, 10] и определяется двумя независимыми процессами – радиоактивным распадом и выносом ⁷Ве в резервуар “Т”. В тропосфере интенсивность ГКЛ сказывается на содержании ⁷Ве значительно слабее. Распределение концентрации ⁷Ве здесь определяется такими факторами, как поступление ⁷Ве из стратосферы, перемещение воздушных масс и вымывание аэрозолей-носителей ⁷Ве. Так как ионы существуют лишь несколько минут в относительно чистом и несколько секунд в загрязненном воздухе, после чего захватываются атмосферными аэрозолями, процессы удаления и миграции радионук-

Таблица 1

Факторы, определяющие концентрацию ⁷Ве в атмосфере

Космические факторы		Атмосферные факторы	
регулярные	нерегулярные	регулярные	нерегулярные
поток галактических космических лучей (ГКЛ)	поток протонов от Солнца при солнечных протонных событиях	стратосферно-тропосферный обмен	метеофакторы, определяющие поведение аэрозолей-носителей в приземной атмосфере

Т а б л и ц а 2

Средние значения объемной активности ${}^7\text{Be}$ в приземном воздухе по сезонам и годам

Год	Среднее значение ОА ${}^7\text{Be}$, мБк/м ³				
	зима	весна	лето	осень	год
1996	4,2±1,5	6,2±1,6	5,3±2,5	3,5±3,0	4,8±1,2
1997	4,1±1,1	6,0±2,3	5,6 ±2,3	2,0±1,7	4,4±1,8
1998	3,1±1,7	5,8±3,1	–	3,5±1,6	4,3±1,5
1999	2,7±0,8	5,6 ±3,1	7,3±3,0	4,3±1,8	5,0±2,0
2000	2,3±0,8	5,0±2,6	4,1± 1,1	4,0±2,7	3,9±1,1
2001	2,4±0,6	4,6±1,2	4,5±1,4	3,6±1,0	3,8±1,0
Среднее значение	3,2±0,9	5,5±0,6	5,4±1,2	3,5±0,8	4,4±0,5

лидов идентичны процессам удаления и миграции соответствующих аэрозолей [2]. Время жизни ${}^7\text{Be}$ в тропосфере составляет 24–30 дней [3, 10].

В табл. 2 представлены средние значения ОА ${}^7\text{Be}$ в приземном воздухе Москвы за 5 лет. Как видно из табл. 2, среднегодовые колебания содержания ${}^7\text{Be}$ в приземном воздухе на средних широтах незначительны и не имеют выраженного тренда, что подтверждается литературными данными [2, 3]. Определить 11-летний тренд в изменении среднегодовых значений ОА ${}^7\text{Be}$ возможно либо при более существенном изменении потока ГКЛ, продуцирующих ${}^7\text{Be}$, либо при условии, что метеофакторы в данной точке измерений носят регулярный характер.

Сопоставление результатов измерения объемной активности ${}^7\text{Be}$ с датами солнечных протонных событий (данные Ю.И. Стожкова [8, 9]) показывает, что на объемную активность ${}^7\text{Be}$ в приземной атмосфере практически не влияют солнечные вспышки. Из 9 протонных солнечных событий, зарегистрированных за период с 1998 по 2001 г., лишь одному наиболее мощному событию (09.11.2000 г. поток протонов от Солнца составил более 14800 частиц/см²·с·ср) соответствует резкое (на порядок) увеличение ОА ${}^7\text{Be}$ в приземной атмосфере. Влияние менее мощных солнечных протонных событий на концентрацию ${}^7\text{Be}$ в приземной атмосфере не зарегистрировано.

