

ОЦЕНКА ПОТОКА ^{7}Be С ВЛАЖНЫМИ АТМОСФЕРНЫМИ ВЫПАДЕНИЯМИ

Д.А. Кременчукский

Морской гидрофизический институт
НАН Украины,
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: d.kremenchutsky@gmail.com

Используя данные натурных наблюдений, была получена зависимость потока ^{7}Be на подстилающую поверхность от количества, частоты и вида выпадающих атмосферных осадков. Учтена внутригодовая изменчивость содержания ^{7}Be в атмосфере. Показано, что полученная зависимость корректно воспроизводит наблюдаемую вариацию влажного потока ^{7}Be в различных регионах.

Введение. Бериллий-7 (^{7}Be) – это радионуклид космогенного происхождения ($T_{1/2} = 53,3$ дня). В природе ^{7}Be образуется преимущественно в атмосфере. Первичный поток космический лучей (преимущественно протоны) имеют тенденцию путешествовать вдоль магнитного поля Земли и входить в атмосферу планеты преимущественно в районе магнитных полюсов. Эти протоны взаимодействуют с атомами в верхних слоях атмосферы и создают каскад вторичных космических лучей. Вторичные космические лучи представлены также потоком нейтронов. Образование ^{7}Be происходит в результате взаимодействия первичного и вторичного потока космических лучей с атомами кислорода, азота и углерода. Начальная энергия частиц космических лучей определяет как глубоко в атмосферу может проникнуть каскад вторичного потока космических лучей до того как частицы потеряет способность взаимодействовать с ядрами элементов, находящихся в атмосфере. Комбинация двух факторов: быстрого уменьшения потока низкоэнергетических нейтронов и увеличения плотности атмосферы (другими словами: увеличения концентрации ядер) с глубиной, приводит к пику концентрации ^{7}Be в средних широтах [Junge, 1963]. Это и

есть т.н. широтный эффект. Как следствие из вышеизложенного: в пределах близких широт образуется примерно одинаковое количество изотопа. На подстилающую поверхность бериллий поступает с сухими и влажными атмосферными выпадениями. Относительный вклад сухих выпадений в суммарный поток радионуклида за год, в целом, не превышает 10 – 15 % [1]. Из-за такого незначительного влияния его вкладом, обычно, пренебрегают. Согласно [1] на величину потока радионуклида с влажными выпадениями оказывают влияние четыре фактора: (i) количество, (ii) частота, (iii) вид выпадающих осадков и (iv) содержание ^{7}Be в атмосфере.

Авторы работы [2] указывают, что внутригодовой изменчивости концентрации ^{7}Be в атмосфере свойственна ярко выраженная сезонная зависимость. Согласно [3] образование новых атомов ^{7}Be является одним из основных факторов, компенсирующих его вымывание и радиоактивный распад.

Цель работы состояла в том, чтобы получить зависимость влажного потока ^{7}Be от количества выпадающих осадков с учетом их частоты, вида и внутригодовой изменчивости содержания радионуклида в атмосфере, используя результаты, представленные в доступной литературе и данные наблюдений. Оценить возможность использования полученной зависимости для оценки потока ^{7}Be на поверхность Черного моря.

Материалы и методы измерений. Обор проб влажных атмосферных выпадений проводился в эмалированную кювету, соединенную с пластиковой емкостью. Пробоотборник располагался на крыше здания главного корпуса МГИ НАНУ на м. Хрустальный. Отбирались индивидуальные интегральные пробы для каждого случая выпадения осадков. Преконцентрирование ^{7}Be в отобранных пробах проводилось с использованием осадительной методики [4]. Измерения проводились на низкофоновом гамма-спектрометре с сцинтиляционным детектором в МГИ НАНУ. Величина погрешности измерений, в целом, не превышала 20 %. Более подробно, методика изложена в [4].

В период с марта 2011 г. по август 2012 г. было отобрано и обработано 72 пробы дождевых осадков. Величина влажного потока ${}^7\text{Be}$ изменялась от 2,4 до 80 $\text{Бк}/\text{м}^2$, средняя величина 26,7 $\text{Бк}/\text{м}^2$. На рис. 1 представлены измеренные значения потоков ${}^7\text{Be}$ с влажными атмосферными выпадениями за период исследований.

