


Научный обзор

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/23>

УДК 630*561.24+621.039.86



События Мияке: обзор современного состояния исследований

Рашит М. Хантемиров^{1,2}✉, rashit@ipae.uran.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3033-8312>

¹Уральский федеральный университет, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация

²Институт экологии растений и животных УрО РАН, ул. 8 Марта, 202, г. Екатеринбург, 620144, Российская Федерация

Событие Мияке – это быстрый и значительный рост содержания радиоуглерода в атмосфере Земли. Впервые такое событие описали японские исследователи из университета Нагои, используя в качестве индикатора древесные кольца. Они обнаружили скачок радиоактивного изотопа углерода в кольце 775 года по сравнению с кольцом 774 года. Впоследствии все такие события стали называть по имени первого автора основополагающей статьи. К настоящему времени обнаружено пять событий Мияке: около 12350 г. до н.э., в 7176 и 5259 г. до н.э., в 775 и 993 г. н.э. Менее выражены и требуют подтверждения события 5410 г. до н.э., 1052 и 1279 г. н.э. Среди возможных причин резкого увеличения содержания радиоуглерода в атмосфере предполагались падение кометы на Землю или на Солнце, короткий гамма-всплеск, вспышка сверхновой. Но наиболее правдоподобным источником считается поток высокоэнергетических частиц в результате сверхмощной вспышки на Солнце. Такие солнечные события должны приводить к появлению полярных сияний в низких широтах. Однако, в летописях Европы, Ближнего и Дальнего Востока не обнаружены достоверные упоминания полярных сияний в годы событий Мияке. В настоящее время события Мияке используются во многих областях науки, в том числе для проверки надежности дендрохронологических датировок, для точной датировки слоев ледовых колонок. Но наиболее важным считается открывшаяся возможность радиоуглеродного датирования с точностью до года.

Ключевые слова: события Мияке, древесные кольца, радиоуглерод, сверхмощные солнечные вспышки, радиоуглеродное датирование, полярные сияния

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-27-00158, <https://rscf.ru/project/23-27-00158/>.


Благодарности: Автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Хантемиров Р. М. События Мияке: обзор современного состояния исследований / Р. М. Хантемиров // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 2. – С. 174–211. – Библиогр.: с. 200–211 (96 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/23>.

Поступила 03.11.2023 Пересмотрена 24.11.2023 Принята 24.11.2023 Опубликовано онлайн 16.01.2024

Miyake events: a review of the state-of-the-art

Rashit M. Hantemirov^{1,2}✉, rashit@ipae.uran.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3033-8312>

¹Ural Federal University, Mira str., 19, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

²Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 8 Marta str., 202, Ekaterinburg, 620144, Russian Federation

Abstract

Miyake events are fast and significant radiocarbon rises in the Earth's atmosphere. Japanese researchers from Nagoya University discovered this kind of event based on radiocarbon analysis in tree rings. They found a spike in the radioactive carbon isotope in the ring of 775AD compared to the 774AD ring. Subsequently, all such events became known by the name of the first author of the seminal paper. To date, five Miyake events have been discovered: around 12350 BC, in 7176 and 5259 BC, in 775 and 993 AD. The events of 5410 BC, 1052 and 1279 AD are less pronounced and require confirmation. Among the possible reasons for the sharp increase in the content of radiocarbon in the atmosphere a comet falling to the Earth or to the Sun, a short gamma-ray burst, a supernova outbreak were suggested. The most likely version, however, is considered to be solar energetic particles as a result of a super-powerful solar flare. Such solar events should lead to auroras in low latitudes. However, in the annals of Europe, the Middle East and the Far East, no reliable records of auroras in the years of Miyake events have been found. Nowadays, Miyake events are used in many fields of science, for example, to check the reliability of dendrochronological dating, for accurate dating of ice core layers. The most important, however, is considered to be the possibility of radiocarbon dating with an accuracy of one year.

Keywords: *Miyake events, tree rings, radiocarbon, extreme solar flares, radiocarbon dating, auroras*

Funding: This study has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF 23-27-00158, <https://rscf.ru/project/23-27-00158/>.

Acknowledgments: Author thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

For citation: Hantemirov R. M. (2023). Miyake events: a review of the state-of-the-art. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 2, pp. 174-211 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/23>.

Received 03.11.2023. *Revised* 24.11.2023. *Accepted* 24.11.2023. *Published online* 16.01.2024

Введение

Самым выдающимся успехом последних лет в дендрохронологии стало открытие в недавней истории Земли случаев очень быстрого и существенного роста содержания радиоактивного изотопа углерода ($C-14$) в атмосфере в течение одного-двух лет. Эти события позднее были названы в честь их первооткрывателя событиями Мияке. Открытие было сделано при анализе радиоуглерода в годичных кольцах древних деревьев. Такое быстрое повышение радиоуглерода в атмосфере однозначно указывает на то, что его причиной было какое-то мощное событие за пределами Земли.

В данном обзоре описана история открытия, его верификация, различные гипотезы о причинах событий Мияке, влияние этого открытия на развитие различных областей наук и перспективы дальнейших исследований.

Открытие событий Мияке

Начало новому направлению исследований положила статья в журнале Nature, опубликованная 14 июня 2012 года [1]. Авторами работы были четыре практически никому в дендрохронологическом сообществе не известных сотрудника университета Нагой в Японии. При этом первым автором была уж точно никому не известная Фуса Мияке (Fusa Miyake), в то время аспирантка третьего года обучения. Методом ускорительной масс-спектрометрии авторы провели анализ содержания изотопа углерода-14 в древесных кольцах, образовавшихся в период с 750 по 820 год (вернее, соотношения радиоактивного изотопа $C-14$ к стабильному $C-12$, нормированного по отношению к стандарту. Но для простоты далее будет использовано слово «содержание»). В качестве объекта исследований была использована древесина двух очень старых деревьев криптомерии японской (*Cryptomeria japonica*), росших когда-то на острове Яку на юге Японии и срубленных в 1956 году.

Выбор именно этого периода был связан с выяснением особенностей изменений содержания радиоуглерода в атмосфере год от года. Ранее уже были проведены измерения радиоуглерода в древесных кольцах сосны остистой (*Pinus longaeva*) из

Северной Америки и дуба (*Quercus* sp.) из Западной Европы почти для всей эпохи голоцена [2], но для этого использовались не отдельные кольца, а блоки по 10 колец, для времен ближе к современности – по 5 колец. Для последних трех тысяч лет были известны три периода, когда в течение десятилетия содержание радиоуглерода в годичных кольцах (а значит и в атмосфере Земли) значительно повышалось. Два из них были уже проанализированы с разрешением в один год [3] и не выявили каких-либо резких переходов год от года. Тем не менее японские исследователи решили попытаться счастья проверив и третий период, примерно между 770 и 790 годами, на предмет возможных резких переходов год от года. И действительно оказалось, что в кольцах, которые образовались в 775 году нашей эры содержание радиоуглерода оказалось намного (примерно на 15%) выше, чем в кольцах, сформированных в 774 году (рис. 1). Этот рост был настолько высоким, что авторы, используя модель обмена радиоуглерода в атмосфере Земли для оценки мощности потенциального генератора образования $C-14$, заявили о невозможности объяснения такого скачка концентрации радиоактивного углерода в атмосфере известными источниками космических лучей.

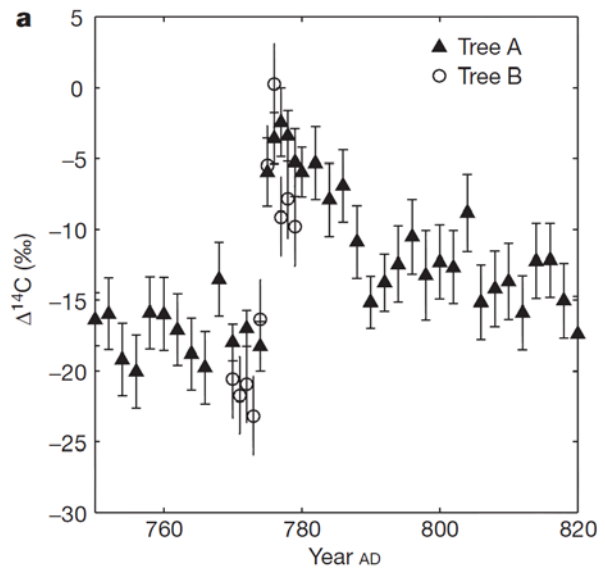


Рисунок 1. Рисунок из статьи Мияке с соавторами, 2012 г. в журнале Nature [1]

Figure 1. Figure from the article by Miyake et al, 2012 in Nature [1]

**Проверка данных и поиски новых событий
Мияке**

Открытие оказалось громким, поэтому привлекло к себе пристальное внимание. Одним из первых вопросов, который возник у специалистов после публикации статьи – будут ли воспроизведены результаты в других районах Земли на других видах деревьев и на оборудовании других радиоуглеродных лабораторий. Уже через полгода после выхода статьи Мияке с соавторами 2012 года были опубликованы данные по содержанию радиоуглерода в кольцах 770-780 годов у дуба из Германии (*Quercus* sp.) [4]. Анализ был проведен в двух лабораториях, в Маннхайме (Германия) и Цюрихе (Швейцария). Результат был воспроизведен с исключительной точностью.

Затем последовала публикация данных по сосне остистой (*Pinus longaeva*) из Калифорнии и лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) с полуострова Ямал [5], которые также подтвердили наличие события и его амплитуду. Впрочем, рост содержания радиоуглерода у ямальской лиственницы начался еще в 774 году (рис. 2). Позже было показано, что это небольшое несоответствие связано с географической неоднородностью магнитного поля Земли (см. ниже). В том же 2014 году подтверждение пришло из Австрии [6], где скачок концентрации радиоуглерода был обнаружен в кольцах 775 года у сосны кедровой (*Pinus cembra*).

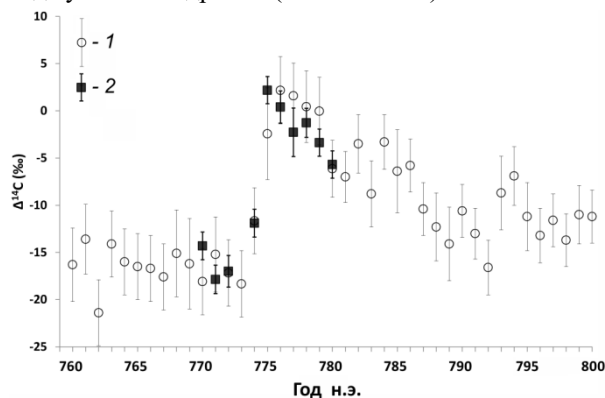


Рисунок 2. Содержание радиоуглерода в годичных кольцах двух лиственниц с полуострова Ямал в период события Мияке 774 года. 1 – лиственница № 827 (по [5]), 2 – лиственница № 2093 (по [7])
Figure 2. Radiocarbon in tree rings of two larches from the Yamal Peninsula around the Miyake 774AD event. 1 - larch No. 827 (by [5]), 2 - larch No. 2093 (by [7])

Первые данные из Южного полушария были получены при анализе годичных колец новозеландского каури (*Agathis australis*) [8]. В них обнаружена та же картина, что и в деревьях северного полушария – скачок содержания радиоуглерода в кольцах, которые начали формироваться в 775 году. Но абсолютные значения для всех колец были ниже на 5‰, что связано с большим влиянием резервуарного эффекта в южном полушарии. В 2015 году результаты были воспроизведены в Польше, где в годичных кольцах дуба (*Quercus robur*) обнаружили повышенное содержание радиоуглерода в 775 году [9]. Повышение было не таким высоким как в других работах, примерно на 9‰, но оно продолжилось и в следующем, 776 году, когда содержание радиоактивного изотопа углерода выросло уже на 13‰ по сравнению с 775 годом. Правда, это повышение сами авторы считают случайным отклонением, т.к. уровень радиоуглерода в последующих кольцах был не такой высокий.

Древесные кольца лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) с Алтая также воспроизвели уже знакомую картину резкого всплеска содержания радиоуглерода в 775 году [10] (данные приведены в приложении к цитируемой статье), с небольшим увеличением концентрации уже в 774 году, как и на Ямале. Еще одно подтверждение было получено при анализе годичных колец секвойи (*Sequoiadendron giganteum*) из Калифорнии [11], у которой проанализирован столетний период, с 720 по 820 годы.

Более подробный анализ этого события был проведен с помощью древесных колец сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) из Финляндии [12]. В этой работе содержание радиоуглерода было измерено отдельно в ранней и поздней древесине каждого годичного кольца с 770 по 779 годы (рис. 3). Повышение содержания радиоуглерода хорошо заметно уже в поздней древесине кольца, сформированного в 774 году. На этом основании, а также на основе моделирования сроков образования и распределения радиоуглерода в атмосфере, авторы делают вывод, что резкий всплеск радиоуглерода в атмосфере произошел весной 774 года.