Стратосферно-тропосферный обмен

На рис. 1 хорошо прослеживается цикличность изменения ОА ${}^7\text{Be}$ в зависимости от сезона (сглаженная кривая). Весной и летом наблюдаются рост ОА ${}^7\text{Be}$, а осенью и зимой – уменьшение. Зимой регистрируются стабильно низкие концентрации ${}^7\text{Be}$. Сезонные колебания наблюдались и в Северном, и в Южном полушарии, т.е. это явление носит планетарный характер [2, 3, 11]. Максимальная амплитуда сезонных изменений ОА ${}^7\text{Be}$ “весна–осень” зарегистрирована в 1997 г., отношение максимального значения ОА ${}^7\text{Be}$ к минимальному составило 3.

Причиной весенних увеличений (всплесков) концентраций ${}^7\text{Be}$ в приземной атмосфере считают глубокие стратосферные вторжения [12].

Метеофакторы, определяющие поведение аэрозолей-носителей в приземной атмосфере

Вернемся к рис. 1. Наибольший размах значений концентрации ОА ${}^7\text{Be}$ наблюдается при разовых измерениях (в течение 72 ч) на протяжении года (1996–2001 гг.). Минимальные и максимальные значения ОА ${}^7\text{Be}$ приведены в табл. 3. Минимальное содержание ${}^7\text{Be}$, равное 1,0 мБк/м³, зарегистрировано 08.12.2000 г., максимальное – 12,2 мБк/м³ (09.06.1999 г.), т.е. амплитуда колебаний значений

Таблица 3

Минимальные и максимальные значения объемной активности ^7Be в атмосферном воздухе

Год	ОА ^7Be , мБк/м ³ (минимум)	Дата	ОА ^7Be , мБк/м ³ (максимум)	Дата	ОА ^7Be мБк/м ³ (максимальное/ минимальное)
1996	1,2±0,3	18.09	10,0±1,3	10.04	8,3
1997	1,7±0,2	28.10	10,1±0,9	11.06	5,9
1998	1,6±0,3	17.12	9,7±0,4	26.03	6,1
1999	1,6±0,3	25.02	12,2±0,1	09.06	7,6
2000	1,0±0,3	08.12	11,8±1,2 11,3±1,1	10.11* 06.05	11,8 11,3
2001	1,8±0,3	19.01	6,7±0,7	09.06	3,7

*09.11.2000 г. зарегистрировано мощное солнечное протонное событие.

ОА ^7Be составляет приблизительно порядок. По данным [2], содержание ^7Be в сухих выпадениях составляет всего 5–8% от общего количества выпадений. В работе [11] установлено высокое содержание ^7Be (относительно ^{32}P) в водорастворимой фракции, что обуславливает селективное вымывание ^7Be осадками. По-видимому, это служит одной из причин резких изменений содержания ^7Be в течение короткого времени в приземной атмосфере. Возможно, что резкое изменение содержания ^7Be связано с циркуляцией синоптического масштаба, циклоны–антициклоны с периодом от 1 до 7 дней и длиной волны 1000–3000 км [13], иногда эти крупномасштабные вихри (циклоны и антициклоны) перекрывают всю толщу атмосферы и нижнюю часть стратосферы. Скорее всего, происходит наложение перечисленных факторов. Таким образом, содержание ^7Be определяется временем и точкой пробоотбора, так как от этого зависит преобладание тех или иных метеорологических воздействий, влияющих на распределение концентрации ^7Be в приземном воздухе. Это наиболее существенные факторы, определяющие флуктуации ОА ^7Be .

Для того чтобы дифференцировать “стратосферную” и “приземную” составляющие аэрозолей-носителей ^7Be , одновременно с измерениями содержания ^7Be проводили измерения содержания ^{212}Pb , до-

черного продукта распада (ДПР) торона, сопоставимое с содержанием ^7Be (рис. 2). Радионуклид ^{212}Pb , входящий в ряд распада ^{232}Th , поступает в атмосферу за счет эксхалации торона (^{220}Rn) из горных пород и почв. Он захватывается атмосферными аэрозолями и перемещается вместе с ними. В годовом цикле можно выделить несколько периодов, для которых соотношение космогенного ^7Be и “земного” ^{212}Pb в приземном слое атмосферы имеет разные значения (табл. 4).