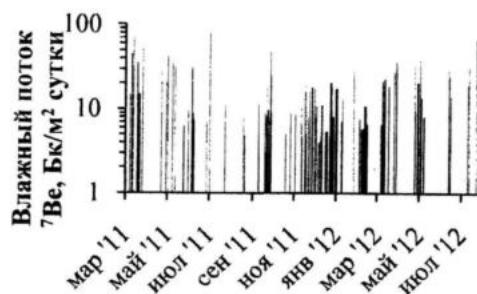


Рис. 1. Временная изменчивость влажного потока ${}^7\text{Be}$

Анализ и обсуждение полученных результатов. Для каждого сезона были получены зависимости потока радионуклида от количества выпадающих осадков (рис. 2). При этом, снежные осадки, наблюдаемые в марте, были включены в зимний сезон. При одинаковом количестве выпадающих осадков, максимальный поток радионуклида с ними наблюдается в весенне-летний период, характеризующийся максимальными величинами концентрации ${}^7\text{Be}$ в атмосфере. Минимальный поток наблюдается в осенний период, характеризующийся относительно пониженными величинами приземной концентрации бериллия и выпадением осадков в виде дождя. Зимний период характеризуется минимальными величинами содержания изотопа в атмосфере, но поток ${}^7\text{Be}$ характеризуется промежуточными величинами между весенне-летним и осенним периодом. Согласно [1] это связано с изменением вида осадков – выпадением снега. Использование этого формального разделения на сезоны позволяет, лишь в первом приближении, учесть внутригодовую изменчивость концентрации ${}^7\text{Be}$ в атмосфере и изменение вида осадков, а полученное уравнение аппроксимирующей степенной функции – количество выпадающих осадков.

Для того чтобы учесть влияние частоты выпадения осадков, можно воспользоваться результатами, представленными в работе [1]: после выпадения осадков, концентрация ${}^7\text{Be}$ в атмосфере восстанавливается в среднем за 2–3 дня, при этом за первый день восстанавливается примерно 70 % от его первоначального содержания. Можно предположить, что, в случае выпадения осадков через день, поток с ними будет на 30 % ниже, если же между случаями выпадения осадков проходит два и более дней, то величина потока ${}^7\text{Be}$ с этими осадками может быть непосредственно описана уравнениями, представленными на рис. 2.

В черноморском регионе информация о потоке ${}^7\text{Be}$ ограничена нашими измерениями. Для проверки полученных зависимостей и предположений, сформулированных выше, было выбрано две станции. Первая станция расположена в Бостоне, Массачусетс, США ($42^\circ 18'$ с.ш.) и находится на $2^\circ 12'$ севернее Севастополя. Согласно [5] это различие в расположении станций приводит к изменению величины скорости образования радионуклида на 8,2 %, что, в свою очередь, меньше ошибок, связанные как с определением величины приземной концентрации и ошибок, с которыми были получены исходные данные для параметризации потока. Таким образом, можно предположить, что содержание ${}^7\text{Be}$ в атмосфере Бостона существенным образом не отличается от наблюдаемого в севастопольском регионе, а различия в измеряемых величинах потока ${}^7\text{Be}$ с влажными атмосферными выпадениями обусловлены внутригодовым распределением количества, вида и частоты выпадения осадков.

В работе [6] были представлены суммарные за месяц величины влажного потока ${}^7\text{Be}$ и месячные суммы осадков за период с 2001 по 2003 гг. в Бостоне. Внутригодовое распределение осадков за указанный период имеет более сложный характер по сравнению с Севастополем. В Бостоне обильные осадки наблюдаются, фактически, во все сезоны года. В Севастополе теплые сезоны года характеризуются относительно пониженными осадками, по сравнению с холода-

ными. В среднем за месяц, в Бостоне выпадает 82 мм осадков, а в Севастополе – 28 мм. Данные о суммарных за сутки количествах осадков, представленные на сайте [7], суммировались в пределах каждого месяца и сравнивались с опубликованы в работе [6]. Анализ показал, что эти величины хорошо согласуются между собой. Используя данные о виде, суммарных за сутки количествах и внутригодовом распределении осадков, а также зависимости и предположения, сформулированные выше, были рассчитаны величины влажного потока ${}^7\text{Be}$ на каждый день. Всего было обработано 368 случаев выпадения осадков. Рассчитанные суточные величины влажного потока суммировались в пределах каждого месяца. На рис. 2 представлена

временная изменчивость рассчитанных и измеренных значений потока ${}^7\text{Be}$ в Бостоне за период с 2001 – 2003 гг.