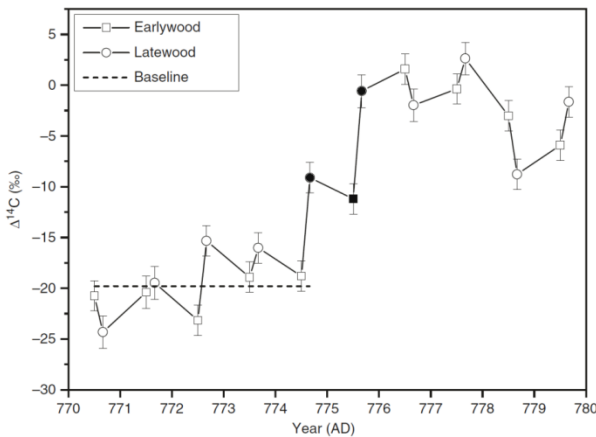


Рисунок 3. Изменение содержания радиоуглерода в годичных кольцах сосны из Финляндии отдельно в ранней и поздней древесине [12]. Закрашенные маркеры показывают изменения, связанные с событием Мияке (поздняя древесина 774 года и ранняя и поздняя древесина 775 года)

Figure 3: Changes in radiocarbon content in tree rings of pine from Finland separately in early and late wood [12]. The shaded markers show changes related to the Miyake event (late wood of 774AD and early and late wood of 775AD)

Также отдельно в ранней и поздней древесине проведен анализ годичных колец дзельквы японской (*Zelkova serrata*) из Южной Кореи с 762 по 776 г. [13]. Но в этом районе содержание радиоуглерода в поздней древесине 774 года было таким же, как и в ранней древесине, а повышение примерно одного уровня (8-10%) произошло в ранней и поздней древесине 775 года, с последующим небольшим повышением и в 776 году. Запаздывание повышения уровня С-14 по сравнению с сосной из Финляндии возможно связано с разницей в географическом положении. На основе этих данных авторы сделали вывод, что повышение уровня радиоуглерода в атмосфере произошло в период с конца апреля до середины июня 774 года.

Этот вывод был немного скорректирован в публикации следующего года [14]. В ней были представлены результаты анализа радиоуглерода в ранней и поздней древесине годичных колец сосны

колорадской (*Pinus edulis*) из пещеры Мумия в Аризоне за период 770–780 г. Этот археологический образец был датирован дендрохронологическим методом. Полученные данные подтверждают дату события Мияке и показывают небольшое увеличение С-14 в поздней древесине 774 г. Учитывая задержку переноса радиоуглерода, образующегося в высоких широтах, авторы предположили, что пик производства радиоуглерода произошел в конце зимы или весной 774 года нашей эры.

В 2013 году вышла еще одна статья Фусы Мияке с двумя соавторами, с данными по содержанию радиоуглерода в кольцах криптомерии японской (*Cryptomeria japonica*), образовавшихся с 600 по 1021 год, с сообщением об обнаружении аналогичного событию 775 года, но чуть меньшего (10%), скачка радиоуглерода в 994 году по сравнению с 993 годом н.э. [15]. В следующем году расширенный коллектив во главе с той же Ф.Мияке воспроизвел этот результат при анализе древесных колец 988-997 года кипарисовика туполистного (*Chamaecyparis obtusa*) из центральной части Японии [16]. В 2017 анализ годичных колец дуба (*Quercus* sp.) из Дании также подтвердил наличие резкого перехода в содержании радиоуглерода с 993 на 994 год [17]

Наконец, в 2018 году вышла обобщающая работа волонтерского консорциума COSMIC [7], где были использованы опубликованные ранее результаты по событиям 774 и 993 годов, а также многочисленные новые данные для этих двух событий с использованием годичных колец деревьев различных видов из разных районов Земли – практически со всех, где построены древесно-кольцевые хронологии, уходящие в прошлое как минимум до 990 года (рис. 4). То есть был проведен анализ двух событий Мияке в глобальном масштабе. Было показано, что в годичных кольцах деревьев различных видов из примерно 40 районов северного и южного полушарий воспроизводится повышение радиоуглерода во время событий 774 или 993 годов.

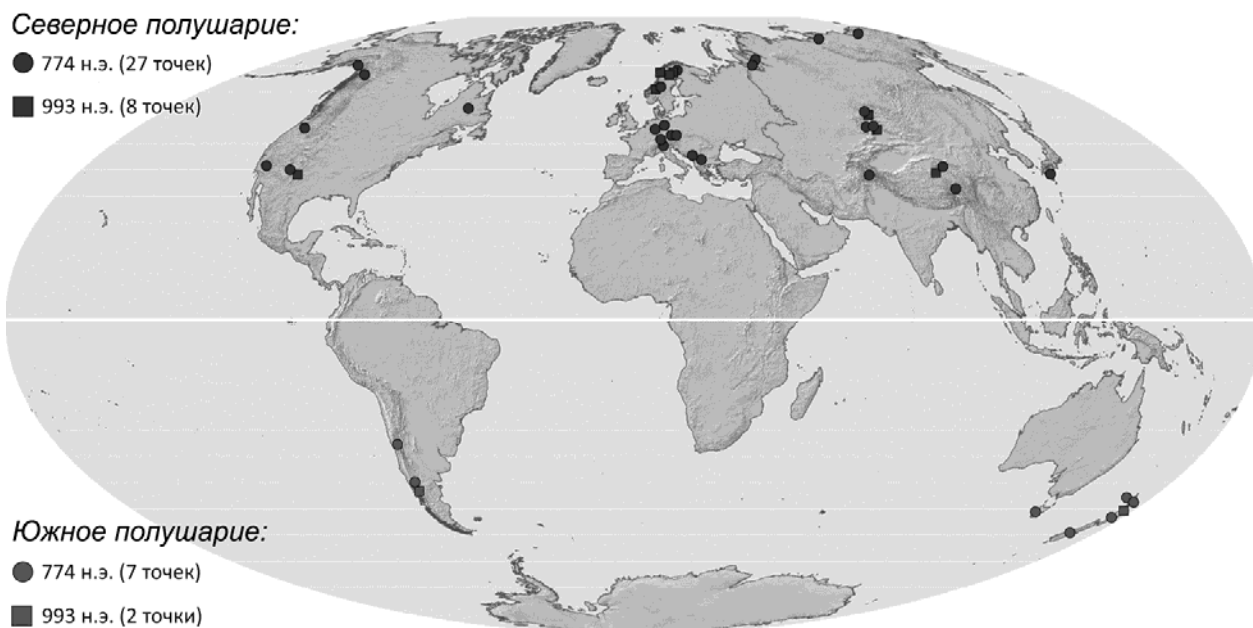


Рисунок 4. Сеть проекта COSMIC, включающая 44 точки, откуда были взяты для анализа образцы годичных колец деревьев [7]

Figure 4. COSMIC project network that includes 44 locations from which samples of tree rings were taken for analysis [7]

Таким образом, многочисленные подтверждения данных первых работ Мияке с соавторами не оставили сомнений в том, что резкие, практически одномоментные, подъемы содержания радиоуглерода в атмосфере Земли действительно имели место.

Следующим шагом стали попытки поиска других подобных событий в прошлом. Воодушевленная первыми успехами Фуса Мияке и ее теперь уже расширенная японско-американская группа поставили целью проверить периоды, где согласно предыдущим данным по 10-летним блокам древесных колец были отмечены повышения содержания радиоуглерода на 3 % в десятилетие. Таких периодов за последние 12 тысяч лет было 15. Сначала проверили изменения содержания С-14 для каждого года около четырех из них: в 2479–2455, 4055–4031, 4465–4441 и 4689–4681 годах до н.э. Исследования были проведены с использованием годичных колец сосны остистой (*Pinus longaeva*) из Калифорнии [18]. Ни в одном из случаев резкие взлеты концентрации радиоуглерода обнаружены не были. Для периода около 4680 г. до н.э. не было вообще обнаружено никакого повышения, даже многолетнего, для остальных трех периодов были

обнаружены многолетние тренды повышения содержания С-14.

Затем тот же коллектив провел такой же анализ для еще одного кандидата, для периода с 5490 по 5411 г. до н.э. [19]. И обнаружил значительный, на 20 %, рост содержания С-14. Но это было не одно событие, а сравнительно длительный процесс, который продолжался 10 лет, с 5481 по 5471 г. до н.э.

В некоторой степени неопределенная картина была выявлена при анализе годичных колец с 690 по 660 г. до н.э., еще одного из периодов, когда согласно 5-летним блокам древесных колец наблюдался рост содержания С-14. В базе данных IntCal09 [20] уже имелись данные по отдельным годичным кольцам сосны остистой (*Pinus longaeva*) для этого периода, где было выявлено постепенное увеличение содержания С-14 с 665 по 660 г. до н.э. (это один из периодов, который был исследован еще до работ Мияке с соавторами). Анализ годичных колец дуба (*Quercus* sp.) из Германии с 670 по 650 г. до н.э. [11] также выявил почти такую же картину – постепенный рост с 665 по 661 г. до н.э. Но более тщательные исследования годичных колец криптомерии японской (*Cryptomeria japonica*) с 669 по 633 г. отдельно по ранней и поздней древе-

сине каждого кольца [21] показали скачок величиной почти 10‰ от поздней древесины кольца 665 года до н.э. до поздней древесины 664 г. до н.э. Но рост содержания продолжался следующие два года, в общей сложности еще на 5 ‰. Такие же тщательные, с разделением на раннюю и позднюю древесину, исследования годичных колец дуба (*Quercus robur*) из Польши, сформированных с 668 по 658 г. до н.э. [22] показали сравнительно длительное, с 665 по 663 год, повышение содержания радиоуглерода. Исследования этого периода продолжают, в работе находятся данные по Ямалу и Алтаю. Но пока вопрос о том, можно ли считать повышение С-14 после 665 г. до н.э. одним событием, остается открытым. Авторы процитированных работ предполагают, что возможно в этот период попали два события.

В 2017 году группа китайский исследовательской заявила об обнаружении события Мияке в 3371 г. до н.э. [23]. В результате анализа 31 годичного кольца (с 3388 по 3358 г. до н.э.) лапины узкокрылой (*Pterocarya stenoptera*) из музея города Ичан в Китае был обнаружен резкий подъем содержания радиоуглерода (на 9‰) с 3372 на 3371 г. до н.э. Однако уже в момент публикации статьи были серьезные сомнения в достоверности полученных результатов, несмотря на высокий авторитет журнала, в котором она была опубликована. По видимому среди рецензентов не было дендрохронологов, поэтому осталась без внимания существенная методическая деталь. Авторы заявляли, что даты формирования колец музейного образца из Китая были определены на основе перекрестной датировки с хронологией по сосне остистой из Калифорнии! Это конечно же совершенно некорректно. По всей видимости, именно из-за этого попытка воспроизвести результат китайских коллег оказалась безуспешной. Для проверки достоверности результатов, полученных в Китае, был проведен анализ отдельных годичных колец сосны остистой (*Pinus longaeva*) из Калифорнии, сформированных в 3392-3351 г. до н.э. и годичных колец дуба (*Quercus* sp.) из Франции сформированных в 3390-3350 г. до н.э. [24]. Ни в одном, ни в другом случае никакого всплеска концентрации С-14 в каком-либо из исследованных колец обнаружено не было. На данный момент нельзя исключить, что ошибка заклю-

чалась только в датировке события, но оно все же имело место примерно в эти века. По мнению авторов работы [24], радиоуглеродные данные допускают, что возможно оно было примерно на 100 лет раньше.

Еще один период, где данные по 5-летним блокам древесных колец указывали на возможное событие Мияке, был исследован в работе [25]. По предварительным данным такое событие могло иметь место в 814-813 г. до н.э. Для проверки этого предположения был проведен анализ годичных колец секвойи (*Sequoiadendron giganteum*) и криптомерии японской (*Cryptomeria japonica*), образовавшихся с 835 по 778 г. до н.э. Данные по секвойе демонстрировали рост содержания радиоуглерода примерно с 810 по 804 г. до н.э. на 10‰, в то время как данные по криптомерии были менее однозначны – изменчивость год от года была довольно высокой, что скорее всего свидетельствовало о методических дефектах. Но общий тренд на повышение тоже проглядывался. Авторы посчитали, что характер изменения содержания радиоуглерода в древесных кольцах в этот период схож с картиной, выявленной для периода около 5480 г. до н.э. [19].

В однозначности своей находки уверены авторы работы, где выявлено еще одно событие Мияке – подъем содержания радиоуглерода с 5410 по 5409 г. до н.э. в среднем на 6‰ [26]. Для подтверждения этого события использованы сразу три источника – годичные кольца сосны остистой (*Pinus longaeva*) из Калифорнии (с 5420 по 5396 г. до н.э.), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) из Финляндии (с 5420 по 5400 г. до н.э.) и лиственницы (*Larix decidua*) из Швейцарии (с 5421 по 5371 г. до н.э.).

В статье [27] получены данные по содержанию радиоуглерода в отдельных годичных кольцах деревьев за последнее тысячелетие, с 969 по 1933 г. н.э. В качестве материала использованы годичные кольца дуба (*Quercus* sp.): современного дерева и древесины с исторических построек в Англии (11 образцов) и Швейцарии (2 образца). Результаты, среди прочего, подтвердили факт события 993 года и выявили еще два события, 1052 и 1279 г. Но авторы назвали их событиями-кандидатами, т.к. подскок содержания радиоуглерода был не очень высоким, около 6‰. Поэтому этот результат требует подтверждения на других видах деревьев из других

районов. Кроме того, событие 1052 недостаточно хорошо согласуется с данными, полученными ранее в работе [28], где авторы анализировали годовые кольца секвойи (*Sequoiadendron giganteum*) из Калифорнии (1038-1068 г.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) из Финляндии (1031-1080 г.). По этим двум видам скачок радиоуглерода в 5-7 % произошел в два этапа, с 1053 до 1055 года. Причины различий в результатах этих исследований обсуждаются в работе [29]. Вероятнее всего несоответствие связано с неверной датировкой колец, хотя авторы предлагают и другие, иногда довольно причудливые, объяснения. Что касается события 1279 года, авторы работы [30] также обнаружили повышение содержания радиоуглерода от 1279 к 1280 году в годовых кольцах туевики японского (*Thujaopsis dolabrata*), но всего лишь примерно на 3%. Авторы этой работы считают, что обнаружили еще два события: от 1268 к 1269 году, где рост содержания C-14 составил около 4,5%, и с 1261 к 1262 году, на 2,2%. Но достоверность этих трех «событий» в данном исследовании сомнительна, несмотря на то, что авторы считают их надежно установленными.

