

УДК 539.9; 551.594

DOI: 10.53403/9785951504937_2020_25.1_274_289

Наработка радиоуглерода грозами

Л. П. Бабич

В связи с усилением потока нейтронов во время гроз выполнен анализ вклада грозовых нейтронов в наработку атмосферного радиоуглерода. Оценки флюенса грозовых нейтронов на один электромагнитный импульс молнии в областях с сильной грозовой активностью, обеспечивающего локальную скорость наработки радиоуглерода, сопоставимую с наблюдательными данными, согласуются с измеренными значениями флюенса грозовых нейтронов. Доступные наблюдательные данные об атмосферных нейтронах и вспышках первичного γ -излучения, коррелированных с грозами, не позволяют сделать окончательный вывод о вкладе гроз в наработку радиоуглерода. Требуются многочисленные исследования высокоэнергетических явлений в грозах, прежде всего в тропическом поясе, где грозовая активность особенно интенсивна и наработка радиоуглерода галактическими космическими лучами почти не зависит от активности Солнца, возмущающей геомагнитное поле, экранирующее Землю от космического излучения.

Введение

Нейтроны естественных источников имеют неопределимое значение, так как «поставляют количественную информацию о процессах, их создающих, и потому что вызванные ими трансмутации могут являться инструментами для понимания других физических, химических или хронологических процессов. Поскольку грозовые нейтроны поступают непосредственно в тропосферу, их значение увеличивалось бы на малых географических масштабах при условии, что они составляют заметную долю атмосферных нейтронов» [1].

На точность датировки по радиоуглероду (изотоп $^{14}_6\text{C}$) влияют изменения концентрации атмосферного $^{14}_6\text{C}$ [2, 3], которые связаны с вариациями потока галактических космических лучей, производящих радиоуглерод, и геомагнитного поля, экранирующего Землю от космических лучей. В масштабах датировки по радиоуглероду поток космических лучей довольно постоянен, но на экранирующую способность геомагнитного поля влияет солнечная активность; следовательно, вариации последней приводят к вариациям в темпе производства радиоуглерода (ТПР) [3–8]. С другой стороны, авторы работы [9] связывают импульсное увеличение концентрации космогенного радиоуглерода в древесных кольцах (12 %) в 750 г. н. э. с сильной вспышкой галактических γ -лучей. Флуктуации любого происхождения ограничивают «точность радиоуглеродной калибровки единичных образцов в лучшем случае столетием... или, во многих случаях, намного хуже, совершенно независимо от точности измерений» [3]. Грозовые нейтроны могут иметь важные следствия для радиоуглеродной датировки; в частности, могут увеличить упомянутую неопределенность. В данной статье анализируется возможный вклад грозовых нейтронов в производство $^{14}_6\text{C}$.

История проблемы

Широко известна гипотеза Чарльза Вильсона (Charles Wilson), опубликованная в 1924 г. [10], об ускорении («убегании» [11]) электронов в электрических полях грозовых облаков. Менее известна гипотеза Вильсона о возможности ядерных реакций в грозах. Однако состояние ядерной физики в 1920-е гг. позволило только упомянуть распад или синтез ядер. В настоящее время известно, что нейтроны оказываются среди возможных дочерних продуктов ядерных реакций, но в 1924 г. нейтрон не был даже открыт. Полстолетия спустя Либби (Libby) и Лукенс (Lukens) [12] реанимировали гипотезу Вильсона. Их интерес к способности грозовой активности производить нейтроны был мотивирован попыткой объяснить кратковременные вариации концентрации $^{14}_6\text{C}$ в древесных кольцах. Суисс (Suess) [13] обнаружил, что вариации $^{14}_6\text{C}$ в древесных кольцах коррелированы с числом пятен на Солнце, поэтому он связал вековые вариации с флуктуациями интенсивности солнечных космических лучей. Последние слишком малы, чтобы влиять непосредственно на ТПР, однако активность Солнца влияет на электрическую активность атмосферы, а от нее зависит частота гроз. Либби и Лукенс полагали, что вероятная модуляция производства $^{14}_6\text{C}$ разрядами молнии и накопление этого изотопа в биомассе объясняет корреляцию, отмеченную Суиссом.

За первой (с нулевым результатом) попыткой [14] обнаружить грозовые нейтроны последовали сообщения, в которых объявлялось о наблюдении усиления потока нейтронов в грозах [15–31]. Возможно, следуя Либби и Лукенсу, генерацию нейтронов грозами связывали с реакциями синтеза $d(d, n)^3_2\text{He}$ в разрядах молнии [14–17]. Однако энергия дейтронов в каналах молнии слишком мала для протекания этих реакций [32–36]. Поскольку интенсивные земные вспышки γ -излучения (TGFs – Terrestrial Gamma-ray Flashes) с продолжительностью Δt_γ порядка 1 мс, обнаруженные в ближнем космосе [37–43], на борту самолета [44] и на поверхности Земли [31, 45, 46], и продолжительные γ -вспышки (Δt_γ до десятков минут), обнаруженные на поверхности Земли [20–24, 26, 31, 47–51], коррелированы с грозами и их спектры простираются до энергии 100 МэВ [43], т. е. выше порогов $\varepsilon_{\text{th},\text{N}} = 10,55$ МэВ и $\varepsilon_{\text{th},\text{O}} = 15,7$ МэВ фотоядерных реакций $^{14}_7\text{N} + \gamma \rightarrow ^{13}_7\text{N} + \text{n}$, $^{16}_8\text{O} + \gamma \rightarrow ^{15}_8\text{O} + \text{n}$ и реакций электродезинтеграции $^{14}_7\text{N} + \text{e}^- + \varepsilon_e \rightarrow ^{13}_7\text{N} + \text{n} + \text{e}^-$, $^{16}_8\text{O} + \text{e}^- + \varepsilon_e \rightarrow ^{15}_8\text{O} + \text{n} + \text{e}^-$, эти реакции – самые очевидные процессы, отвечающие за грозовые нейтроны [20, 21, 32–36, 52]. Поскольку грозовые γ -лучи являются тормозным излучением лавин релятивистских убегających электронов, способных развиваться в электрических полях грозовых облаков [53], замечательно то, что средняя энергия электронов в лавинах 6–7 МэВ [54–57] в электрических полях с напряженностью ниже порога самостоятельного пробоя в атмосфере не намного ниже порога $\varepsilon_{\text{th},\text{N}}$.