Отметим, что приблизительно в 20 % случаев отклонение рассчитанных величин от измеренных превышало 20 % интервал, обусловленный погрешностью исходных данных, по которым были получены оценки. Только в 5 % случаев был получен неверный прогноз динамики изменения потока. Расхождение в оценках суммарной за год величины влажного потока с данными наблюдений не превышало 5 % (табл. 1).

Вторая станция расположена в Сан-Луисе, Аргентина ($33^{\circ} 30'$ ю.ш.). Указанный сайт находится в Южном полушарии.

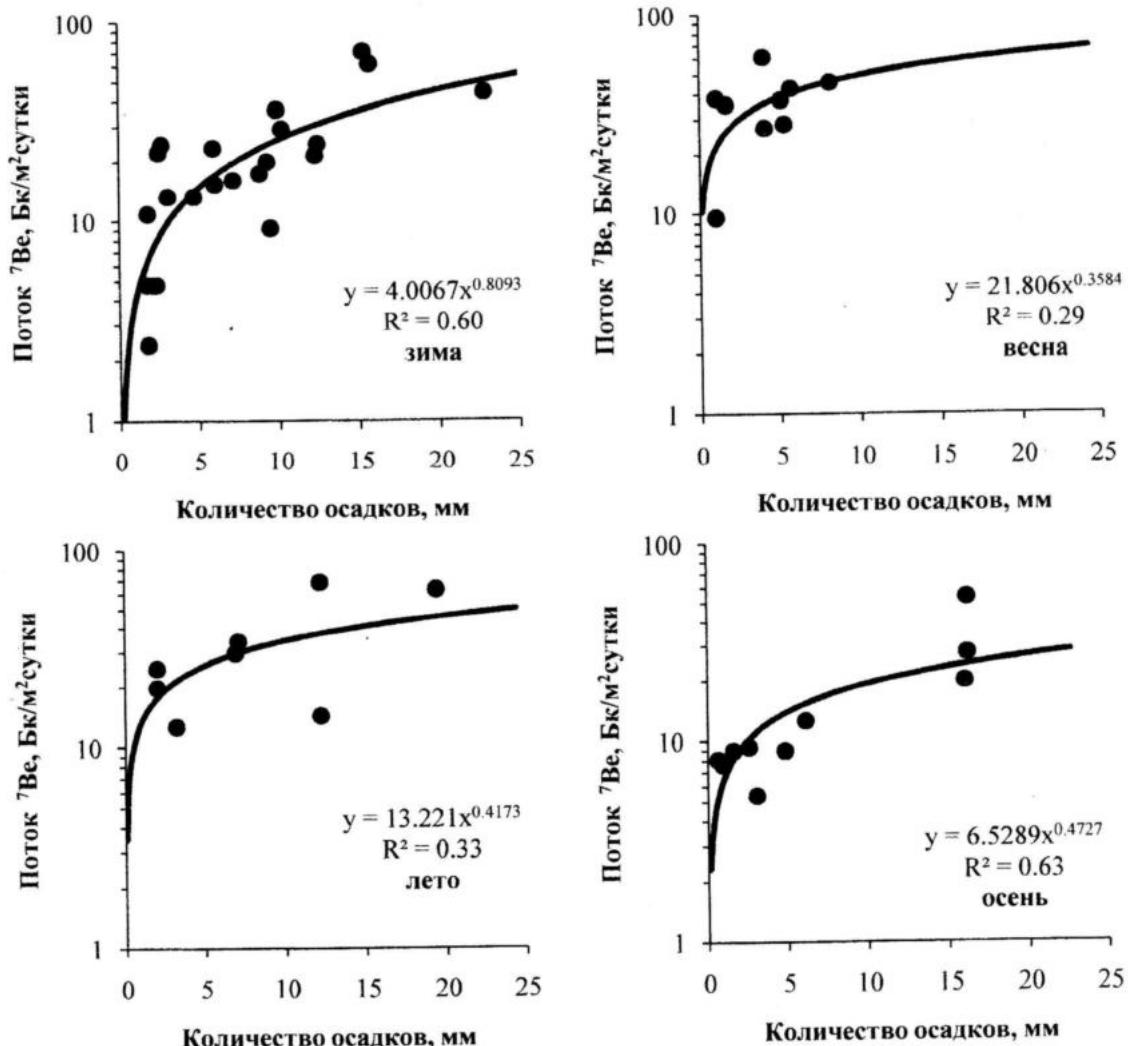


Рис. 2. Зависимость потока ${}^7\text{Be}$ от количества выпадающих осадков для различных сезонов года