Существенно более определенный результат получен в совместной работе международного коллектива, включавшего и российских дендрохронологов [31]. На основе анализа содержания радиоуглерода в годовых кольцах разных видов деревьев из разных районов Земли были обнаружены еще два ярко выраженных события – 7176 г. до н.э. и 5259 г. до н.э. Событие в диапазоне 7200-7150 г. до

н.э. предполагалось на основе данных низкого разрешения по содержанию космогенных изотопов бериллия-10 и хлора-36 в ледовых колонках. Внутри этого диапазона сузить период поиска помогли данные радиоуглеродной калибровочной кривой IntCal20 [32]. А радиоуглеродная аномалия в середине 53 века до н.э. была предположена из-за того, что радиоуглеродные датировки археологических объектов этого времени давали противоречивые результаты. Событие 7176 года было обнаружено при анализе годовых колец дуба (*Quercus* sp.) из Германии, сформированных в 7220-7123 г. до н.э., и годовых колец лиственницы (*Larix decidua*) из Швейцарии 7196-7147 г. до н.э. Скачок радиоуглерода от 7177 к 7176 г. до н.э. составил у дуба около 15 %, а у лиственницы 20 %. Событие 5259 г. обнаружено в годовых кольцах деревьев из четырех районов Земли – у сосны остистой (*Pinus longaeva*) из Калифорнии, дуба (*Quercus* sp.) из Ирландии, лиственницы (*Larix decidua*) из Швейцарии и лиственницы (*Larix sibirica*) с полуострова Ямал (рис. 5). В трех последних случаях скачок содержания радиоуглерода от 5260 к 5259 г. до н.э. составил 17-19 %. В случае с сосной из Калифорнии подъем был такой же амплитуды, но произошел в два этапа – содержание радиоуглерода увеличилось уже в 5260 году, примерно на 12 % и затем примерно еще на 7 % в 5259 году. Авторы признали, что это скорее всего результат не совсем точного разделения колец, которые в этот период у сосны были очень узкими (менее 0,5 мм).



Рисунок 5. Образец полуископаемой лиственницы с полуострова Ямал № 4756, с помощью которого было обнаружено событие 5259 года до н.э. Звездочкой отмечено кольцо, в котором обнаружен скачок содержания радиоуглерода

Figure 5: Subfossil larch from the Yamal Peninsula No. 4756, which was used to identify 5259BC event. The asterisk marks the ring in which the C-14 spike was discovered

И, наконец, последний по времени результат связан с обнаружением события Мияке за пределами голоцена, 14 300 лет назад [33]. Это событие было обнаружено в годовых кольцах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) из Франции. В одном из деревьев, где был проведен радиоуглеродный анализ каждого кольца, был обнаружен всплеск содержания С-14 с 14300 по 14299 годы до настоящего, т.е. около 12350 г. до н.э., сразу на 30 %. Такое резкий перепад подтверждается и тем, что значения для этих двух соседних колец согласуются с содержанием радиоуглерода в нескольких кольцах до и после события. Точность датировки колец по утверждению авторов составляет ± 3 года (одна сигма).

Таким образом, к настоящему времени можно с относительно высокой надежностью говорить о том, что за последние 14,5 тысяч лет выявлено пять событий Мияке: около 12350 г. до н.э., в 7176, 5259 г. до н.э., а также в 774 г. и 993 г. н.э. Еще три события, 5410 г. до н.э., 1052 и 1279 г. н.э., ждут своего подтверждения. На рис. 6 представлена интенсивность перечисленных событий, выраженных в килограммах дополнительного радиоуглерода, образованного во время этих событий по [31]. На этом рисунке нет события 12350 г. до н.э., т.к. о нем стало известно позже. А событие 660 г. до н.э. внесено без серьезных оснований.

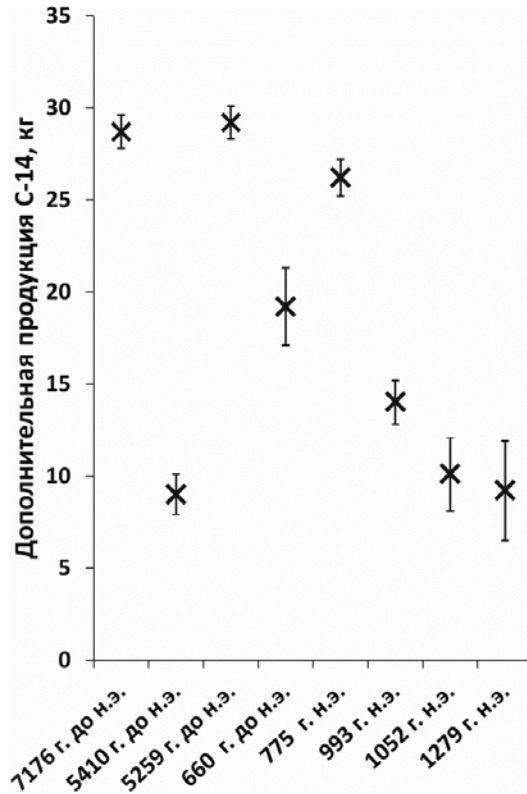


Рисунок 6. Интенсивность событий Мияке, выраженная в килограммах дополнительного радиоуглерода, образованного во время события.

В среднем за один год без событий Мияке в атмосфере Земли образуется около 7-8 кг радиоуглерода (по [31])

Figure 6. Intensity of Miyake events expressed in kilograms of additional radiocarbon produced during the event. On average, in one year without Miyake events, about 7-8 kg of radiocarbon is produced in the Earth's atmosphere (according to [31])

Возможные причины резкого роста радиоуглерода в атмосфере во время событий Мияке

В обычных условиях радиоактивный изотоп углерода С-14 постоянно образуется в верхних слоях атмосферы, на высоте 9-15 км, когда галактические космические лучи — частицы высокой энергии из космоса, чаще всего протоны — сталкиваются с атомами молекул газа, порождая нейтроны. Когда один из этих нейтронов выбивает протон в атоме азота, этот азот превращается в С-14. Углерод окисляется до углекислого газа и может быть поглощен деревьями в процессе фотосинтеза.

Скорость образования углерода-14 не постоянна, она зависит от интенсивности потока галактических космических лучей, вспышек сверхновых звезд, гамма-всплесков, активности Солнца, в том числе его магнитного поля, силы магнитного поля Земли, испытаний ядерного оружия в атмосфере. Изучая активность углерода-14 в годичных кольцах деревьев можно восстановить скорость образования этого изотопа в атмосфере.

В своей первой работе 2012 года Мияке с соавторами [1] посчитали, что резкий подъем содержания радиоуглерода в атмосфере в 774-775 г. нельзя объяснить ни вспышкой ближайшей сверхновой, ни солнечной вспышкой. По данным их моделирования уровень и скорость роста содержания радиоуглерода подразумевали такой поток частиц высокой энергии в очень короткий промежуток времени, который в десять раз превышал бы суммарное воздействие, производимое галактическими космическими лучами в течение года. Если бы это была вспышка сверхновой, объясняли авторы, то такое количество радиоуглерода могло быть произведено только при относительно близком расположении объекта. И этот объект был бы необыкновенно ярким, что не могло быть не отмечено в летописях. Но никаких подобных исторических свидетельств для того времени нет. А мощность солнечной вспышки, как подсчитали авторы предположив и такой вариант, должна была быть как минимум в 1000 раз выше, чем наблюдаемые солнечные вспышки. Это противоречило бы теоретическим представлениям о физических свойствах Солнца. Поэтому Мияке с соавторами сделали заключение, что при современном уровне знаний невозможно определить причину выявленного события.

Сразу после этой публикации посыпались работы с попытками объяснить необъясненное. Хотя с самого начала предпочтение среди специалистов отдавалось версии мощной солнечной вспышки, предлагались и другие варианты. Например, в [34] предлагалась дополненная версия сверхновой. Запись в Англо-Саксонской летописи за 774 год включает такое наблюдение: «в этом году на небе после захода солнца появилось красное распятие». Автор считает, что эта запись наме-

кает на наличие сверхновой, которая была скрыта за пылевым облаком, рассеивающим и поглощающим весь свет, кроме красного цвета.

Но позднее версия о вспышке сверхновой не получила развития. В работе [35] проведено сравнение дат вспышек сверхновых с данными радиоуглеродного анализа годичных колец деревьев за последние две тысячи лет. На момент публикации не все периоды, когда наблюдались сверхновые, были исследованы на предмет поиска событий Мияке. Поэтому авторы статьи провели анализ радиоуглерода в годичных кольцах дуба (*Quercus robur*) из Великобритании с 6 по 1 г. до н.э. (покрывает период наблюдения «Вифлеемской звезды»), в годичных кольцах секвойи (*Sequoiadendron giganteum*) из Калифорнии с 183 по 186 г. (около 185 г., даты сверхновой по данным китайских летописей), в годичных кольцах дуба (*Quercus robur*) из Великобритании с 1004 по 1010 г. (до и после даты сверхновой 1006 года, известной по многим источникам как в Западном, так и Восточном полушариях как самая яркая звезда за всю историю наблюдений). Данные отдельных годичных колец для более поздних периодов уже были опубликованы ранее. По результатам этой статьи можно сделать вывод, который позднее был подтвержден данными древесных колец для IV века, о том, что ни одно из девяти известных из исторических хроник наблюдений сверхновых за последние две тысячи лет – 4 г. до н.э., 185, 386, 393, 1006, 1054, 1181, 1572, 1604 г. н.э. – не совпало ни с одним из четырех событий Мияке за это время – 774, 993, 1052, 1279 г. н.э. (включая события-кандидаты). Однако заметно, что даты сверхновой 1054 года и события-кандидата 1052 года близки. Выше упоминалось, что в работе [28] на двух видах деревьев была получена более поздняя дата события, 1054-1055 г. Поэтому авторы допускают, что в данном случае вероятной причиной повышения содержания радиоуглерода в атмосфере Земли был взрыв сверхновой 4 июля 1054 года, следы которого известны как Крабовидная туманность. Нельзя окончательно отвергать в качестве причины событий Мияке вспышки сверхновых еще и потому, что в летописях отсутствуют данные о сверхновых, которые могли наблюдаться в Южном полушарии.

Короткий гамма-всплеск в нашей Галактике предложен в качестве причины в работе [36]. Эти всплески происходят при слиянии двух нейтронных звёзд или чёрной дыры и нейтронной звезды. По мнению авторов, такое объяснение согласуется со всеми наблюдательными данными и обеспечивает необходимую энергию в соответствующем спектральном диапазоне. Более солидную базу под эту версию события 774 года подвели российские астрофизики [37]. Они даже указали возможный источник этого гамма-всплеска и предложили способы верификации своей гипотезы на основе анализа радиоактивных изотопов хлора и бериллия в ледовых колонках Антарктиды и Гренландии. Если предположение о гамма-всплеске верно, то содержание космогенного изотопа хлора-36 должно быть больше, чем бериллия-10. Которого, в свою очередь, в антарктических льдах должно быть больше, чем в Гренландии. Впоследствии эта проверка не дала ожидаемых результатов.

Версию с падением на Землю кометы предложили в работе [38]. Авторы основывались на данных по содержанию радиоуглерода в слоях кораллов, проанализированных с разрешением в две недели. Но абсолютная датировка была проведена ториевым методом с точностью в полтора десятка лет. В скелетах кораллов из Южно-Китайского моря было зафиксировано значительное увеличение содержания радиоуглерода в одном из слоев, который авторы приписали 773 году, хотя датировка давала 783 ± 14 год. В начале этого года содержание C-14 увеличилось и оставалось повышенным более 4 месяцев, в конце весны был еще более выраженный всплеск, за которым последовали два меньших всплеска. Аномалии содержания радиоуглерода совпали со столкновением кометы с атмосферой Земли 17 января 773 г. н.э., выявленным на основе китайских летописей. Известно, что кометы содержат азот и подвергаются воздействию космического излучения в космосе. Поэтому можно ожидать, что они будут содержать сильно повышенную долю радиоактивного C-14 по сравнению с земной атмосферой. Эта кометная версия так и не получила развития и поддержки, т.к. была уж слишком прилепленной к факту упоминания кометы в летописях за

773 год. Во-первых, датировка события Мияке была подтверждена в глобальном масштабе многочисленными независимыми исследованиями (см. выше). Т.е. событие произошло на год позже упоминания кометы. Во-вторых, кометная версия не объясняет повышенное содержание других «космических» изотопов (бериллий-10, хлор-36), да и предположение о повышенном содержании углерода-14 в кометах было лишь предположением, в третьих, в работе [39] показано, что в китайских летописях при описании кометы 773 года нет никаких указаний на то, что она упала, т.е. попала в атмосферу Земли. Ее просто наблюдали в небе. Ну и, наконец, соотношение изотопов углерода в океане, где обитают кораллы, не могло так быстро отреагировать на событие в атмосфере.

Не менее экзотическая версия предложена в работе [40]. Авторы также предположили падение кометы. Но не на Землю, а на Солнце. Посчитав, что это падение могло спровоцировать очень мощный выброс высокоэнергетических частиц в солнечной короне.

В литературе встречаются и предположения о земном источнике гамма-излучения, которое может привести к повышению уровня радиоуглерода в атмосфере [41] (см. ниже). Но большинство реалистичных объяснений связывают события Мияке с процессами на Солнце, без привлечения каких-либо дополнительных факторов.

Первая работа, указывающая на некоторые ошибки в подсчете мощности события в статье Мияке с соавторами 2012 года вышла в том же году [42]. Было показано, что при исправлении некоторых неточностей в этой модели становится вероятным предположение о супермощной солнечной вспышке. Позже примерно тот же состав авторов признал [43], что среди возможных причин события Мияке лишь солнечная вспышка является в действительности возможной.

