

## К вопросу образования радиоактивного углерода в стратосфере под действием космических нейтронов

*Из всех природных элементов таблицы Менделеева углероду принадлежит особая роль — он составляет структурную основу органических соединений, в том числе входящих в состав живых организмов. Скорость образования радиоуглерода зависит от плотности потока нейтронов, энергии нейтронов и времени облучения. Линейная зависимость числа ядер  $^{14}\text{C}$ , образованного из  $^{14}\text{N}$ , подтверждается уравнением баланса.*

*Ключевые слова:* нуклид, радионуклид, радиоизотоп, радиоуглерод, плотность потока, энергия нейтрона, излучение.

П. А. Пономаренко, М. О. Фролова

### До питання утворення радіоактивного вуглецю в стратосфері під впливом космічних нейтронів

*З усіх природних елементів таблиці Менделєєва вуглецю належить особлива роль — він складає структурну основу органічних сполук, охоплюючи й ті, які входять до складу живих організмів. Швидкість утворення радіовуглецю залежить від щільності потоку нейтронів, енергії нейтронів і часу опромінення. Лінійна залежність числа ядер  $^{14}\text{C}$ , утвореного з  $^{14}\text{N}$ , підтверджується рівнянням балансу.*

*Ключові слова:* нуклід, радіонуклід, радіоізотоп, радіовуглець, щільність потоку, енергія нейтрона, випромінювання.

© П. А. Пономаренко, М. А. Фролова, 2010

Радиоактивный нуклид углерода образуется, главным образом, при взаимодействии вторичных нейтронов космического излучения с ядрами азота в верхних слоях атмосферы по реакции  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ . Роль других реакций, таких как  $^{15}\text{N}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}(p, 3p)^{14}\text{C}$ ,  $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$ , в образовании углерода-14 незначительна из-за малых сечений взаимодействия и низкого содержания ядер этих изотопов в естественной смеси элементов [2].

Радиоуглерод, окисленный в стратосфере до  $^{14}\text{CO}_2$ , проникает в тропосферу и в результате перемешивания воздушных масс беспрепятственно распространяется по всему Земному шару, включаясь в природный круговорот углерода. На земле  $^{14}\text{C}$  накапливается в растениях за счет фотосинтеза, а затем по пищевым цепочкам поступает в организмы животных и, в составе продуктов питания, — в организмы людей. Участвуя в обменных процессах вместе со стабильным углеродом,  $^{14}\text{C}$  проникает во все органы, ткани и молекулярные структуры живых организмов. В отдельных случаях радиоактивный углерод может быть в 10–20 раз более опасным в генетических поражениях, чем эквивалентное энергетическое внешнее облучение. Обусловлено это тем, что, кроме чисто радиационного воздействия  $\beta$ -частиц  $^{14}\text{C}$  на биологические системы, не отличающегося по своему принципу от действия внешних источников рентгеновского и высокоэнергетического  $\beta$ -излучений, имеют место трансмутационные повреждения, приводящие к изменению химического строения молекулы ДНК [4]. Вот почему так важно знать скорость образования  $^{14}\text{C}$ .

Для протекания указанных реакций образования  $^{14}\text{C}$  необходимо наличие тепловых нейтронов космического происхождения. Эти нейтроны порождаются благодаря космическим лучам, проходящим через атмосферу Земли. Плотность потока нейтронов изменяется с высотой в атмосфере. Результаты измерения плотности этого потока с помощью шаров-зондов изображены на рис. 1, а.

Максимальное количество нейтронов находится на высоте примерно 12 км. Вблизи же поверхности Земли плотность потока нейтронов уменьшается до нуля. Таким образом, можно сказать, что:

1) нейтроны возникают в атмосфере, в области стратосферы, т. е. представляют собой вторичные частицы космического излучения, возникающие при прохождении первичных космических лучей через атмосферу;

2) все нейтроны быстро вступают в ядерные реакции, так что до поверхности Земли доходит лишь ничтожное их количество.

Целью статьи является определение образования радиоуглерода в стратосфере под действием космических нейтронов тепловых энергий путем взаимодействия их с ядрами азота. При этом ставятся следующие задачи:

1. Рассмотреть реакции образования  $^{14}\text{C}$  под действием тепловых нейтронов космического происхождения.