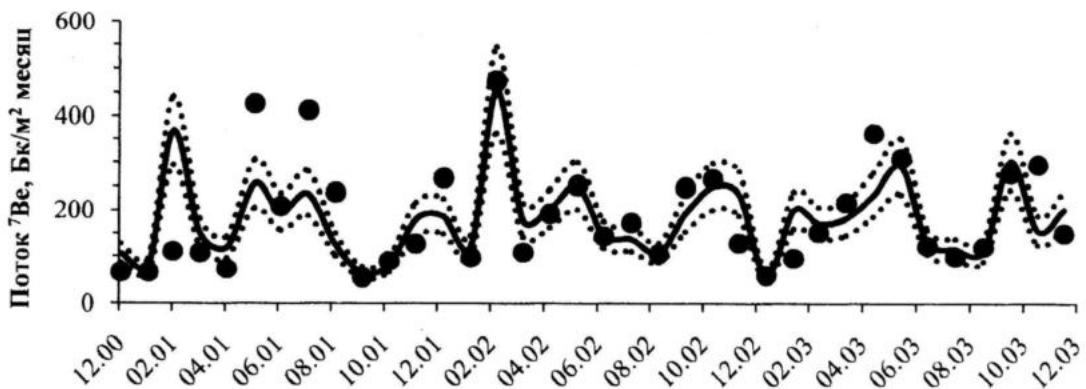


Рис. 3. Сопоставление рассчитанных величин потока ${}^7\text{Be}$ с данными натурных наблюдений.
Точки – измеренные величины потока, сплошная линия – рассчитанные значения,
пунктирная линия – 20 % интервал

Таблица 1

Данные о фактических и рассчитанных величин суммарного потока ${}^7\text{Be}$ в Бостоне и Сан-Луисе, а также информация о количестве выпадающих осадков

Годы	Количество осадков, мм	Число случаев выпадения осадков	Поток ${}^7\text{Be}$, $\text{Бк}/\text{м}^2 \text{год}$		Станция
			Фактический	Вычисленный	
2001	780	103	1981	1960	Бостон
2002	1043	126	2469	2471	
2003	1130	138	2282	2168	
2006	229	13	337	382	
2007	434	24	735	784	
2008	448	21	822	846	Сан-Луис

Автором работы [8] представлены результаты измерения концентрации ${}^7\text{Be}$ в приземной атмосфере, выполненные во время выполнения меридионального разреза вдоль Атлантического океана. Согласно полученным данным, содержание ${}^7\text{Be}$ в приземной атмосфере на широте, соответствующей местоположению Сан-Луиса, существенным образом не отличается от того, что наблюдается на широте, соответствующей местоположению Севастополя. Основываясь на выше изложенном, можно предположить, что, также как и для Бостона, различие в измеряемых величинах потока ${}^7\text{Be}$ с важными атмосферными выпадениями, обусловлены различиями во внутригодовом распределении вида, количества и частоты выпадения осадков.

В статье [9] были представленные данные о количестве выпадающих осадков, их внутригодовом распределении и потоке радионуклида в индивидуальных

пробах атмосферных выпадений. По данным, приведенным в [9], внутригодовое распределение осадков подобно тому, что характерно для севастопольского региона. В Сан-Луисе наблюдается относительно повышенное количество влажных атмосферных выпадений, по сравнению с севастопольским регионом. Среднее количество осадков, выпадающих за месяц в Сан-Луисе в рассматриваемый период равно 52 мм, в Севастополе – 28 мм. При оценке влажного потока использовалась информация о внутригодовом распределении суммарного за сутки количества осадков в Сан-Луисе. Был рассчитан поток ${}^7\text{Be}$ в каждом случае выпадения осадков.