Более серьезные претензии к моделированию скорости образования радиоуглерода в атмосфере, которую использовали японские исследователи, предъявлены в работе [4]. Авторы посчитали, что Мияке с соавторами упростили модель, исключив из моделирования океаны, чего делать нельзя,

так как океаны являются основным резервуаром радиоуглерода на Земле. В результате расчетная скорость образования углерода-14, соответствующая обнаруженной аномалии 774 года, снизилась в пять раз, и необходимость привлекать невероятные, неизвестные до сих пор источники космических лучей отпала. Всё оказалось объяснимо за счет аномально сильной активности Солнца. В районе 774 года н.э. произошла самая сильная вспышка на Солнце за последние тысячи лет, но всё же не выходящая за пределы понимания современной физики. Позже основные авторы этой статьи [44] уточнили, что экстремальные солнечные события, приводящие к резкому росту содержания радиоуглерода в атмосфере Земли, представляют собой хвост непрерывного распределения солнечных вспышек, а не новое неизвестное явление. Хотя открытое недавно более мощное событие около 12350 г. до н.э. возможно приведет к корректировке такого взгляда. Впрочем, нужно иметь в виду, что судить о мощности солнечной вспышки на основе количества дополнительной продукции радиоуглерода в атмосфере Земли не совсем корректно. Поток космических лучей, который проникает в атмосферу и приводит к образованию радиоуглерода, регулируется также магнитным полем Земли. А мощность магнитного поля в прошлом не была постоянной. Согласно реконструкциям геомагнитного поля в течение последних тысячелетий [45, 46], сила магнитного поля 14,3 тысяч лет назад была намного ниже, чем во время события 774 года. Поэтому более высокий всплеск радиоуглерода около 12350 г. до н.э. возможно не означает более мощную солнечную вспышку. Наверняка в ближайшее время такие расчеты будут произведены. Как это было сделано для событий 7176 и 5259 г. до н.э., которые привели к большому образованию радиоуглерода в атмосфере Земли, чем событие 774 года, но тем не менее, согласно расчетам [31], были вызваны менее мощными вспышками. Кроме того, что касается доголоценовой вспышки, в условиях климата ледникового периода геохимический цикл углерода имел свои особенности, поэтому современные (голоценовые) модели обмена к тем условиям вряд ли применимы. Поэтому возможно, что более высокий подскок содержания радиоуглерода в атмосфере

14300 лет назад по сравнению с голоценовыми событиями не означает более мощную вспышку на Солнце.

Для доказательства «солнечной» природы событий Мияке 774 и 993 годов авторы работы [47] использовали анализ радиоактивных изотопов не только в древесных кольцах (углерод-14), но и в слоях ледников Гренландии и Антарктиды (хлор-36 и бериллий-10). Эти радионуклиды образуются по разным путям реакций, которые имеют разную энергетическую зависимость. Бериллий-10 получается из кислорода или углерода в результате реакции выбивания, при котором ядро расщепляется на несколько продуктов после взаимодействия с высокоэнергетической частицей. Хлор-36 образуется в атмосфере в результате расщепления аргона при взаимодействии с протонами космических лучей. Измерения изотопов дали однозначное свидетельство симметричного образования и осаждения бериллия-10 на обоих полюсах (биполярная симметрия) во время события и повышенное образование этого изотопа по сравнению с хлором-36. Эти факты однозначно исключают гипотезы о падении кометы или гамма-всплеске и укладываются в гипотезу солнечного протонного события. Эти солнечные события характеризовались очень жестким энергетическим спектром.

Доводы в пользу того, что причиной событий Мияке являются экстремальные солнечные вспышки (протонные события) приводятся в обзоре [48]:

1. Производство изотопа C-14 было симметричным между северным и южным полушариями, что указывает на то, что этот рост вызван не точечным источником;

2. Производство радиоуглерода было выше в полярных регионах, что указывает на магнитосферное экранирование этого события и, следовательно, на заряженные частицы как на его источник;

3. Соотношение продукции различных изотопов во время событий Мияке (C-14, Be-10 и Cl-36) исключает гамма-лучи как причину этих событий, но полностью соответствует типичному жесткому спектру очень сильного события солнечных частиц высокой энергии;

4. Событие было коротким, продолжительностью менее нескольких месяцев, что исключает изменчивость галактических космических лучей или вариаций геомагнитного поля;

5. События Мияке не являются уникальными в масштабе тысячелетий, что исключает их экзотическое происхождение.

Поиски подтверждений гипотезы солнечных супервспышек в летописях

Таким образом, наиболее вероятной причиной событий Мияке принято считать сверхмощные солнечные вспышки – взрывные процессы выделения энергии в атмосфере Солнца, которые часто сопровождаются выбросом корональной массы. А такие события должны приводить к появлению полярных сияний даже в низких широтах. Поэтому исследователи обратились к древним летописям, где могли быть данные о полярных сияниях, для подтверждения солнечной гипотезы. Первой в связи с событиями Мияке была ссылка на упоминавшееся выше «красное распятие», которое наблюдали в 774 году [34]. Хотя автор считал, что это мог быть след сверхновой, но в описании события в англо-саксонской хронике были упомянуты «удивительные змеи», что практически однозначно указывало на полярное сияние. Но позднее вышли работы более профессиональных исследователей летописей, где для этого описания приводится другая дата, 776 год. Надо сразу отметить, что чтение публикаций на тему поиска описаний полярных сияний в летописях заставляет задуматься об уровне профессионализма их авторов. Особенно в части правильного определения дат события. Сведения разных авторов во многом дублируются, т.к. разные группы исследователей в последующие 5-7 лет независимо изучали либо оригиналы летописей Европы, Ближнего и Дальнего Востока и Китая, либо научные публикации, в которых был уже проведен анализ упоминаний в этих летописях небесных явлений. В целом данные этих работ совпадают, но иногда разные авторы по-своему интерпретируют одни и те же описания, а в некоторых случаях приводят разные версии датировок одних и тех же записей.

Свидетельства из англо-саксонских, других западноевропейских и китайских летописей приведены в работе [4]. Авторы ссылаются на возможно неправильный перевод описания сияния 774 года (776?), где вместо «красного креста» правильное было бы читать «красный знак Христа». Тогда более правдоподобной версией выглядит предположение, что подразумевалось полярное сияние. В этой работе приводятся также упоминание в западных хрониках «огня с небес» в Ирландии в 772 году, «всадников на белых конях» в Германии в 773 году, «воспламененных щитов» в небе Германии в 776 году. В китайских летописях описания явления, которое можно отнести к полярному сиянию, отмечены в 770, 773 и 775 годах (даты сомнительны). Авторы тем не менее справедливо считают, что все эти упоминания свидетельствуют о высокой солнечной активности между 770 и 776 годами, но вряд ли относятся к одному событию.

Сообщения о полярных сияниях в летописях в качестве доказательства солнечной версии событий Мияке приводятся в работах [49][50]. В династической хронике империи Тан описывается явление в январе 775 года (здесь определенно ошибка в дате, описанное событие произошло в начале 776 года) более десяти полос белого света на востоке над Луной, подобно расстелившемуся шелку, пронизывающих и охватывающих восемь больших созвездий. В этой же статье приводятся данные из Энциклопедии библейской, богословской и церковной литературы 1894 года о «небесных огнях» в 775 году. На основе этих записей авторы делают вывод, что событие Мияке произошло в начале 775 года. Но, как было отмечено выше, результаты анализов древесных колец указывают на то, что событие произошло в 774 году.

Данные из арабских источников о некоем небесном событии 775 года приведены в работе [51]. Авторы посчитали, что описанное явление в конце лета 775 года, которое наблюдалось по пути из Багдада в Мекку, могло быть подтверждением версии о коротком гамма-всплеске или вспышке сверхновой. Но все же приходят к выводу, что это было наблюдение болида, поэтому к событию Мияке отношения не имеет.

Результаты поисков описаний в китайских летописях каких-либо явлений, которые подтверждали бы солнечную версию для событий Мияке 774-775 и 993-994 годов представлены в работе [41]. Авторы провели поиск сведений за 770-780 годы в книге Цзю Тан шу, которая представляет собой историю династии Тан за 618-907 годы, где в двух выпусках особенно подробно описаны астрономические явления; в книге Синь Тан шу, которая также является официальной книгой по истории династии Тан, но содержит более подробные материалы, а также описание астрономических явлений; в книге «Цзыжи тунцзянь», представляющий собой обширный труд по истории периода 403 г. до н.э. - 959 г. н.э., и в ряде современных книг и статей, таких как "Общий каталог древних астрономических записей Китая", "Новый каталог древних сверхновых" и "История астрономии Китая" (из последней почерпнуты сведения о событиях 993-994 годов). Всё, что обнаружили авторы – сведения о более сильных грозах в 775 году по сравнению с соседними годами. На этом основании делается вывод, что ни сверхновые, ни солнечные вспышки не являются причинами событий Мияке. Возможными остаются лишь короткие гамма-всплески либо земные источники гамма-всплесков – грозы.

Обзор сообщений в хрониках Восточной Азии, касающихся упоминания комет и полярных сияний – на основе анализа работ исследователей рукописей – приведен в работе [52]. Авторы пришли к выводу, что ни одно из событий после 770 г. н.э. на самом деле не было полярным сиянием, включая событие в 776 г. н.э. (которое было ошибочно датировано в других работах 774 или 775 г.). Наблюдавшееся явление белого цвета, произошедшее над Луной, скорее всего было эффектом гало вблизи полнолуния – в любом случае слишком поздно, чтобы быть связанным с событием Мияке в 774-775 г. Некоторые весьма вероятные истинные проявления полярных сияний в Китае были зарегистрированы в 762 г.

Результаты наблюдения за небом, зафиксированные в летописях Восточной Азии и Европы около 774-775 и 993-994 гг. н.э., рассмотрены в работе [53]. Среди них - сообщения о сверхновых, кометах, солнечных пятнах и полярных сияниях.

Отвечая на вопрос «Действительно ли годы около 774-775 и 993-994 г. были необычными по частоте появления полярных сияний, особенно в истории Восточной Азии, где велся достаточно последовательный учет?» автор делает вывод, что нет. В китайских летописях есть лишь одно надежное упоминание – в начале 776 года. Для Европы только одно, менее определенное, упоминание о «знаке в виде креста» где то в 773 или 774 году (ошибка в дате?). Для второго события есть лишь одно надежное упоминание в китайских летописях для 996 года и одно менее определенное указание из Кореи в 992-993 году. Но есть два европейских наблюдения в 992-993 годах. Однако, для периодов до и после этих событий имеются не менее надежные данные о небесных событиях, поэтому возможно совпадения некоторых наблюдений с датами событий Мияке случайны.

Анализ всех, по заверению авторов, известных сообщений о полярных сияниях из Европы, Ближнего, и Дальнего Востока с 731 по 825 г. н.э. проведен в работе [54]. Авторы обнаружили 39 сообщений о вероятно истинных полярных сияниях плюс еще четыре потенциальных сообщения об этом, и 24 других сообщения об ореолах, метеорах, грозах и т.д., которые ранее, по мнению авторов, были неправильно интерпретированы как полярные сияния или неверно датированы. С большой вероятностью истинные полярные сияния наблюдались в 743, 745, 762, 765, 772, 773, 793, 796, 807 и 817 годах нашей эры. В начале 770-х годов в окрестностях Амиды (ныне г. Диярбакыр в Турции, недалеко от турецко-сирийской границы) наблюдались два полярных сияния, которые были не только красными, но и зелено-желтыми. Находясь на относительно низкой геомагнитной широте (43-50° согласно различным реконструкциям геомагнитного полюса), они свидетельствовали о достаточно сильной солнечной буре. Однако нельзя утверждать, что эти полярные сияния могут быть связаны с солнечной супервспышкой, вызвавшей повышение содержания C-14 около 775 г. Существует несколько сообщений о низко- и среднеширотных полярных сияниях на геомагнитной широте 32-44° в Китае и Ираке, некоторые из них, вероятно, наблюдались одновременно в двух из трех областей

(Европа, Византия/Аравия, Восточная Азия). Одно продолжалось несколько ночей, а некоторые (в 745, 762, 793, 807 и 817 г.) указывают на особенно сильную геомагнитную бурю (красный цвет и состоящие движения). То есть отсутствуют надежные свидетельства о чем то необычном во время события Мияке.

Серия работ была опубликована Науакэва с соавторами, целью которых было изучение и компиляция записей наблюдений солнечных пятен и полярных сияний в китайских летописях, с особым вниманием к периодам событий Мияке, из как можно большего числа источников и предоставление этих записей научному сообществу в виде цифровых данных. Поиск информации в летописях был автоматизирован и велся по ключевым словам, таким как «черное пятно» (пятна на Солнце) или «красный дым» (полярные сияния). В первой из этой серии работ [55] приводятся данные официальной хроники Сун ши династии Сун (960-1279 гг. н.э.). Всего по этой летописи было выявлено 193 возможных упоминаний полярного сияния и 38 возможных упоминаний солнечных пятен. Ни одно из них не совпало с событием 993 года. Но, согласно этим данным, было возможное упоминание полярного сияния белого цвета 13 декабря 1052 года, в год который позднее был предложен в качестве года события-кандидата [27]. В следующей работе этого коллектива [56] предложено использовать выражения «необычная радуга» и «белая радуга» как обозначения полярных сияний. При таком подходе авторы считают, что обнаружили в японской официальной истории Сёку нихонги (697-806 г.) нового кандидата в полярное сияние 16 июня 775 года, когда «белая радуга заполнила небо». Очередная работа из этой серии посвящена поиску возможных упоминаний солнечных пятен и полярных сияний в японских летописях Риккокуси с начала 600-х до 887 года [57]. В этой работе обнаружено одно вероятное упоминание солнечных пятен и 13 кандидатов в полярные сияния. Ни одно из них даже приблизительно не совпадает с событием 774 года. В работе [58] проведен анализ пяти китайских источников периода династий Суй, Тан, Пяти Династий и Десяти Царств, с 581 по 959 г.