В связи с первыми наблюдениями [15–17] усиления потока нейтронов в корреляции с электромагнитными импульсами (ЭМИ) молнии Бабич и Руссель-Дюпре (Roussel-Dupré) [34] выполнили анализ производства $^{14}_6\text{C}$ грозами. Учитывая только одну конкурирующую реакцию $^{14}_7\text{N}(n, \gamma)^{15}_7\text{N}$, они оценили объемный ($\text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$) ТПР тепловыми нейтронами:

$$\dot{N}_{\text{thund,vol}}\left({}^{14}_6\text{C}\right) = N_{\text{nl}} \cdot R_{\text{flash,glob}} \cdot \delta / V_{\text{trop}}, \quad (1)$$

где число N_{nl} – число нейтронов на удар молнии; $R_{\text{flash,glob}}$ – глобальная частота вспышек молнии; δ – доля ЭМИ молнии, коррелированных с производством нейтронов; $V_{\text{trop}} \approx 4\pi(R_{\text{Earth}})^2 \cdot l_{\text{trop}}$ – объем тропосферы, $R_{\text{Earth}} \approx 6370$ км – радиус Земли, l_{trop} – высота тропосферы. Значения всех величин в (1), особенно δ и N_{nl} , сильно зависят от измерений и вычислений. Используя $R_{\text{flash,glob}} \approx 100/\text{с}$, $l_{\text{trop}} \approx 10$ км, $\delta = 0,01$ (согласно [15]) и число грозовых нейтронов $N_{\text{nl}} = 10^{15}$ на вспышку, предсказанное самими авторами, они получили $\dot{N}_{\text{thund,vol}}\left({}^{14}_6\text{C}\right) \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, что на два порядка ниже значения $1,85 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ вследствие космического облучения атмосферы, которое авторы оценили, используя период полураспада ${}^{14}_6\text{C}$ и довольно неопределенное значение концентрации ${}^{14}_6\text{C}$ в атмосфере согласно [58]. Кроме того, фотоядерные нейтроны, первоначально распределенные в мегаэлектронвольтовой области [59], во время замедления испытывают множественные взаимодействия с ядрами воздуха. Бабиц и Руссель-Дюпре заключают, что в настоящее время вклад грозовых нейтронов в концентрацию ${}^{14}_6\text{C}$ в среднем по земному шару мал, но локально, особенно в тропиках, производство ${}^{14}_6\text{C}$ грозами, возможно, конкурирует с производством космическим облучением.

Ввиду недостатков работы [34] и учитывая новые экспериментальные [19–31, 38–51, 60–62], аналитические и вычислительные [26, 35, 36, 52, 54, 55, 59, 62–70] данные по грозовым γ -лучам и нейтронам, целесообразен новый анализ возможности производства ${}^{14}_6\text{C}$ грозами, который базировался бы не на ограниченном числе наблюдений грозовых нейтронов, как в работе [34], но на данных обширного числа новых наблюдений усиления потока высокоэнергетических электронов, жесткого γ -излучения и нейтронов на поверхности Земли по всему миру: Армения (Арагац, 3250 м над уровнем моря) [20–23], Япония (уровень моря и 2770 м над уровнем моря) [49–51], Китай (Тибет, 4300 м над уровнем моря) [26], Индия (Гималаи, 2743 м над уровнем моря) [15, 30], Казахстан (Тянь-Шань, 3340 м над уровнем моря) [27–29].

Уместно отметить, что, поскольку пробеги фотонов с энергиями $\varepsilon_\gamma \geq \varepsilon_{\text{th,N}}$ намного превышают поперечные размеры каналов молнии, производящие нейтроны реакции протекают вне каналов [35, 36, 67, 68]. Импульсы нейтронов могут лишь коррелировать с ЭМИ молнии; довольно часто они наблюдаются до ЭМИ и даже не коррелируют с ЭМИ. Так, продолжительные γ -вспышки (до 1 мин), первичные для нейтронов, наблюдались до ЭМИ [49–51] и, следовательно, не генерировались разрядами молнии. Даже TGFs, продолжительность которых обычно короче 1 мс, наблюдаются в пределах $-3/+1$ мс относительно ЭМИ [60, 61]. Поэтому ниже формулировку «корреляция с ЭМИ молнии» следует понимать как корреляцию с грозами или даже с формированиями грозовых облаков, поскольку нет иного способа измерить глобальную частоту гроз, нежели посредством регистрации ЭМИ разрядов молнии.

Число грозových нейтронов, необходимое для сопоставления производства радиоуглерода грозами с наблюдаемым производством

Число нейтронов N_{n1} , произведенное в корреляции с одним ЭМИ молнии, можно вычислить с помощью элементарного уравнения баланса:

$$\frac{dN_{n1}}{dt} = I - \frac{N_{n1}}{\tau_{abs}}, \quad I = \begin{cases} S_{source}, & 0 \leq t \leq \Delta t; \\ 0, & t > \Delta t. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь S_{source} – источник нейтронов с продолжительностью, равной продолжительности первичного γ -импульса; $\Delta t \approx \Delta t_\gamma$; $\tau_{abs} = 1/2N_{air}v_n\sigma_{abs}$, N_{air} – концентрация молекул воздуха, v_n – скорость нейтронов, $\sigma_{abs} = \sum_i \sigma_i$ – сечение поглощения нейтронов, σ_i – сечение взаимодействия нейтронов i -типа с ядрами воздуха. Решение этого уравнения с начальным условием $N_{n1}(0)$:

$$N_{n1}(t) = S_{source} \tau_{abs} \begin{cases} 1 + \left(\frac{N_{n1}(0)}{S_{source} \tau_{abs}} - 1 \right) \exp(-t/\tau_{abs}), & 0 \leq t \leq \Delta t; \\ \left(1 + \left(\frac{N_{n1}(0)}{S_{source} \tau_{abs}} - 1 \right) \exp(-t/\tau_{abs}) \right) \exp\left(\frac{\Delta t - t}{\tau_{abs}}\right), & t > \Delta t. \end{cases} \quad (3)$$

Производство $^{14}_6\text{C}$ на один удар (stroke) молнии можно оценить, используя уравнение баланса:

$$\frac{dN_{str}\left(^{14}_6\text{C}\right)}{dt} = \frac{N_{n1}}{\tau_{14}}, \quad (4)$$

где $\tau_{14} = 1/2N_{air}v_n\sigma_{14}$, σ_{14} – сечение реакции $^{14}_7\text{N}(n, p)^{14}_6\text{C}$. Распадом ядер $^{14}_6\text{C}$ пренебрегается вследствие слишком большого периода полураспада (5730 лет) по сравнению с τ_{14} .

Интегрирование уравнения (4) совместно с соотношением (3) в диапазоне от $t = 0$ до ∞ (фактически до $\Delta t + (2-3)\tau_{abs}$) с очевидными условиями $N_{n1}(0) = 0$ и $N_{str}\left(^{14}_6\text{C}\right) = 0$ при $t = 0$ дает

$$N_{str}\left(^{14}_6\text{C}\right) = S_{source} \Delta t \frac{\tau_{abs}}{\tau_{14}} = N_{n1} \frac{\sigma_{14}}{\sigma_{abs}}. \quad (5)$$

Эта формула может быть получена просто комбинацией уравнений (2) и (4) и интегрированием результата в том же диапазоне и с теми же условиями.

Глобальный ТПР оценивается следующим образом:

$$\dot{N}_{thund}\left(^{14}_6\text{C}\right) = N_{str}\left(^{14}_6\text{C}\right) R_{flash} n_{str} \delta, \quad (6)$$

где R_{flash} – глобальная частота вспышек молнии на единицу площади поверхности Земли ($\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$), n_{str} – число ударов, составляющих одну вспышку.