На рис. 4 представлены рассчитанные и измеренные величины потока ${}^7\text{Be}$ в индивидуальных пробах осадков. Согласно полученным результатам, в более чем в 85 % случаев, отклонение рассчитанных величин от измеренных не пре-

вышало погрешностей измерений. Используя рассчитанные и измеренные величины потока, был вычислен суммарный за год влажный поток бериллия. Результаты представлены в табл. 1. Отклонение рассчитанных от измеренных величин не превышало 12 %.

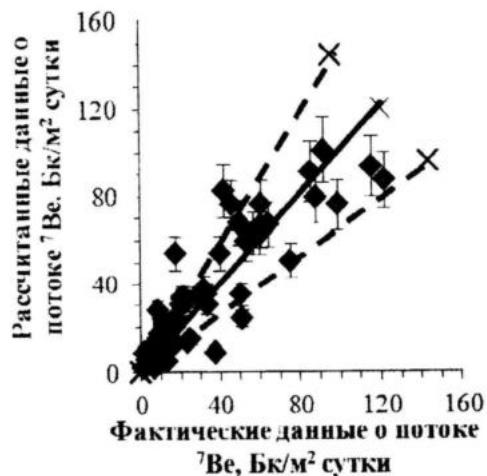


Рис. 4. Сопоставление измеренных и рассчитанных величин потока ^{7}Be с дождевыми осадками.
Пунктирная линия – 20 % интервал

Расстояние от Севастополя до южной границы Черного моря составляет $3^{\circ}30'$, а до северной – 2° . Согласно [5] за эти $3^{\circ}30'$ величина скорости образования изменяется всего на 13 %. На примере станции в Бостоне было показано, что $2^{\circ}12'$ разницы в расположении между ним и Севастополем не оказывает существенное влияние при оценки величины влажного потока.

Заключение. Используя литературные данные и результаты натурных наблюдений, были получены зависимости потока ^{7}Be на подстилающую поверхность от количества осадков с учетом внутригодовой и широтной изменчивости, а также скорости восстановления концентрации ^{7}Be в атмосфере. Было показано, что представленные зависимости, в целом, корректно описывают вариацию влажного потока ^{7}Be даже в тех случаях, когда внутригодовое распределение количества и частоты выпадения осадков существенным образом отличается от наблюдавшего в севастопольском регионе.

С учетом вышеизложенного, можно предположить, что уравнения, полученные в работе, применимы для оценки содержания ^{7}Be во влажных атмосферных осадках, выпадающих на поверхность Черного моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Series: Advances in Isotope Geochemistry*. Baskaran, Mark (Ed.). – Springer. – 2011. – 951 p.
2. *Feely H.W., Larsen R.J., Sanderson C.G. Factors that cause seasonal variations in beryllium-7 concentrations in surface air // J. Environ. Radioactivity.* – 1989. – Vol. 9. – P. 223 – 249.
3. *Brost R.A., Feichter J., Heimann M. Three-dimensional simulation of ^{7}Be in a global climate model // Journal of Geophysical Research.* – 1991. – V. 96 – No. D12. – P. 22423 – 22445.
4. Кременчук Д.А., Батраков Г.Ф., Семёнов В.В. ^{7}Be в прибрежной зоне черного моря // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. – Вып. 16. – С. 251 – 257.
5. *Usoskin I.G., Kovaltsov G.A. Production of cosmogenic ^{7}Be isotope in the atmosphere // Full 3-D modeling. J. of geophysical research.* – 2008. – Vol. – 113. – D12107.
6. *Zhu J., Olsen C.R. Beryllium-7 atmospheric deposition and sediment inventories in the Neponset River estuary, Massachusetts, USA // Journal of Environmental Radioactivity* – 2009. – Vol. – 100. – P. 192 – 197.
7. <http://pogoda.ru.net>
8. Лавренчик В.Н. Глобальное распределение концентрации ^{7}Be в приземном воздухе // Исследование процессов самоочищения атмосферы от радиоактивных изотопов. – Вильнюс: Минтис. – 1968. – С. 277 – 281.
9. *Ayub J.J., Gregorio D.E., Velasco H., et al. Short-term seasonal variability in ^{7}Be wet deposition in a semiarid ecosystem of central Argentina // Journal of Environmental Radioactivity.* – 2009. – Vol. – 100. – P. 977 – 981.