Всего было выявлено 16 кандидатов в описание солнечных пятен и 45 возможных описаний полярных сияний. Совпадений с событием 774 года опять не было. Ближайшие к этой дате наблюдения «полярных сияний» были в августе 773 года и январе 776 года. В древних летописях оставлены не только словесные описания, но и рисунки небесных явлений. В работе [59] приведены возможно самые ранние рисунки датируемых полярных сияний и двухвостой кометы в окрестностях Амиды, содержащиеся в рукописи сирийской хроники Зукнин. Наиболее близкими к событию Мияке полярные сияния зафиксированы в 771/772 г. («при сборе урожая») и в июне 773 года. Последняя статья из этой серии охватывает период 1261-1644 г. [60]. В этой работе представлены результаты исследования записей солнечных пятен и кандидатов в полярные сияния в китайских официальных историях Юань ши и Мин ши за 1261-1368 и 1368-1644 годы, основанных на непрерывных наблюдениях с хорошо оформленными отчетами, проведенных профессиональными астрономами. В первой из летописей были обнаружены 20 возможных наблюдений полярных сияний, а во второй 10 возможных полярных сияний и 26 возможных наблюдений солнечных пятен. Для этого периода позднее было предложено одно возможное событие Мияке, в 1279 году. Но единственным ближайшим к этой дате было наблюдение полярного сияния в 1261 году.

Критический анализ серии перечисленных выше статей, опубликован [61]. Авторы считают, что имеются серьезные недостатки цифрового метода поиска событий, примененного в этих статьях. Кроме того, имеются ошибки перевода, не цитируются большинство других статей, в которых ранее были представлены вероятные истинные описания солнечных пятен и полярных сияний в летописях, игнорируются филологические и исторические работы, например, касающиеся исправления дат из-за ошибок переписчиков. Многие предполагаемые новые полярные сияния и солнечные пятна были ранее отвергнуты другими авторами, поскольку они с гораздо большей вероятностью являются другими астрономическими или атмосферными явлениями, например, особенно красными восходами и

закатами или хорошо известными кометами; многие белые и необычные радуги вполне могут быть оптическими явлениями, в частности, явлениями гало.

Контраргументы против этой критики и слишком строгих критериев определения полярных сияний в летописях приводятся в статье [62]. На примере описаний полярного сияния 17 ноября 1882 года (действительного события) показано, что они не удовлетворили бы большинству критериев, предъявляемым к «истинным» полярным сияниям по версии [54][61] – оно наблюдалось на южной стороне неба, а не на северной, было расположено около луны, имело беловатый цвет. Т.е. считалось бы лунным гало по мнению этих авторов. Особое внимание уделено описанию свечения 12-13 января 776 года и сделан вывод, что это было полярное сияние.

К уточнению даты и реальности полярного сияния в период около события Мияке 774 года, описанного в англо-саксонских летописях, вернулись позже авторы работы [63]. Согласно их анализу, это было действительно полярное сияние, а его датировка ограничена интервалом между 25 марта 775 года и 25 декабря 777 года. То есть это полярное сияние не связано с событием Мияке 774 года.

Исторический каталог полярных сияний, наблюдавшихся в Анатолии и Константинополе, а также свод арабских источников на Ближнем Востоке с начала нашей эры до 1453 года, составленный в предыдущие десятилетия исследователями древних летописей (в том числе процитированных выше), проанализирован в работе [64]. В этом каталоге 21 историческое наблюдение полярных сияний, зарегистрированных в Анатолии и Константинополе и 40 событий на Ближнем Востоке. Среди последних наиболее близким по времени к известным событиям Мияке является потенциальное наблюдение 5 августа 1050 года.

Обновленный каталог возможных упоминаний полярных сияний в корейских летописях представлен в работе [65]. Авторы использовали хроники Корьё-са (918–1391 г.), Анналы династии Чосон (1392–1910 г.), и Дневники королевской канцелярии (1623–1910 г.) и выявили 203 упоминаний полярных сияний для периода с 1012 по 1811 г. Для

периода Корьё-са, где возможен поиск совпадений с событиями Мияке, выявлено 192 возможных кандидата в полярные сияния. Среди них два возможных описания для 1277 года и два для 1278 года («красный пар») близки к дате события-кандидата 1279 года. Но при таком большом числе описаний-кандидатов (в среднем одно в два года) возможно это лишь совпадение. Необходим дальнейший более подробный анализ соответствия описаний полярному сиянию, а не другим оптическим явлениям в атмосфере.

Российские летописи пока широко не использовались для поиска сведений о каких-либо небесных явлениях в периоды событий Мияке. Можно отметить, что среди возможных кандидатов имеется описание, опубликованное в [66] для 1277 года: «В сие лето видеша на небе свет, яки бы небо отверзто». Авторы считают, что речь идет о полярном сиянии. Эта дата близка к кандидату в события Мияке 1278-79 года.

Таким образом, данные летописей не дают надежных подтверждений в пользу предположения, что события Мияке, как следствия сверхмощных солнечных вспышек, приводят к необычным полярным сияниям в низких геомагнитных широтах. Наиболее реальным кандидатом для подтверждения события Мияке 774 года представляется упоминание полярных сияний летом 773 года в японских, китайских и сирийских источниках. Но при условии, что время запаздывания отклика в древесных кольцах на солнечную супервспышку немного недооценено. Например из-за низкой скорости перемешивания вновь образовавшегося радиоуглерода в атмосфере или из-за того, что для формирования ранней древесины годичного кольца возможно используется углерод, запасенный в вегетационный период предыдущего года. В целом, на основе летописей видимо можно выявлять периоды с большей или меньшей частотой наблюдений полярных сияний, но трудно приписать конкретное наблюдение к конкретному событию Мияке.

Использование событий Мияке для понимания солнечных процессов и оценки вероятности угрозы супервспышек

Несмотря на неоднозначные результаты поиска свидетельств в летописных источниках в пользу солнечной природы событий Мияке, астрофизики и специалисты смежных дисциплин практически не сомневаются в том, что причиной этих событий являются сверхмощные протонные события на Солнце. Поэтому открытие событий Мияке стимулировало исследования процессов на Солнце, в особенности изучение вероятности супервспышек. До последнего времени о повторяемости супервспышек и их потенциальном энергетическом максимуме судили по наблюдениям за солнцеподобными звездами. Однако при сравнение данных по частоте событий Мияке и по частоте супервспышек на солнцеподобных звездах выявились нестыковки.

В работе [31] выполнен примерный расчет повторяемости супервспышек на Солнце. Эти расчеты подкорректированы здесь с учетом последних публикаций. Растущее число открытий сильных солнечных вспышек, произошедших на Земле за последние 14 300 лет, свидетельствует о том, что их уже нельзя считать чрезвычайно редкими. Пока только несколько периодов, охватывающих в общей сложности 2430 лет из последних 14 300 лет (17%), были проанализированы на содержание радиоуглерода с разрешением в один или два года, необходимым для однозначного обнаружения солнечных протонных событий. В результате выявлено пять таких событий. Или, если учитывать и события-кандидаты, восемь событий (рис. 6). Из этих данных можно сделать вывод, что события Мияке происходят в среднем один раз примерно в 300-500 лет. Однако эта простая статистика скорее всего необъективна из-за того, что не все изученные временные периоды были выбраны случайным образом. Некоторые из них были выбраны на основании показаний космогенных данных более низкого разрешения или других косвенных свидетельств. В маловероятном случае, когда все крупные события за последние 14 300 лет уже обнаружены, верхний предел повторяемости сильных солнечных протон-

ных событий можно оценить как пять (восемь) событий за 14 300 лет или одно событие в 1800-2800 лет. Тем не менее можно ожидать, что по мере получения дополнительных данных с разрешением в один год будет обнаружено больше событий, что позволит получить более точные оценки частоты возникновения и величины сильных солнечных протонных событий.

Оценка частоты возникновения сильных солнечных вспышек показывает, что они происходят чаще, чем это следует из статистики супервспышек на солнцеподобных звездах (раз в 3000-6000 лет [67]). Следует также иметь в виду, что события Мияке свидетельствуют лишь о тех супервспышках, последствия которых были заметны на Земле. Но не любая вспышка на Солнце приводит к солнечному протонному событию на Земле. Очень важно расположение вспышки на солнечном диске относительно Земли. В некоторых случаях частицы высокой энергии пройдут мимо планеты, или могут вызвать протонное событие с очень мягким спектром, которое не способно производить космогенные изотопы. Если же вспышка случится на западном лимбе Солнца, то она будет хорошо связана с Землей силовыми линиями межпланетного магнитного поля [68]. Для таких вспышек и корональных выбросов массы может ожидаться хорошее солнечное протонное событие с достаточно жестким спектром. То есть, сверхмощные вспышки на Солнце скорее всего происходили чаще, чем можно судить по событиям Мияке. Таким образом, неувязка с данными по солнцеподобным звездам даже выше. Но, по мнению специалистов, это не является каким-то неразрешимым противоречием, а требует объяснения, моделирования, развития физики.

В связи с тем, что нижний предел оценки повторяемости событий Мияке составляет всего 300 лет возникает вопрос о том, насколько опасны будут эти события для человеческой цивилизации.

У Солнца может быть три вида эмиссии – электромагнитное (например гамма-лучи, рентгеновское, радиоизлучение), в виде частиц (в основном протонов) и плазмы (корональный выброс массы, солнечный ветер). События Мияке являются

отражением вспышек, связанных с выбросом высокоэнергетических частиц. Но такие вспышки обычно сопровождаются корональными выбросами массы.

Во время всплесков солнечной активности, например мощных вспышек или быстрых выбросов корональной массы, потоки энергии и вещества от Солнца могут представлять опасность как для технологической инфраструктуры, так и непосредственно для человека. Рентгеновское излучение во время таких событий может вносить помехи в радиосвязь и заглушить систему глобального позиционирования. Протонное излучение может выводить из строя аппаратуру спутников и представлять радиационную опасность для пассажиров самолетов на полярных трассах.

Самая сильная вспышка за время инструментальных наблюдений, которые ведутся с 1940-х гг., произошла 23 февраля 1956 года. Было зафиксировано 50-кратное превышение нормального уровня космических лучей. Событие Мияке 774 года было примерно в 30-70 раз еще более мощным. Протонное излучение такой силы как при событии 774 года приведет к дозе облучения пассажиров самолета, которая выберет лимит допустимой нормы для всей жизни. С большой вероятностью выйдут из строя все спутники, находящиеся за пределами магнитосферы. Это будет означать потерю навигации и множества других сервисов, от которых мы сейчас зависим. Эффект солнечных вспышек в первую очередь скажется на стратосфере приполярных регионов, где произойдет ионизация нейтральных молекул, которая в свою очередь приведет к разрушению озонового слоя. Максимальное снижение среднемирового общего содержания озона будет порядка 8,5% [69]. Это приведет к критическому усилению ультрафиолетового излучения, особенно в приполярных районах.

Корональные выбросы массы, которые обычно сопровождают крупные солнечные протонные события, приводят к геомагнитным бурям. Эти бури могут нарушить работу электросетей. Оценить в этом аспекте возможные последствия событий Мияке, которые с большой вероятностью сопровождались корональным выбросом массы, можно при сравнении с событием Каррингтона, слу-

чившегося 1 сентября 1859 года. Эта вспышка на Солнце, которая сопровождалась выбросом плазмы, не оставила следов в древесных кольцах, то есть была намного слабее тех, что приводили к событиям Мияке. Тем не менее, согласно отчету Совета по космическим исследованиям, экономические издержки от солнечного шторма уровня события Каррингтона могут составить от 1 до 2 трлн долл. только в течение первого года, с периодом восстановления от 4 до 10 лет, причем больше всего пострадает городское население. Длительное отключение электроэнергии может привести к возврату общества к практике XIX века [70].

Таким образом, катастрофических последствий для здоровья людей сверхмощные солнечные вспышки, приводящие к событиям Мияке, не представляют. Однако если это случится в наше время, то цивилизации придется тяжело.

В этом разделе следует также обратить внимание на то, что в результате поисков в древесных кольцах следов событий Мияке были обнаружены нескольких периодов, когда содержание радиоуглерода в годовых кольцах деревьев росло очень существенно, но не одномоментно, а на протяжении 3-10 лет: 5481-5471 г. до н.э. [19], 810-804 г. до н.э. [25], 665-660 г. до н.э. [20], [11] и др. Такое неодномоментное повышение наверняка имело иную природу, и скорее всего связано не со сверхмощными вспышками, а существенными, но длительными изменениями активности Солнца [71]. Кроме того, поиски событий Мияке привели к появлению крупных проектов по анализу содержания радиоуглерода в древесных кольцах с разрешением в один год для всей эпохи голоцена. В результате уже опубликованы такие данные за последнюю тысячу лет [27]. Эти данные стали основой для исследований в разных направлениях, как связанных с изучением событий Мияке (например, оценка активности Солнца до этих событий с целью их прогноза), так и совсем далеких от этой темы – для реконструкций солнечной активности, земного магнетизма или углеродного цикла. Результаты таких исследований чрезвычайно важны для нашего понимания внутренней работы Солнца, поскольку их можно использовать для проверки моделей солнечного динамо, которое контролирует магнит-

ное поле Солнца. Они также позволяют более точно понять связь между солнечной активностью и климатом.