В работе [34] ТПР оценивается по предсказанному авторами числу нейтронов $N_{n1} = 10^{15}$. Но доступно только незначительное число измерений числа грозовых нейтронов, так что значение N_{n1} крайне неопределенное; поэтому разумно вычислить N_{n1} , требуемое для согласия с глобальным ТПР ($\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$), который должен включать ТПР вследствие космического облучения атмосферы $\dot{N}_{\text{cosm}} \left(\frac{14}{6} \text{C} \right)$ и грозовой $\dot{N}_{\text{thund}} \left(\frac{14}{6} \text{C} \right)$. Тогда число грозовых нейтронов N_{n1} , необходимое, чтобы ТПР $\dot{N}_{\text{thund}} \left(\frac{14}{6} \text{C} \right)$ составлял часть k от $\dot{N}_{\text{cosm}} \left(\frac{14}{6} \text{C} \right)$, получается объединением (5) и (6):

$$N_{n1} = \frac{\sigma_{\text{abs}}}{\sigma_{14}} \cdot \frac{k \dot{N}_{\text{cosm}} \left(\frac{14}{6} \text{C} \right)}{n_{\text{str}} R_{\text{flash}} \delta}. \quad (7)$$

Это соотношение включает ТПР на единицу площади $\dot{N}_{\text{cosm}} \left(\frac{14}{6} \text{C} \right)$, которая прямо соответствует размерности ($\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) измеренных и вычисленных значений ТПР, тогда как использование глобальной частоты вспышек $R_{\text{flash, glob}} (\text{с}^{-1})$ в соотношении (1) вынудило авторов [34] включить деление на $V_{\text{trop}} = 4(R_{\text{Earth}})^2 l_{\text{trop}}$ с произвольно принятым значением высоты тропосферы $l_{\text{trop}} = 10$ км, чтобы сравнить результат с довольно неопределенным значением объемного ТПР, который они сами оценили довольно грубо.

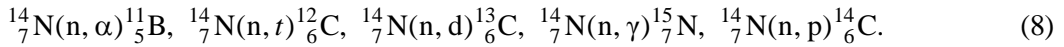
Для дальнейших оценок требуются численные значения величин в соотношении (7). Весьма удачно, что N_{n1} не зависит от продолжительности Δt_{γ} и высоты вспышек первичных грозовых γ -лучей, поскольку Δt_{γ} меняется в диапазоне от сотен миллисекунд до десятков минут (см., например, [20, 21, 26, 55] и цитируемую литературу). Кроме того, поскольку пробеги γ -фотонов с энергиями выше фотоядерного порога $\varepsilon_{\text{th, N}}$ очень велики, нейтроны производятся на разных высотах и, следовательно, при разной плотности воздуха.

В зависимости от долготы, широты и времени года частота вспышек молнии R_{flash} (фактически – частота регистрируемых ЭМИ) меняется в очень широком диапазоне. В областях с высокой грозовой активностью (максимальная находится на суше тропического пояса [71]) R_{flash} меняется от 1 до 80 на квадратный километр за год [38], т. е. от $3,3 \cdot 10^{-14}$ до $2,7 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Измеренная глобальная частота разрядов молнии равна 45 с^{-1} [72–75]). Деление этого значения на площадь поверхности Земли $S_{\text{Earth}} \approx 4 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$ дает значение глобальной частоты вспышек $10^{-13} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что находится в пределах приведенного выше диапазона R_{flash} . Типичное число ударов во вспышке $n_{\text{str}} = 3$ [76]. Для продолжительных событий [23, 24, 26, 31, 47, 49–51] с γ -вспышками, предшествующими ЭМИ молнии, очевидно, следует полагать $n_{\text{str}} = 1$.

Вычисленные значения космогенного ТПР $\dot{N}_{\text{cosm}} \left(\frac{14}{6} \text{C} \right)$ меняются от $1,6 \cdot 10^4$ до $(2,5 \pm 0,5) \cdot 10^4 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в зависимости от долготы, широты и высоты над уровнем моря [3, 4, 13, 77–81]. Автор работы [3] отмечает, что «попытки непосредственно измерить темп производства на уровне земли [82] и на высоте [80] недостаточно хорошо согласуются с этими оценками». С другой стороны, значение $\dot{N}_{\text{cosm}} \left(\frac{14}{6} \text{C} \right) \approx 1,96 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, вычисленное Полуяновым и др. [81],

согласуется со значением $(1,83 \pm 0,05) \cdot 10^4 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, измеренным Кану (Kanu) и др. в стратосфере [83]. Таким образом, для дальнейших оценок разумно принять $\dot{N}_{\text{cosm}}\left({}^{14}_6\text{C}\right) = 2 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Первоначально фотоядерные нейтроны, произведенные γ -лучами со спектром тормозного излучения лавины релятивистских убегающих электронов [84], распределены в диапазоне энергий от 10 до 16 МэВ с максимумом при ≈ 3 МэВ [59] или ниже 10 МэВ с максимумом при ≈ 2 МэВ [52]. Эти нейтроны взаимодействуют с ядрами основных элементов атмосферы (азот и кислород) и протонами водорода молекул воды в грозовых облаках. Соответствующие сечения, доступные, например, в базе данных [85], должны быть взвешены по содержанию компонентов атмосферы; однако для оценки отношения $\sigma_{\text{abs}}/\sigma_{14}$ в пределах точности данного анализа достаточно учесть реакции с азотом:



Во-первых, рассмотрим захват нейтронов протонами ${}^1_1\text{H}(n, \gamma){}^2_1\text{H}$. На высотах $h = 1 - 2,5$ км внутри кучевого облака измерена плотность воды $\rho_{\text{water}} \approx (0,33 - 1,7) \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$ [86]. В модели «газа» капелек с радиусом $r_{\text{dr}} = 1$ мкм с концентрацией $n_{\text{dr}} = 10^9 \text{ м}^{-3}$ [87] плотность воды несколько выше: $\rho_{\text{water}} \approx 4 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$. Оба значения ρ_{water} на порядки величины меньше плотности сухого воздуха $\approx 1,29 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \exp(-h(\text{км})/7,1)$ на представляющих интерес высотах h (тропосфера и нижняя стратосфера). Сечение реакции ${}^1_1\text{H}(n, \gamma){}^2_1\text{H}$ намного меньше сечения реакции ${}^{14}_7\text{N}(n, p){}^{14}_6\text{C}$: в диапазоне энергий нейтронов от 10^{-5} эВ приблизительно до 100 кэВ отношение сечения реакции ${}^{14}_7\text{N}(n, p){}^{14}_6\text{C}$ к сечению реакции ${}^1_1\text{H}(n, \gamma){}^2_1\text{H}$ составляет $\approx 5 - 10$, а при более высоких энергиях достигает сотен [85]. Следовательно, захват нейтронов протонами воды несущественен.