В весенний период корреляция между ^7Be и ^{212}Pb отсутствует. Концентрация ^7Be плавно увеличивается с марта по июль, в то время как концентрация ^{212}Pb до конца апреля – начала мая остается на уровне зимнего времени, а затем, в первых числах мая, наблюдается резкий экстремум, связанный со сходом снежного покрова и высыханием почвы. Таким образом, весенний рост концентрации ^7Be не связан с состоянием приземного слоя атмосферы, а определяется, скорее всего, поступлением ^7Be со стратосферными воздушными массами.

В летне-осенний период между концентрациями ^7Be и ^{212}Pb наблюдается тесная корреляция. Концентрации ^7Be и ^{212}Pb определяются поведением аэрозолей-носителей, на которое влияют метеорологические факторы (скорость ветра, осадки и т.д.).

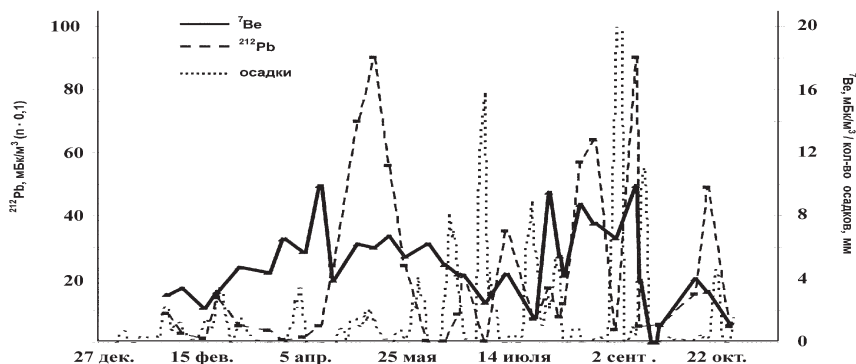


Рис. 2. Сопоставление объемной активности ^7Be и ^{212}Pb в приземной атмосфере в 1996 г.

К зиме концентрация ^7Be постепенно снижается. Таким образом, в летне-осенний период концентрация ^7Be и ^{212}Pb определяется поведением общих аэрозолей-носителей в приземном слое атмосферы.

В зимний период значения концентрации ^7Be и ^{212}Pb минимальны, колебания случайны, корреляционные связи не выявлены. Это обусловлено установлением снежного покрова и снижением концентраций аэрозолей в воздухе. В результате в этот период влияние “земных” факторов на концентрацию ^7Be крайне незначительно и проявляется “космическая” составляющая. Наблюдается высокая корреляция ($r = 0,99$) между среднезимними значениями

объемной активности ^7Be и среднегодовыми значениями потока ГКЛ (период с 1996 по 2000 гг. – восходящая ветвь 11-летнего цикла солнечной активности [8, 9]). Это крайне важное наблюдение, так как на средних широтах четкая связь среднегодовых концентраций ^7Be с интенсивностью ГКЛ отсутствует. Также не выявлена корреляция между потоком ГКЛ и концентрацией ^7Be в приземной атмосфере в другое время года (табл. 5). Таким образом, в зимний сезон среднее содержание ^7Be в приземном слое определяется интенсивностью ГКЛ.

В результате исследований выявлены три независимые причины изменения содержания ^7Be в атмос-

Таблица 4

Коэффициенты корреляции r между значениями объемной активности ^7Be и ^{212}Pb в 1996 г. (выделены значения $r > 0,7$)

Время года	Зима	Весна	Лето	Осень
r	-0,40	0,16	0,70	0,77

Таблица 5

Коэффициенты корреляции r между средними за сезон, а также среднегодовыми значениями объемной активности ^7Be в приземной атмосфере и среднегодовыми значениями потока ГКЛ в период с 1996 по 2000 гг.