Так, в работе [72] была проведена тысячелетняя реконструкция 11-летнего солнечного цикла (рис. 7), который является доминирующим проявлением солнечной магнитной активности, отражающим колебательный механизм динамо в конвекционной зоне Солнца. Солнечные циклы наблюдаются непосредственно с 1700 года, тогда как данные для расчета солнечной активности для

более длительного периода появились лишь в результате анализа древесных колец с разрешением в один год. В результате восстановлена циклическая солнечная активность за период 971-1900 г. (85 отдельных циклов). Это более чем удвоило количество солнечных циклов, известных из прямых солнечных наблюдений. В отношении событий Мияке показано, что три из них, попавших в исследуемый период – 993, 1052 и 1279 годов – приходятся на максимальные фазы солнечных циклов.

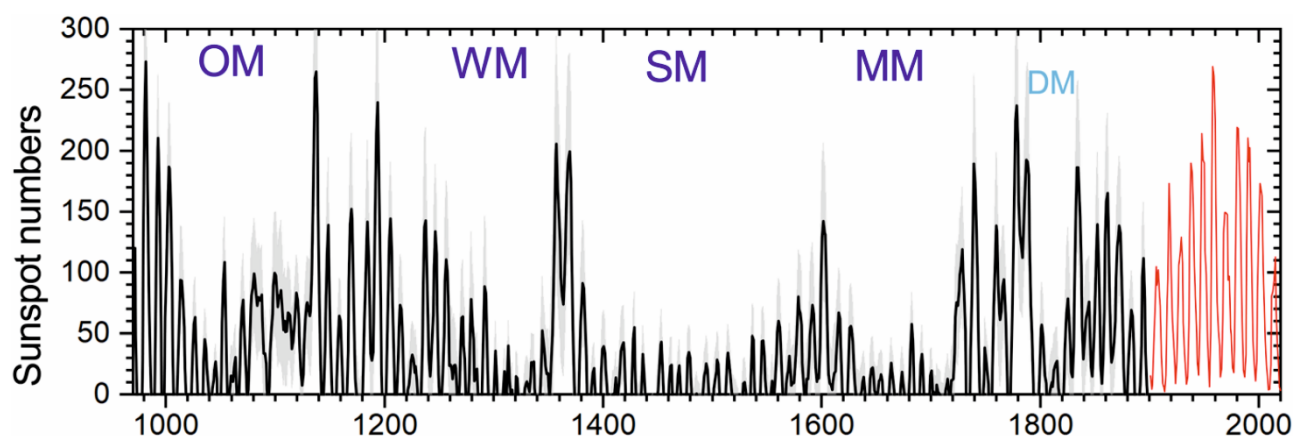


Рисунок 7. 11-летние циклы изменения числа пятен на Солнце за последнюю тысячу лет, реконструированные на основе данных содержания радиоуглерода в отдельных годовых кольцах (по [72, 68]). Синими буквами обозначены гранд-минимумы солнечной активности: OM – Оорта, WM – Вольфа, SM – Шпёрера, MM – Маундера, DM – Дальтона

Figure 7. Annual sunspot numbers reconstructed from C-14 since 970 AD (from [72, 68]). Blue letters denote grand minima of solar activity: Oort (OM), Wolf (WM), Spörer (SM), Maunder (MM) and Dalton (DM) minima

Кроме понимания событий на Солнце, открытие событий Мияке позволило оценить влияние магнитного поля Земли на пространственное и временное распределение радиоуглерода в атмосфере Земли. Экранирующий эффект геомагнитного поля от заряженных частиц космических лучей наиболее высок вблизи экватора и уменьшается к полярным областям. Поэтому частицы, образующие космогенные изотопы, легче всего проникают в атмосферу на высоких геомагнитных широтах. Широтная зависимость содержания радиоуглерода в атмосфере после события Мияке 774 года изучена в работе [12]. Показано, что интенсивность проявления события в древесных кольцах из различных мест

(Ямал, Скандинавия, Центральная Европа, Алтай, Япония, Калифорния) имеет сильную корреляцию с широтой, демонстрируя увеличение C-14 по направлению к полюсу, что согласуется с солнечным происхождением события. Кроме того, в годовых кольцах деревьев в Субарктике содержание радиоуглерода стало увеличиваться уже в 774 году. Авторы исследования подчеркивают важность деревьев, произрастающих в Субарктике, для хранения информации как о космической погоде, так и о закономерностях атмосферной циркуляции. Такой же результат – снижение интенсивности образования радиоуглерода от полюса к экватору – но на

основе данных двух событий Мияке, 774 и 993 года, показан в работе [7].

Примерно к такому же выводу пришли авторы исследования особенностей проявления события Мияке 993 года в древесных кольцах из разных регионов [73]. Они зафиксировали запаздывание сигнала в древесных кольцах деревьев, растущих в удаленных от полюса районах, по сравнению с деревьями из полярных районов. Учитывая преобладающее производство радиоуглерода в высоких широтах, разница во времени может быть эффектом переноса в атмосфере. Более того, разница во времени повышения C-14 может привести к ошибке определения даты события на 1 год с использованием радиоуглеродного пика 993 года. Авторы делают вывод, что деревья в высоких широтах быстрее и четче фиксируют изменения радиоуглерода, возникающие в результате событий Мияке, и могут быть более подходящими для изучения таких событий.

Использование событий Мияке в качестве маркера для датировок слоев в ледовых колонках

Благодаря открытию событий Мияке появилась возможность оценить точность датирования слоев в ледовых колонках Гренландии и Антарктиды. Это очень важно со многих точек зрения. Например, это позволило бы корректно оценить влияние крупных вулканических извержений, даты которых определяются в виде пика сульфатов в ледовых колонках, на изменения температуры воздуха в последующие годы, которые оцениваются с помощью древесных колец. Долгое время имелось несоответствие между данными ледовых колонок и древесных колец о датах крупных вулканических извержений в первое тысячелетие нашей эры. Дендрохронологи настаивали на смещении дат ледовых слоев на 7 лет вперед, но гляциологи не находили оснований для пересмотра своих датировок. Открытие событий Мияке 774 и 993 годов позволило преодолеть это противоречие.

Авторы работы [74] исходили из предположения, что события Мияке имеют солнечную природу, и поэтому во время этих событий в атмосфере должно увеличиваться содержание не только угле-

рода-14, но и изотопа бериллия-10. Поскольку оба этих радионуклида быстро включаются в природные архивы – посредством аэрозольных осаджений Be-10 в ледяных ядрах и поглощения углекислого газа, обогащенного C-14, в процессе фотосинтеза в годичных кольцах – изотопные аномалии, вызванные внеземными событиями, служат глобальным маркером возраста, с которым можно напрямую связать ледниковые процессы с древесно-кольцевыми хронологиями. Последние служат абсолютным и точным маркером возраста. Авторы работы измерили концентрации Be-10 с годовым разрешением в трех ледяных колонках Гренландии (NEEM-2011-S1, TUNU2013 и NGRIP), а также в ледяной колонке Западной Антарктики (WDC) в диапазонах глубин, охватывающих 775 год н.э. Во всех колонках был обнаружен всплеск содержания Be-10, превышающий естественную фоновую концентрацию примерно в два с половиной раза в течение одного-двух лет подряд. Исходно этот слой датировался гляциологами 768 годом, то есть для синхронизации с данными древесных колец даты ледовых колонок необходимо сдвинуть на 7 лет вперед. Более того, для ледовой колонки NEEM-2011-S1 был проведен такой же анализ в районе 993 года, где также была выявлена аномалия Be-10 в слое 987 года, совместимая с повышением содержания радиоуглерода в годичных кольцах 994 года. Таким образом, было преодолено разногласие между данными ледовых колонок и данными древесных колец о датах и климатическом эффекте крупных вулканических извержений первого тысячелетия нашей эры.

Синхронизировать данные ледовых колонок Северного и Южного полушария почти за всю эпоху голоцена помогает событие Мияке 774 г. до н.э. Авторы работы [75] провели с различным разрешением (от полугода до шести лет) анализ космогенных изотопов бериллия-10 и хлора-36 в ледовых колонках NGRIP, EGRIP и GRIP в Гренландии и EDML в Антарктиде. Все данные подтвердили наличие экстремального события около 9200 лет назад, которое датируется годичными кольцами деревьев 774 г. до н. э. Эти результаты подтвердили выявленную ранее необходимость сдвинуть на 54 года вперед данные ледовых колонок и сузили

неопределенность датировок ледовых колонок для этого времени с шести до одного года.

Таким образом, события Мияке позволяют значительно снизить ошибку в определении времени формирования слоев льда в Гренландии и Антарктиде. Ювелирная точность датировок ледовых отложений – это не просто помощь гляциологам. Данные об изотопном составе ледовых колонок – один из основных источников наших знаний об изменениях климата в последние тысячелетия. Теперь, например, можно точно сопоставлять некоторые события истории человечества с изменениями климата. Другое применение ледовых колонок – определение дат крупных вулканических извержений с помощью анализа резких подъемов содержания сульфатов. После корректировки дат образования ледовых слоев на основе события Мияке 7176 г. до н.э. можно будет очень точно сопоставить пики сульфатов в ледовых колонках и данные древесных колец о резком падении температуры воздуха за всю эпоху голоцена.

Использование событий Мияке в качестве маркера для оценки надежности дендрохронологических датировок

События Мияке были открыты благодаря дендрохронологическим инструментам. Но и дендрохронология получила от этого открытия неоценимую поддержку. Дендрохронологическая датировка заключается в сравнение рисунка изменчивости колец разных деревьев и поиск места (времени), где этот рисунок совпадает, т.е. где два древесно-кольцевых ряда перекрестно датируются. В отличие от большинства других естественнонаучных методов датирования, дендрохронологический имеет субъективную составляющую, т.к. нет определенных пороговых значений статистических показателей сходства двух древесно-кольцевых рядов, при которых можно точно сказать, что ряды перекрестно датируются. Окончательное решение принимает человек. Поэтому достоверность датировки в некоторой степени зависит от опыта исследователя. Это вызывало определенное недоверие у некоторых представителей наук о прошлом. Историки или археологи в некоторых случаях могли полу-

чить независимые данные для верификации дендрохронологических дат, например, документы с указанием даты строительства деревянного сооружения. Но у специалистов из естественнонаучных дисциплин сохранялся скепсис относительно надежности метода перекрестной датировки. Поэтому дендрохронологи сразу высоко оценили возможность независимого контроля дендрохронологических датировок, свалившуюся буквально с неба.

Первая работа, где на первый план был выдвинут именно этот аспект использования событий Мияке, опубликована в 2014 году [6]. В ней с помощью сигнала 774-775 года была показана точность датировок при построении многотысячелетней хронологии для Альп. В глобальном масштабе надежность древесно-кольцевых датировок показана в упоминавшейся уже статье консорциума COSMIC [7]. В этой работе показано, что 40 хронологий по разным видам деревьев (всего было 27 видов) из совершенно разных районов Земли (рис. 4), которые не датируются между собой, т.к. их прирост зависит от региональных особенностей климата и биологических особенностей древесного вида, воспроизводят общий для планеты сигнал внеземного происхождения совершенно синхронно.

Ценность внеземных маркеров для построения длительных хронологий обсуждается в работе [76]. Автор посчитал, что их использование может совершить революцию в науке о древесных кольцах, потому что у дендрохронологов будет независимый источник информации, по которому можно будет проверять точность датировок. И это несомненно должно убедить самого ярого скептика. Однако автор предостерегает от практики использования событий Мияке в процессе построения длительных хронологий в случаях сомнений при использовании традиционных методов дендрохронологического датирования, например при малой выборке деревьев. Такой подход можно применять лишь в том случае, когда исследователь не видит перспектив для традиционного пути, например при принципиальной невозможности увеличить объем выборки. Если события Мияке были использованы для построения хронологии, то их уже нельзя ис-

пользовать для независимой проверки точности дендрохронологического датирования.

Однако это предостережение не находит особого отклика в дендрохронологической среде. Когда у исследователей имеются ресурсы для радиоуглеродного анализа, события Мияке используются для устранения сомнений в правильности перекрестной датировки. В работе [77] всплеск радиоуглерода во время события 774 года использован для того, чтобы подтвердить перекрестную датировку плохо воспроизводимой хронологии сосны короля Билли (*Athrotaxis selaginoides*) в Тасмании. Эта хронология, построенная на основе данных годовичных колец более 100 живых и полуископаемых сосен, охватывает период с 42 г. до н.э. по 2010 г. н.э. Однако период с 1498 по 1523 г. представлен только двумя образцами. Поэтому у авторов не было уверенности в надежности датировок деревьев, живших до этого периода. Анализ образцов с трех деревьев, которые включали в себя кольца 774 года, подтвердили точность перекрестного датирования.

Такая же проверка позволила исправить ошибки предварительного перекрестного датирования малообеспеченного периода хронологии по сосне боснийской (*Pinus heldreichii*) в Греции [78]. Длительная хронология, с 574 по 2015 г. н.э., была построена по данным 878 рядов по ширине годовичных колец и по максимальной плотности древесины 103 деревьев. Кроме того был проведен анализ стабильного изотопа углерода-13 у 17 деревьев. Но по последнему показателю ряды в начале хронологии датировались другой датой, что породило сомнения в правильности датировок по ширине и плотности в начальный период хронологии. Радиоуглеродный анализ колец около 774 года по версии датировки по плотности и по версии датировки по C-13, подтвердили правильность второй, что позволило сдвинуть начало хронологии до 468 г. н.э.