2. Составить физические и математические модели реакций.

3. Определить параметры моделей.

4. С помощью математических моделей определить количественно образование  $^{14}\text{C}$  в стратосфере.

5. По уравнению баланса определить стационарную концентрацию  $^{14}\text{C}$  на географической широте г. Севастополя.

Изучение нейтронов в атмосфере началось вскоре после их открытия Чедвиком в 1932 г. В многочисленных экспериментах, проводившихся различными исследователями (С. Монтгомери и Д. Монтгомери, Н. М. Лятовская и Г. В. Горшков, Юан и Ладенбург, Хеймс и Корфф),

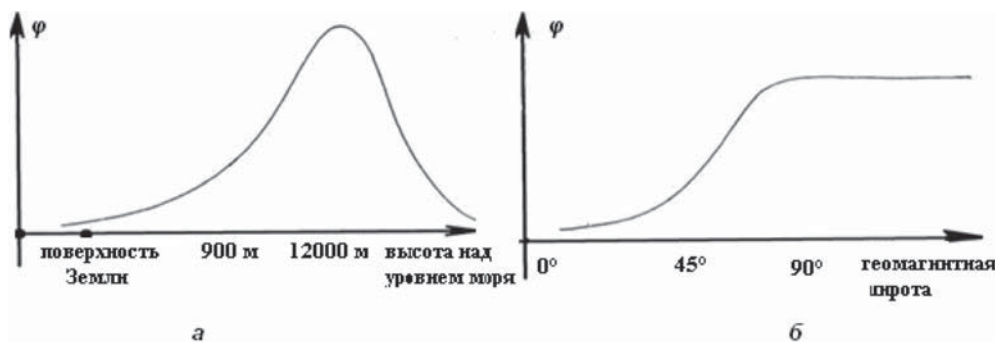


Рис. 1. Зависимость плотности потока тепловых нейтронов ( $\varphi$ ) от высоты над уровнем моря (а) и геомагнитной широты (б)

измерялась плотность потока тепловых нейтронов на уровне моря. Данные слишком разнились, так как эксперименты проводились в разное время суток и в разные сезоны года. Но при этом в источниках не указывается энергия нейтронов [1].

Исходя из последних опубликованных данных [1], приемом за достоверное значение плотности потока нейтронов  $2 \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ . Это же значение подтверждено профессором СНУЯЭиП Филипповым Е. М. [7] в представленном им распределении плотности потока тепловых нейтронов вблизи водной поверхности и в воде различной солености для геомагнитной северной широты  $44^\circ$  (г. Севастополь).

Для решения поставленных задач необходимо обозначить место образования космических нейтронов. Известно, что нейтроны возникают в атмосфере, в области стратосферы при прохождении первичных космических лучей через атмосферу [1]. Суммарная масса воздуха атмосферы составляет  $5,15 \cdot 10^{15} \text{ т}$ , на долю стратосферы приходится около 20 % массы атмосферы, т. е.  $1,03 \cdot 10^{15} \text{ т}$  [3]–[6]. Определив начальное число ядер азота-14 в стратосфере, можно вычислить скорость образования углерода-14 в зависимости от геомагнитной широты.

Физическая модель процесса имеет вид

$${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n}_T \xrightarrow{\sigma_{\text{т.н.}}} {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{p} + {}^{14}_6\text{C}.$$

Математическая модель процесса:

$$\begin{cases} \frac{dN_{\text{N-14}}}{dt} = -\sigma_a^{\text{N-14}} \cdot N_{\text{N-14}} \cdot \varphi, \\ \frac{dN_{\text{C-14}}}{dt} = -\sigma_a^{\text{N-14}} \cdot N_{\text{N-14}} \cdot \varphi - \lambda_{\text{C-14}} \cdot N_{\text{C-14}} - \sigma_a^{\text{C-14}} \cdot \varphi. \end{cases}$$

Если решить математическую модель при начальных условиях

$$\begin{aligned} t = 0, N_{\text{N-14}} &= N_{0\text{N-14}}, N_{\text{C-14}} = 0; \\ t = t, N_{\text{N-14}} &= N_{\text{N-14}}(t), N_{\text{C-14}} = N_{\text{C-14}}(t), \end{aligned}$$