Время года	Зима	Весна	Лето	Осень	Среднее за год
r	0,99	0,35	0,62	-0,6	0,46

фере: 1) изменение потока ГКЛ (периодические 11-летние циклы) – самая слабая регулярная составляющая колебаний ОА ^7Be (амплитуда $1,9 \text{ мБк/м}^3$); 2) поступление ^7Be с прорывами стратосферного воздуха в тропосферу (периодические сезонные коле-

бания) – сезонная составляющая (амплитуда $2,5\text{--}4,0 \text{ мБк/м}^3$); 3) изменение метеоусловий – наиболее существенная и нерегулярная составляющая, обуславливающая короткопериодные (3–5 сут) колебания концентрации ^7Be в приземной атмосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мусеев А.А., Иванов В.И. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. М., 1990.
2. Лянас В.Ю., Шонаускене Д.А., Зинкявичюс П.К. // Физ. атм. Вып. 8. Вильнюс, 1983. С. 150.
3. Nagai H., Tada W., Kobayashi T. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 2000. **172**. P. 796.
4. Papastefanou C., Joannidou A., Stoulos S. // Sci. Tot. Env. 1995. **170**. P. 151.
5. Ishikawa Y. et al. // Env. Radioact. 1995. **26**. P. 19.
6. Steinmann P., Billen T., Loizeau J.L., Dominik J. // Geochim. Cosmochim. Acta. 1996. **63**. N 11/12. P. 456.
7. Радиоактивное загрязнение территории СССР в 1986 г. Ежегодник. Обнинск, 1987.
8. Stozhkov Y.I., Svizevsky N.S., Makhmutov V.S., Svirzhevskaya A. K. Long term cosmic ray observations in the atmosphere. Proceedings of ICRC 2001: 3883 Copernicus Gressellschaft 2001.
9. Stozhkov Y.I., Svizevsky N.S., Makhmutov V.S. Cosmic ray measurements in the atmosphere. Preprint 8, Lebedev Physical Institute RAS. 2001
10. Koch D.M., Jacob D.J., Graustein W.C. // J. Geophys. Res. 1996. **101**. P. 18651.
11. Шонаускене Д.А. // Физ. атм. Вып. 3. Вильнюс, 1977. С. 153.
12. Шакина Н.П., Кузнецова И.Н., Иванова А.Р. // Метеорология и гидрология. 2000. **2**. С. 53.
13. Хромов С.П., Петросянуц М.А. Метеорология и климатология. М., 2001.

Поступила в редакцию 19.03.09

THE ^7Be CONTENT VARIATIONS IN A GROUND LAYER OF THE MIDDLE LATITUDE ATMOSPHERE

T.B. Petrova, P.S. Miklyuyev¹, V.K. Vlasov, A.M. Afinogenov, O.V. Kirjukhin

(Division of Radiochemistry; ¹Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS)

Data of measurements of volume activity ^7Be in a ground layer the atmospheres spent at average within 5,5 years are discussed. Researches have allowed to define, that the course of change of volumetric activity (OA) ^7Be in time is superposition and interaction of three kinds of fluctuations: the irregular fluctuations caused by influence of meteorological factors, seasonal fluctuations, connected with break ^7Be from a stratosphere in troposphere and the long-term fluctuations, defined change of a stream of galactic.

Key words: Berillium-7, atmosphere, volumetric activity, cosmic rays, solar activity, aerosol.

Сведения об авторах: Петрова Татьяна Борисовна – инженер кафедры радиохимии химического факультета МГУ (9393925); Микляев Петр Сергеевич – ст. науч. сотр. Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, канд. геол.-минерал. наук; Власов Вячеслав Клавдиевич – доцент кафедры радиохимии химического факультета МГУ, канд. хим. наук; Афиногенов Алексей Максимович – мл. науч. сотр. кафедры радиохимии химического факультета МГУ (afin63@radio.chem.msu.ru); Кирюхин Олег Владимирович – инженер кафедры радиохимии химического факультета МГУ.