Еще один пример имеется для Северной Америки. По данным традиционного радиоуглеродного датирования приблизительно в 10 веке произошло три сильных землетрясения в близких к друг другу местах в районе современного Сиэтла, США. Эта группа землетрясений вызвала оползни, подняла уступы разломов и вызвала местное цуна-

ми, в результате чего были захоронены или затоплены деревья во многих местах, охватывающих площадь более 500 кв. км. Для того чтобы выяснить, случились ли эти землетрясения одновременно, было использовано перекрестное датирование погибших деревьев дугласии (*Pseudotsuga menziesii*), которое показало, что погибли они одновременно [79]. Точную дату этого обширного землетрясения авторы попытались выяснить проведя перекрестную датировку хронологий по погибшим деревьям с имеющейся, но сравнительно далекой по расстоянию, хронологией с 715 по 1990 г. примерно в 280 км от Сиэтла. Датировка показала, что последнее, полностью сформировавшееся, кольцо относится к 923 году. То есть землетрясение произошло в период с осени 923 по весну 924 года. Проверка датировки с помощью события Мияке 774 года подтвердила ее правильность.

Комбинированный дендрохронологический и радиоуглеродный анализ был использован для определения возраста очень старой живой сосны боснийской (*Pinus heldreichii*) под названием Italus, растущей на юге Италии [80]. Определить дату образования центрального кольца по кернам взятым со ствола было невозможно из-за гнили в середине ствола. Ближайшее к центру кольцо на этом керне сформировалось в 955 году. Для более точного определения возраста дерева дополнительно были взяты четыре керна с обнаженных корней вблизи основания ствола, по которым была построена 320-летняя плавающая хронология. Предварительный радиоуглеродный анализ восьми колец из корней методом wiggle-matching позволил выявить примерное место кольца, сформированного во время события Мияке 993 года. Затем анализ ещё 12 колец вблизи этого места позволил идентифицировать кольцо 993 года. Далее следовало ожидать, что обратным подсчетом колец авторы выяснили год формирования первого кольца этой плавающей хронологии. Но по каким-то причинам такой информации в статье нет, нет сведений и о том, какое по счету кольцо в плавающей хронологии попало на событие Мияке. Авторы приводят лишь результаты определения возраста, который был оценен примерно в 1230 лет (по состоянию на 2017 год).

То есть возраст самого старого живого дерева в Европе был оценен при помощи события Мияке.

События Мияке и радиоуглеродные датировки с точностью до года

Принципиальная важность открытия событий Мияке для прорыва в радиоуглеродном датировании была оценена почти сразу [81]. Авторы использовали событие Мияке 774 года для датировки строительства монастыря Святого Иоанна в Мюштайре в Швейцарии. Сначала постройка (часовня Святого Креста) была отнесена к романской эпохе на основании сравнения стилей и интерпретации исторических данных. Затем археологическая стратиграфия показала, что часовня была построена до 1000 г. н.э., а возможно, и в эпоху Каролингов, в последней четверти VIII в. Была сделана и дендрохронологическая датировка часовни на основе годичных колец лиственницы (*Larix decidua*) с сохранившимися периферийными кольцами, послужившей материалом для нескольких потолочных балок, которые были датированы 785-788 гг. н.э. Работа была проведена в лаборатории дендрохронологии Романского периода (LRD) в Мудоне, Швейцария. Точная датировка часовни Святого Креста имеет исключительную ценность в масштабах всей Европы, поскольку может дать ответы на вопросы датировки архитектуры, фресок, мраморных скульптур и лепнины, а также на вопросы о местной истории. Поэтому для подтверждения дендрохронологической датировки образцы были переданы еще трем дендрохронологическим лабораториям. Однако все три лаборатории не смогли предоставить дату, основанную на дендрохронологических методах. Во втором раунде исследований определить дату строительства было предложено трем радиоуглеродным лабораториям. Традиционное радиоуглеродное датирование дало очень приблизительные даты и, таким образом, также не смогло подтвердить точный исторический возраст. Поэтому авторы работы решили использовать для датировки событие Мияке 774 года, которое, в случае верной дендрохронологической датировки, должно было проявиться в периферийных кольцах. Был проведен анализ колец 769-776 года.

Полученные результаты точно подтвердили дендрохронологическое датирование, выполненное в LRD.

Предыдущее исследование свелось все же к подтверждению дендрохронологической даты. Поэтому первым настоящим применением события Мияке для радиоуглеродной датировки с точностью до года можно считать датирование извержения вулкана Чанбайшань на границе нынешних КНР и КНДР [82]. По радиоуглеродным датировкам древесины 264-летней лиственницы с северо-западного склона, погибшей при извержении вулкана, было известно, что это событие произошло в X веке. Оставался вопрос о том, было ли это извержение причиной гибели государства Бохай в 926 году. Некоторые историки склонялись именно к этой версии. Но даже использование гибрида радиоуглеродного и дендрохронологического датирования – метода wiggle matching – не дало определенного ответа, т.к. была получена дата в интервале 920-950 г. После открытия событий Мияке была предпринята еще одна попытка – выполнен радиоуглеродный анализ отдельных центральных колец лиственницы, которые образовались в VIII веке. В результате исследователи обнаружили всплеск радиоуглерода в одном из колец, который был очевидным проявлением события Мияке. С помощью этой метки были точно определены даты образования всех колец и дата гибели дерева – осень 946 года. К тому моменту государство Бохай уже было захвачено кочевниками, а значит, вулкан Чанбайшань к его краху не имел отношения.

Подтверждение полученной датировки извержения вулкана Чанбайшань (вероятнее всего, исследование велось параллельно, но было опубликовано позже) было сделано на основе аналогичного анализа древесины деревьев с северо-восточного склона, погибших при этом извержении [83]. Анализ годичных колец двух деревьев кедра корейского (*Pinus koraiensis*) возрастом 234 и 314 лет был предварительно проведен методом wiggle matching. И он дал более узкий вероятный временной интервал извержения, чем в предыдущем исследовании, с 935 по 951 год. Затем был выполнен анализ отдельных колец вблизи даты события Мияке

774 года, который дал тот же результат, что и в предыдущем исследовании – деревья погибли в 946 году. Следует отметить, что в этой работе перепад с 774 по 775 год (19%) был даже круче, чем в других исследованиях.

С помощью события Мияке 774 года была предпринята попытка определения даты еще одного вулканического извержения. Анализ радиоуглерода в годичных кольцах березы (*Betula pubescens*) позволил, по мнению авторов [84], определить точное время извержения вулкана Катла в Исландии, который находится под 700-метровой толщей ледника. Подледниковые извержения этого вулкана вызывают интенсивное таяние льда, что приводит к мощным наводнениям. Примерно в 35 километрах от вулкана были обнаружены остатки полуископаемых берез. Исследователи посчитали, что они погибли при наводнении, вызванном извержением Катлы. Перекрестная датировка по ширине колец четырех берез показала, что погибли они одновременно. Радиоуглеродный анализ 11 колец одной из этих берез вблизи события Мияке (770-780 г., как выяснилось в результате анализа) позволил определить точную дату гибели этих деревьев, а значит и извержения – осень 822 - весна 823 года. К сожалению, ни в статье, ни в приложении к ней не приводятся аргументы, которыми руководствовались авторы при выборе для радиоуглеродного анализа именно этих 11 колец, которые удивительным образом очень точно охватили период события Мияке 774 года.

Та же методика – обнаружение древесного кольца, сформированного в год события Мияке 774 года – использована при датировке строительства крепости Пор-Бажын на острове посреди озера Тере-Холь в Туве [85]. Несмотря на десятилетия археологических работ, никто точно не знал, сколько лет Пор-Бажыну, кто его построил и каково его назначение. Комплекс мог быть дворцом или монастырем, и предполагалось, что он предназначен как для оборонительных, так и для ритуальных целей, но убедительных доказательств в пользу какого-либо из вариантов не было. На Пор-Бажыне отсутствовали какие-либо следы пребывания людей, например, мусорные кучи или уголь от очагов, что позволяет предположить, что он был заброшен

вскоре после строительства. Для решения этих проблем лучше всего было соотнести сооружение с конкретным правителем. В результате анализа 20 периферийных древесных колец трех лиственниц (*Larix sibirica*) из основания стены, которые хорошо сохранились благодаря вечной мерзлоте, была определена дата начала строительства – 777 г. То есть это произошло во время правления Бёгю Кагана, уйгурского монарха, принявшего манихейство. Скорее всего, Бёгю Каган построил Пор-Бажын как манихейский монастырь. Точный возраст Пор-Бажына указывает на очевидную причину его незавершенности. В 779 г. повстанцы, выступавшие против манихейства, убили Бёгю Кагана вместе с его сыновьями и приближенными. Пришедший к власти следующий властитель уйгуров вернул народу традиционную религию. Поэтому в тот момент, когда все это сооружение было закончено, оно сразу же стало бесполезным.

Событие Мияке 993 года использовано для точной датировки плавающей хронологии (859-1085 г.), построенной по сосне обыкновенной (*Pinus sylvestris*) из археологических раскопок в городе Уйсьце в Польше [86]. Хронология охватывает период первых лет польского государства. Как правило, деревянные сооружения последних тысячелетий в Центральной Европе датируются традиционным дендрохронологическим методом. Но это относится к сооружениям из дуба. Теперь появился метод точного определения дат для деревянных элементов из сосны.

Большой общественный интерес вызвала работа, опубликованная в журнале Nature в 2022 году, где с помощью события Мияке 993 года радиоуглеродным методом с точностью до года определена дата посещения викингами Северной Америки [87]. Известно, что викинги (или скандинавы) были первыми европейцами, пересекшими Атлантику. Единственным подтвержденным местом посещения ими Америки является Л'Анс-о-Медоуз на острове Ньюфаундленд в Канаде. Принято было считать, что норманнское поселение датируется концом первого тысячелетия, однако точный возраст этого места не был установлен. Большинство предыдущих оценок было основано на стилистическом анализе архитектурных останков и нескольких арте-

фактов, а также на интерпретациях исландских саг, которые были записаны лишь столетия спустя. Ранее была предпринята попытка радиоуглеродного анализа, но она не оказалась особенно информативной. Было получено более 150 радиоуглеродных дат. Однако их диапазоны простираются на всю эпоху викингов (793–1066 г.) и за ее пределы. Это контрастирует с археологическими свидетельствами и интерпретациями саг, которые свидетельствуют об очень кратком заселении. Авторы статьи провели анализ радиоуглерода в 83 отдельных кольцах из трех деревянных предметов из пихты, возможно, пихты бальзамической (*Abies balsamea*) и можжевельника/туи (*Juniperus/Thuja*). На всех предметах имелось периферийное кольцо. Определение точного года рубки каждого дерева было выполнено в два шага. На первом шаге методом wiggle matching был выявлен диапазон дат, в который попадали последние кольца – с 1019 по 1024 г. Затем точный возраст был определен при радиоуглеродном анализе отдельных колец в районе предполагаемого расположения кольца 993 года. Во всех трех случаях дата образования периферийного кольца совпала, это был 1021 год. Кроме того, неполностью сформированное периферийное кольцо указывало на весенний сезон рубки. Таким образом, 1021 год представляет собой единственную надежную календарную дату присутствия европейцев в Америке до путешествия Колумба.

Событие Мияке 774 года было использовано для точной датировки строительства крепости Арайша в Латвии [88]. Бревенчатая крепость на острове озера Арайши, Латвия, изучается более 50 лет и была датирована концом I тыс. н.э. Попытка дендрохронологического датирования для древесины срубной платформы, лежащей в основе самого раннего этапа строительства крепости, путем сопоставления с хронологией по ширине колец из Новгорода показала дату рубки деревьев около 930 г. Хотя эта дата совпадала с калиброванными датами радиоуглеродного датирования, сомнения в используемой методологии привели к повторному дендрохронологическому исследованию с использованием новых измерений ширины колец. В общей сложности ширина годичных колец была из-

мерена у 330 бревен. Из них 60 стволов ели (*Picea abies*) были перекрестно датированы и сформировали плавающую хронологию, охватывающую около 100 лет, что позволило получить относительные даты и для плавающей хронологии, включающей 11 стволов сосны (*Pinus sylvestris*). Это позволило синхронизировать многие из элементов постройки. Абсолютно датированных эталонных хронологий ширины колец, охватывающих соответствующий период, ни для одного из видов, ни из Латвии, ни из ближайших районов не имеется. Поэтому было проведено еще одно радиоуглеродное датирование путем отбора 10 непрерывных многолетних блоков общей продолжительностью 92 года, заканчивающихся последним кольцом. При сопоставлении с новейшей на тот момент калибровочной кривой IntCal13 была получена дата рубки 775-784 г. Это привело к идее найти кольцо, соответствующее событию Мияке. Но такая попытка не выявила всплесков содержания радиоуглерода. После новой серии уточняющих датировок и публикации IntCal20 новая калибровочная кривая, построенная для этого периода с разрешением в один год, сдвинула дату рубки на 50-60 лет позже. И лишь после этого еще одна серия датировок выявило кольцо 775 года, а год рубки определен как 835 г. Пример этого исследования указывает на необходимость обновления калибровочных кривых данными годового разрешения для всех исторических и доисторических периодов.