Вклад других производящих углерод реакций на много порядков величины меньше, чем вклад ${}^{14}_7\text{N}(n, p){}^{14}_6\text{C}$, на который приходится более 99 % полного ТПР в атмосфере Земли [5, с. 673]. Взаимодействиями с кислородом, вторым главным элементом атмосферы, можно также пренебречь из-за слишком низкой концентрации (в 3,25 раз меньше концентрации азота) наряду с тем, что сечения реакций с кислородом, подобных (8), довольно близки или меньше сечений реакций (8). В результате для начального спектра нейтронов (10–16 МэВ) [59] отношение $\sigma_{\text{abs}}/\sigma_{14} \approx 5$. Нейтроны замедляются в атмосфере; соответственно, $\sigma_{\text{abs}}/\sigma_{14}$ меняется между 5 и 10 в диапазоне энергий от 10 до 1 МэВ; ниже 1 МэВ, где реакция ${}^{14}_7\text{N}(n, p){}^{14}_6\text{C}$ доминирует, $\sigma_{\text{abs}}/\sigma_{14} \approx 1$.

Значения δ наиболее неопределенны. В настоящее время не ясно, генерируются ли нейтроны каждой грозой. Очевидно, количество нейтронов, эмитируемых на один грозовой ЭМИ, может меняться в широком диапазоне. Вероятность обнаружить грозовые нейтроны и числа регистрируемых нейтронов сильно зависят от расстояния от детектора до нейтронного источника, рельефа, влажности воздуха, осадков и т. д. Так, авторы первого сообщения о наблюдении грозовых нейтронов [15] выбрали 124 события с числом зарегистрированных нейтронов 3 и более на фоне 11200 ЭМИ молнии, что дает $\delta \approx 0,011$. Включение событий с двумя нейтронами увеличивает δ в три раза. С другой стороны, во время наблюдений с 2006 по 2009 гг. Иштиак (Ishtiaq) и др. [20] зарегистрировали события с более чем двумя нейтронами, коррелированные с каждым из зарегистрированных 150 ЭМИ; 19 и 13 из этих событий содержали более чем 5 и более чем 10 нейтро-

нов соответственно. В мае и июне 2006 г., когда грозы проходили около нейтронного монитора, зарегистрированы 60 ЭМИ, из которых 50 коррелированы с событиями, в которых зарегистрировано ≥ 4 нейтронов на событие. В пяти из них были зарегистрированы более 20 нейтронов на событие [30]. Следовательно, согласно этим наблюдениям, δ может изменяться приблизительно от 0,01 до 1 в зависимости от числа обнаруженных нейтронов. Согласно обширным экспериментальным данным, собранным с 2009 г., на Арагаце каждая гроза сопровождается грозовыми наземными усилениями (Thunderstorm Ground Enhancements) потоков высокоэнергетических электронов, γ -излучения и нейтронов [20–23]. Энергия γ -фотонов превышает 20 МэВ, что больше порога $\varepsilon_{th,N} = 10,55$ МэВ [22]. Важно, что грозовые наземные усиления предшествовали каждой вспышке молнии [24]. Следовательно, согласно наблюдениям на Арагаце, $\delta = 1$. Поэтому ввиду неопределенности значения δ дальнейшие оценки выполняются с $\delta = 0,01$, как в [34], и $\delta = 1$.

С приведенными значениями R_{flash} , n_{str} , $\dot{N}_{cosm}({}^{14}_6C)$, δ и σ_{abs}/σ_{14} для спектров начальных и замедленных нейтронов число нейтронов на удар молнии, необходимое для того, чтобы $N_{n1} = 10\%$ ($k = 0,1$) и составляло половину ($k = 0,5$) наблюдаемого ТПР в различных областях земного шара, изменяется согласно данным табл. 1. Заметим, что доля $k = 0,1$ соответствует наблюдаемым колебаниям в производстве ${}^{14}_6C$ [4, 5 (гл. 17), 7–9, 13].

Таблица 1

Число нейтронов N_{n1} на грозовой ЭМИ, необходимое, чтобы ТПР $\dot{N}_{thund}({}^{14}_6C)$ составлял долю k от наблюдаемого ТПР $\dot{N}_{cosm}({}^{14}_6C) = 2 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ для $R_{flash} \approx 3,3 \cdot 10^{-14} - 2,7 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и $n_{str} = 1 - 3$

k	0,1				0,5			
	1		3		1		3	
n_{str}	1		5		1		5	
σ_{abs}/σ_{14}	1	5	1	5	1	5	1	5
$N_{n1}/10^{15}$, $\delta = 1$	61–0,7	305–3,5	20–0,3	102–1,2	305–3,5	1525–18	100–1,5	510–6
$N_{n1}/10^{17}$, $\delta = 0,01$								

Данные наблюдений по первичным вспышкам γ -излучения не позволяют вычислить начальные числа нейтронов, поскольку любой эксперимент дает только скорость счета гамма-квантов и энергии на месте расположения детектора, а не числа γ -фотонов и спектры на высотах γ -источников, но именно последние требуются для вычисления числа нейтронов и их энергий для сравнения с данными табл. 1. Традиционно для получения характеристик импульса фотоядерных нейтронов используется численное моделирование; чтобы вычислить скорость генерации и спектры первичных γ -фотонов в источнике, помещаемом на варьируемой высоте, высота подбирается так, чтобы результаты моделирования соответствовали показаниям γ -детектора. Чтобы исключить неизбежные неопределенности, присущие такому подходу, разумно оценить флюенс нейтронов, требуемый для того, чтобы грозовой ТПР составлял существенную часть космического ТПР, и сравнить результат непосредственно с флюенсом, полученным по измеренным скоростям счета нейтронов.

Флюенс нейтронов, необходимый для сопоставления наработки радиоуглерода грозами с наблюдаемой наработкой

Наземный локальный флюенс нейтронов на ЭМИ Φ_{n1} , при котором грозовой ТПР $\dot{N}_{thund}({}^{14}_6\text{C})$ составляет часть k от $\dot{N}_{cosm}({}^{14}_6\text{C})$, оценивается делением (7) на часть площади земной поверхности с высокой грозовой активностью $S \approx 0,3 \cdot S_{Earth}$:

$$\Phi_{n1} = \frac{N_{n1}}{S} = \frac{\sigma_{abs}}{\sigma_{14}} \cdot \frac{k \dot{N}_{cosm}({}^{14}_6\text{C})}{n_{str} R_{flash} S \delta}. \tag{9}$$

В табл. 2 приведены значения Φ_{n1} , удовлетворяющие соотношению (9) с $k = 0,1$ и теми же значениями $\dot{N}_{cosm}({}^{14}_6\text{C})$, σ_{abs}/σ_{14} , R_{flash} , n_{str} и δ , что и в табл. 1. С $k = 0,5$ значения Φ_{n1} должны быть соответственно умножены.

Таблица 2

Флюенс нейтронов на грозовой ЭМИ, необходимый для совместимости грозового ТПР с наблюдаемым темпом $k = 0,1$

n_{str}	1		3	
σ_{abs}/σ_{14}	1	5	1	5
$\Phi_{n1}, \text{м}^{-2}, \delta = 1,$	556–6	2780–30	185–2	925–10
$\Phi_{n1}/100, \text{м}^{-2}, \delta = 0,01$				

В табл. 3 представлены значения флюенса нейтронов Φ_n , зарегистрированные на различных высотах h_{det} или полученные численным моделированием в рамках фотоядерного происхождения нейтронов для различных h_{det} и высот источника первичных γ -лучей h_γ . Видно, что с $\delta = 1$ значения Φ_n довольно близки или даже превышают оценки в табл. 2. С $\delta = 0,01$ значения Φ_n согласуются с оценками табл. 2 для областей с сильной грозовой активностью. Следовательно, возможно, что грозовой ТПР локально составляет существенную часть (по крайней мере, 0,1) космического ТПР.