получим

$$\begin{cases} N_{\text{N-14}}(t) = N_{0\text{N-14}} \cdot e^{-\varphi \sigma_a^{\text{N-14}} \cdot t}, \\ N_{\text{C-14}} = \frac{\sigma_a^{\text{N-14}} \cdot N_{0\text{N-14}} \cdot \varphi}{\lambda_{\text{C-14}} - \varphi \cdot \sigma_a^{\text{N-14}} + \varphi \cdot \sigma_a^{\text{C-14}}} \cdot \left( e^{-\varphi \sigma_a^{\text{N-14}} \cdot t} - e^{-\lambda_{\text{C-14}} \cdot t} \right), \end{cases}$$

где  $N_0$  — начальное число ядер;  $\varphi$  — плотность потока нейтронов,  $\text{н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $\sigma_a$  — микросечение активации,  $\text{см}^2$ ;  $\lambda$  — постоянная распада радионуклида,  $\text{с}^{-1}$ ;  $t$  — время облучения, с.

Для решения использовались следующие данные: начальное число ядер азота —  $3,346 \cdot 10^{42}$ ; постоянная распада углерода-14 —  $3,95 \cdot 10^{-12} \text{ с}^{-1}$ ; микросечение азота —  $\sigma_{\text{N}} = 1,75 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ ;

микросечение углерода-14 —  $\sigma_{\text{C}} = 50 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ ; плотности потока космических нейтронов —  $\varphi = 1; 2; 8; 23 \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ .

Подставив указанные значения в систему уравнений, получим, что при  $\varphi = 1 \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  за сутки образуется  $5,058 \cdot 10^{23}$  ядер радиоуглерода, при  $\varphi = 2 \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  —  $1,012 \cdot 10^{24}$  ядер радиоуглерода, при  $\varphi = 8 \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  —  $4,047 \cdot 10^{24}$  и при  $\varphi = 23 \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  —  $1,163 \cdot 10^{25}$  ядер радиоуглерода.

В соответствии с математической моделью скорость образования радиоуглерода на широте г. Севастополе равна  $1,171 \cdot 10^{19}$  ядер  ${}^{14}\text{C}$  в секунду.

При решении уравнения баланса получим, что стационарная концентрация радиоуглерода по Земному шару неравномерна и зависит от плотности потока тепловых нейтронов, диффузии, розы ветров и других факторов, но стремится к равновесной концентрации.

Решив уравнение баланса для г. Севастополя, получим, что стационарная концентрация  ${}^{14}\text{C}$  равна  $2,96 \cdot 10^{30}$  ядер.

## Выводы

Процесс образования радиоуглерода в стратосфере по всему Земному шару неравномерен и прямо пропорционально зависит от плотности потока тепловых нейтронов: при плотности потока нейтронов  $1 \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  образуется  $5,058 \cdot 10^{23}$  ядер, а при плотности потока  $23 \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  —  $1,163 \cdot 10^{25}$  ядер.

На эту зависимость указывает и уравнение баланса — стационарная концентрация радиоуглерода по земной поверхности неодинакова и зависит от ряда факторов, основной из которых — плотность потока нейтронов.

## Список литературы

1. Носовский Г. В. Методы статистического анализа исторических текстов (приложения к хронологии): Гл. 16.2. / Г. В. Носовский, А. Т. Фоменко. — М., 1999.
2. Василенко И. Я. Радиоактивный углерод / И. Я. Василенко, В. А. Осипов, В. П. Рублевский // Природа. — 1992. — № 12. — С. 59–65.
3. Мак-Ивен М. Химия атмосферы / М. Мак-Ивен, Л. Филипп. — М., 1978.
4. Рублевский В. П. Радиоактивный углерод в биосфере / В. П. Рублевский, С. П. Голенецкий, Г. Кирдин. — М.: Атомиздат, 1972. — 172 с.
5. Соколов В. А. Геохимия природных газов / В. А. Соколов. — М., 1971.
6. Химик, сайт о химии. Химическая энциклопедия [Электронный ресурс]. — <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/397.html>.
7. Филиппов Е. М. Возможности использования нейтронов космического фонда для изучения солесодержания морских вод // Атомная энергия. — 1984. — Т. 56.

Надійшла до редакції 21.02.2010.