Заметим, что наблюдения дают значения только локального флюенса нейтронов; невозможно идентифицировать область поверхности Земли, к которой они относятся, потому что ни координаты, ни размеры γ -источников неизвестны. Но наблюдения грозовых нейтронов немногочисленны, поэтому данные табл. 3 нельзя полагать близкими к усредненному по земному шару флюенсу нейтронов на один грозовой ЭМИ.

Наземный флюенс нейтронов Φ_n на различных высотах детектирования h_{det}

h_γ , км	h_{det} , км	Флюенс нейтронов, м ⁻²							
		Эксперимент					Расчет		
		[15]	[20]	[30]	[26]	[27]	[59]	[66]	[52]
?	2,74	30–670		56–700					
?	3,25		$5 \cdot 10^4$						
15–5	0						$(0,03–7) \cdot 10^2$		
12–8	3						$(0,35–4) \cdot 10^2$		
?	3,34					$(2–3) \cdot 10^4$			
4–2	0							$2 \cdot (10^3–10^5)$	
5–3,5	3							$(0,9–2) \cdot 10^7$	
5	0								$3 \cdot 10^2$
2,5	0								10^4
5,2	4,3				$1,4 \cdot 10^4$				

Заключение

Вычисленные значения флюенса нейтронов на один грозовой ЭМИ (индикатор глобальной грозовой активности), требуемые для того, чтобы наработка $^{14}_6\text{C}$ грозами в областях с сильной грозовой активностью (частота вспышек молнии $R_{flash} 10^{-12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, δ порядка единицы) была сопоставима с наработкой космическим облучением, совместимы с доступными измеренными и вычисленными значениями флюенса грозовых нейтронов. Таким образом, в настоящее время грозовые нейтроны могут локально вносить вклад в концентрацию $^{14}_6\text{C}$. Авторы работы [34] заключают: «Если бы... некая значительная доля $^{14}_6\text{C}$, локально депонированная (например, поглощенная местной биомассой) за времена короче по сравнению с временем перераспределения атмосферной циркуляцией, и, учитывая, что молнии концентрируются над сушей и их частота меняется на порядки величины по различным областям, возможно, что, в этих областях наработка $^{14}_6\text{C}$ молниями конкурирует с наработкой космическим облучением». Усиление атмосферного потока нейтронов, вызванное грозами, может иметь важные последствия для радиоуглеродной датировки. В частности, грозовые нейтроны могут иметь отношение к аномалиям в радиоуглеродной датировке. Возраст различных материалов может занижаться, если не учитывать историческую частоту и географическое распределение гроз.

Однако в настоящее время доступно только небольшое число сообщений о наблюдении грозовых нейтронов. В большинстве из них только сообщается о наблюдении усиления потока нейтронов, приблизительно коррелированных с ЭМИ молнии, без предоставления численных данных. В настоящее время даже не ясно, генерируются ли нейтроны каждой грозой. Так, авторы первых наблюдений грозовых нейтронов на Высотной научно-исследовательской лаборатории (Галмарг, Кашмир, Индия) выбрали только 124 события с числом нейтронов 3 и более на фоне

11200 ЭМИ молнии [15]. С другой стороны, там же наблюдались усиления потока нейтронов, коррелированные почти с каждым зарегистрированным ЭМИ [30]. Согласно обширным данным наблюдений в Космическом центре Ереванского физического института (Арагац, Армения), ведущихся с 2009 г., нейтроны с энергиями выше фотоядерного порога $\epsilon_{th,N} = 10,55$ МэВ генерируются каждой грозой [22, 24]. Высокоэнергетические явления в грозах – новая и потому слабо разработанная область атмосферного электричества. Число наблюдений коррелированных с грозами импульсов рентгеновского излучения, γ -излучения и нейтронов крайне ограничено.

Кроме того, как замечает Бронк Рэмси (Bronk Ramsey) [3], глобальный ТПР «известен удивительно плохо». Существенно расхождение между вычисленными и измеренными значениями. Так, Мэк (Мак) и др. [82], измерившие ТПР на различных высотах и широтах, отмечают, что вычисленный ТПР [4] «на низких высотах завывает фактический темп наработки в два раза».

Ввиду важности проблемы требуются более точные и многочисленные экспериментальные исследования электронов высоких энергий, рентгеновского излучения, γ -излучения и нейтронов на различных высотах, долготах и широтах. Было бы крайне интересно измерить наработку $^{14}_6\text{C}$ в тропиках, где грозовая активность особенно высока. Интенсивность грозовой активности сильно зависит от активности Солнца, а производство $^{14}_6\text{C}$ галактическими космическими лучами в низких широтах почти не зависит от активности Солнца [4, 5 (с. 676)]. Следовательно, если наработка $^{14}_6\text{C}$ в тропиках окажется зависящей от солнечной активности, эти дополнительные ядра $^{14}_6\text{C}$, скорее всего, нарабатываются грозами.

Благодарности

Исследования атмосферного электричества высоких энергий во ВНИИЭФ являются продолжением пионерских исследований высокоэнергетических процессов в экспериментах с лабораторными разрядами в открытой атмосфере и других газах, начатых в конце 1960-х гг. группами Л. В. Тарасовой и Ю. Л. Станкевича [88–95], сотрудничество с которыми в качестве аспиранта и молодого специалиста автор вспоминает с глубокой благодарностью и ностальгией.

Данная статья явилась продолжением исследований, выполненных по проектам МНТЦ № 339, 490, 1480 и 3993. Автор выражает глубокую благодарность S. Gitomer, бывшему научному советнику МНТЦ от США, R. A. Roussel-Dupré, E. M. D. Symbalisty, C. Haldoupis, T. Neubert, коллабораторам от США и ЕС в этих проектах, N. Crosby, S. Cummer, A. van Deursen, J. R. Dwyer, R. Roussel-Dupré, D. Smith, H. Tsuchiya и E. Williams за поддержку предложения по последнему в программе МНТЦ проекту № 3993. Он искренне благодарен Е. Н. Донскому, А. В. Гуревичу, К. П. Зыбину, И. М. Куцыку, Т. В. Лойко, Б. Н. Шапраеву, С. Haldoupis, T. Neubert, R. A. Roussel-Dupré, E. M. D. Symbalisty и другим участникам исследований в этих проектах за многолетнее сотрудничество.

Список литературы

1. Fleisher R. L., Plumer J. A., Crouch K. Are neutrons generated by lightning? // J. of Geophys. Res. 1974. Vol. 79. P. 5013–5017.

2. Libby W. F., Anderson E. C., Arnold J. R. Age determination by radiocarbon content: world-wide assay of natural radiocarbon // *Science*. 1949. Vol. 109(2827). P. 227–228.
3. Bronk Ramsey C. Radiocarbon dating: revolutions in understanding // *Archaeometry*. 2008. Vol. 50. P. 249–275 [DOI: 10.1111/j.1475-4754.2008.00394.x].
4. Lingenfelter R. E. Production of carbon 14 by cosmic ray neutrons // *Rev. of Geophysics*. 1963. Vol. 1, N 1. P. 35–55.
5. Dorman L. Cosmic rays in the Earth's atmosphere and underground. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004.
6. Gosse J., Klein J. Terrestrial cosmogenic nuclide dating // *Encyclopedia of Scientific Dating Methods*. – Springer, 2015. Vol. XXIX. P. 799–813.
7. Rakowski A. Z., Krapiec M., Huels M. et al. Increase of radiocarbon concentration in tree rings from Kujawy (SE Poland) AD 774-775 // *Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. B*. 2015. Vol. 361. P. 564–568.
8. Usoskin I. G., Kromer B., Ludlow F. et al. The AD775 cosmic event revisited: the Sun is to blame // *Astron. Astrophys.* 2013. Vol. 552. P. L3 [DOI:10.1051/0004-6361/201321080].
9. Pavlov, A. K., Blinov A. V., Vasilyev G. I. et al. Gamma-ray bursts and the production of cosmogenic radionuclides in the Earth's atmosphere // *Astronomy Lett.* 2013. Vol. 39, Issue 9. P. 571–579.
10. Wilson C. T. R. The acceleration of β -particles in strong electric fields such as those of thunderclouds // *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 1924. Vol. 22. P. 534–538.
11. Eddington A. S. The origin of stellar energy // *Supplement to Nature*. 1926. N 2948. P. 25.
12. Libby L. M., Lukens H. R. Production of radiocarbon in tree rings by lightning bolts // *J. of Geophys. Res.* 1973. Vol. 78. P. 5902.
13. Suess H. E. Secular variations of cosmic ray produced carbon 14 in the atmosphere and their interpretations // *J. of Geophys. Res.* 1965. Vol. 70. P. 5437–5452.
14. Fleisher R. L. Search for neutron generation by lightning // *J. of Geophys. Res.* 1975. Vol. 80. P. 5005.
15. Shah G. N., Razdan H., Bhat G. L., Ali G. M. Neutron generation in lightning bolts // *Nature*. 1985. Vol. 313. P. 773–775.
16. Shyam A. N., Kaushik T. C. Observation of neutron bursts associated with atmospheric lightning discharge // *J. of Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. P. 6867–6869.
17. Кужевский Б. М. Генерация нейтронов в молниях // *Вестник Московского университета*. 2004. Серия 3. Физика. Астрономия. № 5. С. 14–16.
18. Bratolyubova-Tsulukidze L. S., Grachev E. A., Grigoryan O. R. et al. Thunderstorms as the probable reason of high background neutron fluxes at $L < 1.2$ // *Adv. Space Res.* 2004. Vol. 34. P. 1815–1818.
19. Martin I. M., Alves M. A. Observation of a possible neutron burst associated with a lightning discharge // *J. of Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. P. A00E11 [DOI:10.1029/2009JA014498].
20. Chilingarian A., Daryan A., Arakelyan K. et al. Ground-based observations of thunderstorm-correlated fluxes of high-energy electrons, gamma rays, and neutrons // *Phys. Rev. D*. 2010. Vol. 82. P. 043009 [DOI:10.1103/PhysRevD.82.043009].
21. Chilingarian A., Bostanjyan N., Vanyan L. Neutron bursts associated with thunderstorms // *Phys. Rev. D*. 2012. Vol. 85. P. 085017 [DOI:10.1103/PhysRevD.85.085017].

22. Chilingarian A., Hovsepyan G., Kozliner L. Thunderstorm ground enhancements: gamma ray differential energy spectra // *Phys. Rev. D: Part. Fields*. 2013. Vol. 88. P. 073001.
23. Chilingarian A., Hovsepyan G., Mantasakanyan E. Mount Aragats as a stable electron accelerator for atmospheric high-energy physics research // *Phys. Rev. D: Part. Fields*. 2016. Vol. 93. P. 052006.
24. Chilingarian A., Chilingaryan S., Karapetyan T. et al. On the initiation of lightning in thunderclouds // *Scientific Repots*. 2017. Vol. 7. P. 1371 [DOI:10.1038/s41598-017-01288-0].
25. Starodubtsev S. A., Kozlov V. I., Toropov A. A. et al. First experimental observations of neutron splashes under thunderclouds near the sea level // *JETP Lett*. 2012. Vol. 96. P. 188–191.
26. Tsuchiya H., Hibino K., Kawata K. et al. Observation of thundercloud-related gamma-rays and neutrons in Tibet // *Phys. Rev. D*. 2012. Vol. 85. P. 092006 [DOI:10.1103/PhysRevD.85.092006].
27. Gurevich A. V., Antonova V. P., Chubenko A. P. et al. Strong flux of low-energy neutrons by thunderstorms // *Phys. Rev. Lett*. 2012. Vol. 108. P. 125001 [DOI:10.1103/PhysRevLett.108].
28. Gurevich A. V., Antonova V. P., Chubenko A. P. et al. The time structure of neutron emission during atmospheric discharge // *Atmos. Res*. 2015. Vol. 164–165. P. 339–346.
29. Gurevich A. V., Almenova A. M., Antonova V. P. et al. Observations of high-energy radiation during thunderstorms Antonova at Tien-Shan // *Phys. Rev. D*. 2016. Vol. 94. P. 023003-1–023003-12.
30. Ishtiaq P. M., Mufti S., Darzi M. A. et al. Observation of 2.45 MeV neutrons correlated with natural atmospheric lightning discharges by Lead-Free Gulmarg Neutron Monitor // *J. of Geophys. Res. Atmosphere*. 2016. Vol. 121. P. 692–703 [DOI:10.1002/2015JD023343].
31. Kuroda Y., Oguri S., Kato Y. et al. Observation of gamma-ray bursts at ground level under the thunderclouds [Electronic resource]. – <https://arXiv:1601.06349v2> [astro-ph.HE]. 26 Jan. 2016.
32. Babich L. P. Generation of neutrons in giant upward atmospheric discharges // *JETP Lett*. 2006. Vol. 84. P. 285–288 [DOI:10.1134/S0021364006180020].
33. Babich L. P. Mechanism of neutron generation correlated with lightning discharges // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2007. Vol. 47. N 5. P. 664–670.
34. Babich L. P., Roussel-Dupré R. A. The origin of neutron flux increases observed in correlation with lightning // *J. of Geophys. Res*. 2007. Vol. 112. P. D13303 [DOI:10.1029/2006JD008340].
35. Babich L. P. Fundamental processes capable of accounting for the neutron flux enhancements in thunderstorm atmosphere // *JETP*. 2014. Vol. 118. P. 375–383 [DOI:10.1134/S1063776114030017].
36. Babich L. P., Bochkov E. I., Kutsyk I. M., Rassoul H. K. Analysis of fundamental interactions capable of producing neutrons in thunderstorm atmosphere // *Phys. Rev. D*. 2014. Vol. 89. P. 093010 [DOI: dx.DOI.org/10.1103/PhysRevD.89.093010].
37. Fishman G. J., Bhat P. N., Mallozzi R. et al. Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin // *Science*. 1994. Vol. 264. P. 1313–1316.
38. Smith D. M., Lopez L. I., Lin R. P., Barrington-Leigh C. P. Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV // *Science*. 2005. Vol. 307. P. 1085–1088.
39. Briggs M. S., Fishman G. J., Connaughton V., Bhat P. N. et al. First results on terrestrial gamma-ray flashes from the Fermi gamma-ray burst monitor // *J. of Geophys. Res*. 2010. Vol. 115. P. A07323 [DOI:10.1029/2009JA015242].

40. Connaughton V., Briggs M. S., Holzworth R. H. et al. Associations between Fermi Gamma-ray Burst Monitor terrestrial gamma-ray flashes and sferics from the World Wide Lightning Location Network // *J. of Geophys. Res.* 2011. Vol. 115. P. A12307 [DOI:10.1029/2010JA015681].
41. Marisaldi M., Fuschino F., Labanti C. et al. Detection of terrestrial gamma-ray flashes up to 40 MeV by the AGILE satellite // *J. of Geophys. Res.* 2010. Vol. 115, Issue A3. P. A00E13 [DOI:10.1029/2009JA014502].
42. Marisaldi M., Argan A., Trois A. et al. Gamma-ray localization of terrestrial gamma-ray flashes // *Phys. Rev. Lett.* 2010. Vol. 105. P. 128501 [DOI:10.1103/PhysRevLett.105.128501].
43. Tavani M., Marisaldi M., Labanti C. et al. Terrestrial gamma-ray flashes as powerful particle accelerators // *Phys. Rev. Lett.* 2011. Vol. 106. P. 018501.
44. Smith D. M., Dwyer J. R., Hazelton B. J. et al. A terrestrial gamma-ray flash observed from an aircraft // *J. of Geophys. Res.* 2011. Vol. 116. P. D20124 [DOI:10.1029/2011JD016252].
45. Tran M. D., Rakov V. A., Mallick S. et al. A terrestrial gamma-ray flash recorded at the Lightning Observatory in Gainesville, Florida // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2015. Vol. 136. P. 86–93 [DOI:10.1016/j.jastp.2015.10.010].
46. Enoto T., Wada Y., Furuta Y. et al. Photonuclear reactions triggered by lightning discharge // *Nature.* 2017. Vol. 551. P. 481–484 [DOI:10.1038/nature24630].
47. Khaerdinov N. S., Lidvansky A. S., Petkov V. B. Cosmic rays and the electric field of thunderclouds: Evidence for acceleration of particles (runaway electrons) // *Atmos. Res.* 2005. Vol. 76. P. 246.
48. Torii T., Sugita T., Tanabe S. Gradual increase of energetic radiation associated with thunderstorm activity at the top of Mt. Fuji // *Geophys. Res. Lett.* 2009. Vol. 36. P. L13804 [DOI:10.1029/2008GL037105].
49. Tsuchiya H., Enoto T., Yamada S. et al. Detection of high-energy gamma-rays from winter thunderclouds // *Phys. Rev. Lett.* 2007. Vol. 99. P. 165002 [DOI:10.1103/PhysRevLett.99.165002].
50. Tsuchiya H., Enoto T., Torii T. et al. Observation of an energetic radiation burst from mountain-top thunderclouds // *Phys. Rev. Lett.* 2009. Vol. 102. P. 255003 [DOI:10.1103/PhysRevLett.102.255003].
51. Tsuchiya H., Enoto T., Yamada S. et al. Long-duration γ -ray emissions from 2007 and 2008 winter thunderstorms // *J. of Geophys. Res.* 2011. Vol. 116. P. D09113 [DOI:10.1029/2010JD015161].
52. Carlson B. E., Lehtinen N. G., Inan U. S. Neutron production in terrestrial gamma ray flashes // *J. of Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. P. A00E19 [DOI:10.1029/2009JA014696].
53. Gurevich A. V., Milikh G. M., Roussel-Dupre R. A. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm // *Phys. Lett. A.* 1992. Vol. 165. P. 463–468 [DOI:10.1016/0375-9601(92)90348-P].
54. Dwyer J. R. Source mechanisms of terrestrial gamma-ray flashes // *J. of Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. P. D10103 [DOI:10.1029/2007JD009248].
55. Dwyer J. R., Smith D. M., Cummer S. A. High-energy atmospheric physics: terrestrial gamma-ray flashes and related phenomena // *Space Sci. Rev.* 2012 [DOI:10.1007/s11214-012-9894-0].
56. Kutsyk I. M., Babich L. P., Donskoy E. N., Bochkov E. I. Numerical analysis of the concept of a laboratory experiment on the demonstration of runaway electron breakdown under normal conditions at high overvoltages // *JETP Lett.* 2012. Vol. 95. P. 631–636.

57. Kutsyk I. M., Babich L. P., Donskoy E. N., Bochkov E. I. Analyses of a laboratory experiment on the observation of runaway electron avalanche in air at high overvoltages // *Plasma Phys. Report*. 2012. Vol. 38. P. 891–898.
58. Физическая энциклопедия / Под ред. А. М. Прохорова. – М.: Советская энциклопедия, 1988. Т. 1.
59. Babich L. P., Bochkov E. I., Kutsyk I. M., Roussel-Dupre R. A. Localization of the source of terrestrial neutron bursts detected in thunderstorm atmosphere // *J. of Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. P. A00E28 [DOI:10.1029/2009JA014750].
60. Cummer S. A., Zhai Y., Hu W. et al. Measurements and implications of the relationship between lightning and terrestrial gamma-ray flashes // *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32. P. L08811 [DOI:10.1029/2005GL022778].
61. Cummer S. A., Lu G., Briggs M. S. et al. The lightning-TGF relationship on microsecond timescales // *Geophys. Res. Lett.* 2011. Vol. 38. P. L14810 [DOI:10.1029/2011GL048099].
62. Kelley N. A., Smith D. M., Dwyer J. R. et al. Relativistic electron avalanches as a thunderstorm discharge competing with lightning // *Nature Commun.* 2015. Vol. 6:7845. P. 1–7 [DOI:10.1038/ncomms8845].
63. Dwyer J. R., Grefenstette B. W., Smith D. M. High-energy electron beams launched into space by thunderstorms // *Geophys. Res. Lett.* 2008. Vol. 35. P. L02815 [doi:10.1029/2007GL032430].
64. Babich L. P., Kudryavtsev A. Yu., Kudryavtseva M. L., Kutsyk I. M. Terrestrial gamma-ray flashes and neutron pulses from direct simulations of gigantic upward atmospheric discharge // *JETP Lett.* 2007. Vol. 85. P. 483–487 [DOI: 10.1134/S0021364007100037].
65. Babich L. P., Kudryavtsev A. Yu., Kudryavtseva M. L., Kutsyk I. M. Atmospheric gamma-ray and neutron flashes // *JETP*. 2008. Vol. 106. P. 65–76.
66. Babich L. P., Bochkov E. I., Donskoy E. N., Kutsyk I. M. Source of prolonged bursts of high-energy gamma-rays detected in thunderstorm atmosphere in Japan at the coastal area of the Sea of Japan and on high mountain top // *J. of Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. P. A09317 [DOI:10.1029/2009JA015017].
67. Babich L. P., Bochkov E. I., Kutsyk I. M., Zalyalov A. N. On amplifications of photonuclear neutron flux in thunderstorm atmosphere and possibility of detecting them // *JETP Lett.* 2013. Vol. 97 P. 291–296 [DOI:10.1134/S0021364013060027].
68. Babich L. P., Bochkov E. I., Dwyer J. R. et al. Numerical analysis of 2010 high-mountain (Tien-Shan) experiment on observations of thunderstorm-related low-energy neutron emissions // *J. of Geophys. Res. Space Phys.* 2013. Vol. 118. P. 7905–7912 [DOI:10.1002/2013JA019261].
69. Celestin S., Xu W., Pasko V. P. Terrestrial gamma ray flashes with energies up to 100 МэВ produced by nonequilibrium acceleration of electrons in lightning // *J. of Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. P. A05315 [DOI:10.1029/2012JA017535].
70. Xu W., Celestin S., Pasko V. P. Source altitudes of terrestrial gamma-ray flashes produced by lightning leaders // *Geophys. Res. Lett.* 2012. Vol. 39. P. L08801 [DOI:10.1029/2012GL051351].
71. Christian H., Latham J. Satellite measurements of global lightning // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1998. Vol. 124. P. 1–1773.
72. Christian H., Blakeslee R., Boccippio D. et al. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the optical transient detector // *J. of Geophys. Res.* 2003. Vol. 108. P. 4005.

73. Ushio T. Lightning observation by the LIS aboard the TRMM satellite // Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting. Makuhari, Chiba, 2003. Abstract E024-012.
74. Sato M., Takahashi M. Y., Yoshida A., Adachi T. Global distribution of intense lightning discharges and their seasonal variations // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. Vol. 41. P. 234011 (10pp) [DOI:10.1088/0022-3727/41/23/234011].
75. Bazelyan E. M., Rizer Y. P. Lightning physics and lightning protection. – Bristol: IOP Publishing, 2000.
76. Rakov V. A., Uman M. A. Lightning physics and effects. – New York: Cambridge Univ. Press, 2003.
77. Damon P. E., Lerman J. C., Long A. Temporal fluctuations of atmospheric ^{14}C // Ann. Rev. Earth Planets. Sci. 1978. Vol. 6. P. 457–494.
78. O'Brien K., Sandmeier H. A., Hansen G. E., Campbell J. E. Cosmic ray induced neutron background sources and fluxes for geometries of air over water, ground, iron, and aluminum // J. of Geophys. Res. 1978. Vol. 83. P. 114.
79. Masarik J., Reedy R. C. Terrestrial cosmogenic nuclide production calculated from numerical simulations // Earth Planet. Sci. Lett. 1995. Vol. 136. P. 381–396.
80. Bronk Ramsey C., Brenninkmeijer C. A. M., Jockel P. et al. Direct measurement of the radiocarbon production at altitude // Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2007. Vol. 259(1). P. 558–564.
81. Poluyanov S., Kovaltsov G. A., Mishev A. L., Usoskin I. G. Production of cosmogenic isotopes ^7Be , ^{10}Be , ^{14}C , ^{22}Na and ^{36}Cl in the atmosphere: Altitudinal profiles of yield functions [Electronic resource]. – <https://arxiv.org/abs/1606.05899v1>[astro-phAP].
82. Mak J. E., Brenninkmeijer C. A. M., Southon J. R. Direct measurement of the production rate of $^{14}_6\text{C}$ near Earth's surface // Geophys. Res. Lett. 1999. Vol. 26. P. 3381.
83. Kanu A. M., Comfort L. L., Guilderson T. P. et al. Measurements and modeling of contemporary radiocarbon in the stratosphere // Geophys. Res. Lett. 2016. Vol. 43(3). P. 1399–1406 [DOI:10.1002/2015GL066921].
84. Babich L. P., Donskoy E. N., Kutsyk I. M., Roussel-Dupré R. A. Bremsstrahlung of relativistic electron avalanche in the atmosphere // Geomagnetism and Aeronomy. 2004. Vol. 44. P. 254.
85. Официальный сайт МАГАТЭ [Электронный ресурс]. – <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>.
86. Шишкин Н. С. Облака, осадки и грозовое электричество. – Л.: Гидрометеиздат, 1964.
87. McCarthy M., Parks G. K. On the modulation of X-ray fluxes in thunderstorms // J. of Geophys. Res. 1992. Vol. 97. P. 5857–5864.
88. Станкевич Ю. Л., Калинин В. Г. Быстрые электроны и рентгеновское излучение в начальной стадии развития импульсного искрового разряда в воздухе // ДАН СССР. 1967. Т. 39. С. 72–73.
89. Тарасова Л. В., Худякова Л. Н. Рентгеновское излучение при импульсных разрядах в воздухе // ЖТФ. 1969. Т. 39. С. 1530–1533.
90. Станкевич Ю. Л. Начальная стадия электрического разряда в плотных газах // ЖТФ. 1970. Т. 40. С. 1476.
91. Бабич Л. П. Тормозное излучение электронов в средах с внешним электрическим полем // ЖТФ. 1972. Т. 42. С. 1617–1619.

92. Бабич Л. П., Станкевич Ю. Л. Критерий перехода от стримерного механизма газового разряда к непрерывному ускорению электронов // ЖТФ. 1972. Т. 42. С. 1669–1673.
93. Бабич Л. П. О стохастическом ускорении электронов в наносекундных разрядах // ЖТФ. 1974. Т. 44. С. 1846–1851.
94. Тарасова Л. В., Худякова Л. Н., Лойко Т. В., Цукерман В. А. Быстрые электроны и рентгеновское излучение наносекундных импульсных разрядов в газах при давлениях 0,1–760 Торр // ЖТФ. 1974. Т. 44. С. 564.
95. Бабич Л. П., Лойко Т. В., Тарасова Л. В., Цукерман В. А. О природе рентгеновского излучения и быстрых электронов наносекундных газовых разрядов // Письма в ЖТФ. 1975. Т. 1. С. 166–169.

Radiocarbon Production by Thunderstorms

L. P. Babich

In view of the neutron flux enhancements observed in thunderstorm times, a contribution of thunderstorm neutrons to atmospheric radiocarbon production is analyzed. Herein, estimates of neutron fluence per lightning EMP in regions with severe thunderstorm activity, at which a local rate of the radiocarbon production is comparable to the observational data, are consistent with the measured magnitudes of thunderous neutron fluence. Available observational data on atmospheric neutron and parent gamma-ray flashes correlated with thunderstorms do not allow making final conclusions about thunderstorm contributions to the radiocarbon production. For this, numerous studies of high-energy phenomena in thunderstorms are required, especially in the tropical belt where the thunderstorm activity is especially severe and where the radiocarbon production by galactic cosmic rays is almost independent of the solar activity disturbing the geomagnetic field shielding the Earth from cosmic radiation.