Впечатляющие результаты получены при использовании намного более древнего события Мияке. В статье, которая выйдет в свет в 2024 году (опубликована в виде препринта [89]), сообщается об исследовании, основанном на использовании события Мияке 5259 года до н.э., в результате которого неолитическая стоянка Диспилио (Северная Греция), являющаяся ключевой для неолита Эгейского моря, получила абсолютную календарную датировку. Определение видового состава древесины, взятой на археологическом памятнике, показало, что большую часть деревянных свай составляет древесина дуба (*Quercus* spp., 21%, *Q. frainetto*, *Q. petraea* и/или *Q. pubescens*) и можжевельника (*Juniperus* spp., 62%, *Juniperus excelsa*, *J.*

foetidissima и *J. deltoides*). Третьей по численности породой является сосна (*Pinus* spp., 17%), которая оказалась непригодной для дендрохронологического перекрестного датирования из-за малого количества годовых колец на большинстве образцов. По 58 образцам дуба была построена 120-летняя хронология, а по 118 образцам можжевельника 303-летняя хронология. Эти хронологии хорошо перекрестно датировались друг с другом. В отличие от дуба, сохранность древесины можжевельника была исключительно хорошей, с сохранившимися подкорковыми кольцами, что позволяет с разрешением в один год проводить реконструкцию этапов строительства и продолжительности пребывания людей на этом участке. Для поиска годичных колец, образовавшихся во время события Мияке 5259 г. до н.э. был проведен радиоуглеродный анализ 115 отдельных колец с четырех образцов можжевельника. Событие проявилось в 184-м кольце хронологии по можжевельнику, причем данные по всем четырем можжевельникам совпали. Таким образом, плавающая хронология по можжевельнику оказалась абсолютно датированной. На ее основе было выявлено, что строительная активность на неолитической стоянке Диспилио продолжалась как минимум 188 лет, с 5328 по 5140 г. до н.э. Был выявлен временной интервал между эпизодами строительства в 29-37 лет, что согласуется с немногочисленными имеющимися оценками продолжительности жизни домов в неолитической Юго-Восточной Европе. Таким образом, Диспилио является первой доисторической стоянкой, где проведена массовая абсолютная датировка с точностью до года.

Возможность радиоуглеродного датирования с точностью до года и многочисленные примеры ее реализации вызвали большой энтузиазм в научной среде. В сопроводительной статье к публикации о датировке поселения викингов в журнале *Nature* возможность проведения радиоуглеродных датировок с точностью до года названа революцией [90]. В статье в этом же журнале в начале 2023 года [91] высокоточное радиоуглеродное датирование с помощью событий Мияке упоминается как одна из семи технологий, которая по мнению редакции журнала окажет наибольшее влияние на науку в ближайшее время. Не менее авторитетный журнал

Science весной 2023 года опубликовал большой материал, посвященный Фусе Мияке и влиянию ее открытия на прогресс в радиоуглеродном датировании [92]. В перспективе применение радиоуглеродного датирования с точностью до года может привести к решению привлекательной исторической задачи – абсолютной датировке древних, внутренне согласованных временных шкал, не привязанных к конкретным датам. Например, к привязке "плавающих" хронологий фараонов Древнего Египта к современному календарю. Радиоуглеродное датирование позволило привязать ко времени египетскую хронологию с точностью до нескольких сотен лет. Ученые пытались использовать древние наблюдения за известными астрономическими событиями для дальнейшего сужения дат. Однако временные рамки остаются размытыми. Например, эпоха Старого царства в Египте охватывает десятки фараонов, правивших примерно с 2700 по 2200 гг. до н.э., но календарные даты пока не известны даже с точностью до века.

Другой плавающей хронологией является мезоамериканская система счета времени. Эта система, использовавшаяся майя, ацтеками и другими цивилизациями Мезоамерики, ведет отсчет дней от предполагаемого дня сотворения мира. Несмотря на то что было предпринято несколько попыток соотнести этот отсчет с григорианским календарем, ученые до сих пор спорят о точной дате сотворения мира. находка события Мияке в дереве мезоамериканского сооружения позволила бы решить этот вопрос.

Авторы статьи [93] считают, что события Мияке представляют новую парадигму хронологии. Потребуется лишь несколько связующих точек, чтобы революционизировать нынешнее понимание ранней цивилизации. Привязка записей к абсолютному времени позволит подвергнуть древнюю историю тому уровню изучения, который необходим современной науке. Причинно-следственные процессы в человеческих обществах, даже имеющие долгосрочные последствия, обычно происходят в годовых или меньших временных масштабах. События Мияке могут стать связующими точками при создании хронологической решетки, внутри которой можно было бы легко наблюдать структуру

потока знаний и технологий. Например, если бы две соседние цивилизации со своей собственной хронологией, такие как Египет и Ассирия во втором тысячелетии до нашей эры, могли быть привязаны к одному и тому же событию Мияке, можно было бы решить многие вопросы взаимодействия этих цивилизаций.

Перспективы дальнейших исследований. Роль сверхдлительных хронологий

Открытие Фусы Мияке с коллегами и дальнейшие исследования показали, что анализ изменений радиоуглерода в атмосфере в прошлом с разрешением в один год не просто дает более точную картину изменений этого изотопа в атмосфере, но может привести к открытию новых явлений. Поэтому не вызывает сомнений, что ближайшей задачей радиоуглеродного сообщества является анализ год за годом всей эпохи голоцена, то есть последних 12 тысяч лет, параллельно для нескольких районов Земли. Такое высокое разрешение и пространственный охват можно получить только при анализе годовичных колец деревьев. Так что через несколько лет, по всей вероятности, мы будем иметь многотысячелетние ряды измерений радиоуглерода с разрешением в один год для нескольких регионов Земли, где имеются длительные древесно-кольцевые хронологии. Причем с точки зрения изучения процессов, происходящих на Солнце и на Земле, предпочтение должно отдаваться приполярным деревьям. В настоящее время имеются две хронологии для субарктических районов – для Фенноскандии, длительностью 7650 лет [94] и для полуострова Ямал, длительностью 8770 лет [95] и перспективой продления еще на 400 лет в ближайшее время. Годичные кольца деревьев с Ямала и

Финляндии уже сейчас активно используются в двух крупных проектах по реконструкции содержания радиоуглерода в атмосфере Земли в голоцене с разрешением в один год. Эти проекты ведутся в отделе по изучению космических лучей в Университете Нагойи, Япония, под руководством Фусы Мияке и в лаборатории физики ионных пучков Высшей технической школы в Цюрихе, Швейцария, под руководством Лукаса Вакера. Результаты таких исследований дадут возможность восстановить историю солнечной активности, изменений магнитного поля Земли. Кроме того, такие исследования внесут вклад в изучение углеродного цикла и климатических процессов [96].

Анализ радиоуглерода за каждый год для последних 12 тысяч лет приведет к созданию новой калибровочной кривой для радиоуглеродного датирования, а может и нескольких – для разных районов Земли. Это позволит значительно увеличить точность радиоуглеродного датирования, особенно с использованием метода *wiggle matching*. Причем это касается не только тех датировок, которые будут проведены в будущем, но и тех, что уже были сделаны раньше. Наверняка, в случае обнаружения других супервспышек, расширятся диапазоны времени, для которых будет возможна радиоуглеродная датировка с точностью до года.

О все более возрастающем влиянии открытия событий Мияке на развитие различных научных областей свидетельствует такой формальный показатель как динамика цитирования основоположной статьи 2012 года. Она имеет необычный вид – число ежегодных ссылок на статью со временем не падает, как это обычно происходит, а увеличивается с каждым годом. Что отражает расширение областей применения открытия, сделанного японскими учеными в 2012 году.

Список литературы

1. Miyake, F., Nagaya, K., Masuda, K., Nakamura, T., 2012. A signature of cosmic-ray increase in ad 774–775 from tree rings in Japan. *Nature* 486(7402): 240–2, Doi: 10.1038/nature11123.
2. Stuiver, M., Becker, B., 1993. High-Precision Decadal Calibration of the Radiocarbon Time Scale, AD 1950–6000 BC. *Radiocarbon* 35(1): 35–65, Doi: 10.1017/S0033822200013801.
3. Stuiver, M., Reimer, P.J., Braziunas, T.F., 1998. High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples. *Radiocarbon* 40(3): 1127–51, Doi: 10.1017/S0033822200019172.

4. Usoskin, I.G., Kromer, B., Ludlow, F., Beer, J., Friedrich, M., Kovaltsov, G.A., et al., 2013. The AD775 cosmic event revisited: the Sun is to blame. *Astronomy & Astrophysics* 552: L3, Doi: 10.1051/0004-6361/201321080.
5. Jull, A.J.T., Panyushkina, I.P., Lange, T.E., Kukarskih, V. V., Myglan, V.S., Clark, K.J., et al., 2014. Excursions in the 14C record at A.D. 774-775 in tree rings from Russia and America. *Geophysical Research Letters* 41(8): 3004–10, Doi: 10.1002/2014GL059874.
6. Büntgen, U., Wacker, L., Nicolussi, K., Sigl, M., Gütler, D., Tegel, W., et al., 2014. Extraterrestrial confirmation of tree-ring dating. *Nature Climate Change* 4(6): 404–5, Doi: 10.1038/nclimate2240.
7. Büntgen, U., Wacker, L., Galván, J.D., Arnold, S., Arseneault, D., Baillie, M., et al., 2018. Tree rings reveal globally coherent signature of cosmogenic radiocarbon events in 774 and 993 CE. *Nature Communications* 9(1): 3605, DOI: 10.1038/s41467-018-06036-0.
8. Gütler, D., Adolphi, F., Beer, J., Bleicher, N., Boswijk, G., Christl, M., et al., 2015. Rapid increase in cosmogenic14C in AD 775 measured in New Zealand kauri trees indicates short-lived increase in14C production spanning both hemispheres. *Earth and Planetary Science Letters* 411: 290–7, Doi: 10.1016/j.epsl.2014.11.048.
9. Rakowski, A.Z., Krąpiec, M., Huels, M., Pawlyta, J., Dreves, A., Meadows, J., 2015. Increase of radiocarbon concentration in tree rings from Kujawy (SE Poland) around AD 774-775. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 361: 564–8, Doi: 10.1016/j.nimb.2015.03.035.
10. Büntgen, U., Myglan, V.S., Ljungqvist, F.C., McCormick, M., Di Cosmo, N., Sigl, M., et al., 2016. Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD. *Nature Geoscience* 9(3): 231–6, Doi: 10.1038/ngeo2652.
11. Park, J., Southon, J., Fahrni, S., Creasman, P.P., Mewaldt, R., 2017. Relationship between solar activity and $\Delta 14C$ peaks in AD 775, AD 994, and 660 BC. *Radiocarbon* 59(4): 1147–56, Doi: 10.1017/RDC.2017.59.
12. Usitalo, J., Arppe, L., Hackman, T., Helama, S., Kovaltsov, G., Mielikäinen, K., et al., 2018. Solar superstorm of AD 774 recorded subannually by Arctic tree rings. *Nature Communications* 9(1): 1–8, DOI: 10.1038/s41467-018-05883-1.
13. Park, J., Seo, J.-W., Hong, W., Park, G., Sung, K., Park, Y.J., et al., 2020. Estimation of the occurrence time of the $\Delta 14C$ peak in ad 775 based on the oxidation time of 14 c in the atmosphere and $\Delta 14C$ values in subannual tree rings. *Radiocarbon* 62(5): 1285–98, Doi: 10.1017/RDC.2020.69.
14. Park, J.H., Southon, J., Seo, J.W., Creasman, P.P., Hong, W., Park, G., et al., 2021. $\Delta 14C$ Peaks Appearing in Earlywood and Latewood Tree Rings (Ad 770-780) in Northeastern Arizona. *Radiocarbon* 63(1): 223–8, DOI: 10.1017/RDC.2020.108.
15. Miyake, F., Masuda, K., Nakamura, T., 2013. Another rapid event in the carbon-14 content of tree rings. *Nature Communications* 4: 1–6, Doi: 10.1038/ncomms2783.
16. Miyake, F., Masuda, K., Hakozaiki, M., Nakamura, T., Tokanai, F., Kato, K., et al., 2014. Verification of the Cosmic-Ray Event in AD 993–994 by Using a Japanese Hinoki Tree. *Radiocarbon* 56(3): 1189–94, DOI: 10.2458/56.17769.
17. Fogtmann-Schulz, A., Østbø, S.M., Nielsen, S.G.B., Olsen, J., Karoff, C., Knudsen, M.F., 2017. Cosmic ray event in 994 C.E. recorded in radiocarbon from Danish oak. *Geophysical Research Letters* 44(16): 8621–8, DOI: 10.1002/2017GL074208.
18. Miyake, F., Masuda, K., Nakamura, T., Kimura, K., Hakozaiki, M., Jull, A.J.T., et al., 2017. Search for annual14C excursions in the past. *Radiocarbon* 59(2): 315–20, Doi: 10.1017/RDC.2016.54.
19. Miyake, F., Jull, A.J.T., Panyushkina, I.P., Wacker, L., Salzer, M., Baisan, C.H., et al., 2017. Large 14 C excursion in 5480 BC indicates an abnormal sun in the mid-Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(5): 881–4, Doi: 10.1073/pnas.1613144114.
20. Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., et al., 2009. IntCal09 and Marine09 Radiocarbon Age Calibration Curves, 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon* 51(4): 1111–50, DOI: 10.1017/S0033822200034202.

21. Sakurai, H., Tokanai, F., Miyake, F., Horiuchi, K., Masuda, K., Miyahara, H., et al., 2020. Prolonged production of ^{14}C during the ~660 BCE solar proton event from Japanese tree rings. *Scientific Reports* 10(1): 1–7, DOI: 10.1038/s41598-019-57273-2.
22. Rakowski, A.Z., Pawlyta, J., Miyahara, H., Krąpiec, M., Molnár, M., Wiktorowski, D., et al., 2023. Radiocarbon concentration in sub-annual tree rings from Poland around 660 BCE. *Radiocarbon*: 1–10, DOI: 10.1017/RDC.2023.79.
23. Wang, F.Y., Yu, H., Zou, Y.C., Dai, Z.G., Cheng, K.S., 2017. A rapid cosmic-ray increase in BC 3372-3371 from ancient buried tree rings in China. *Nature Communications* 8(1): 4–8, DOI: 10.1038/s41467-017-01698-8.
24. Jull, A.J.T., Panyushkina, I.P., Molnár, M., Varga, T., Wacker, L., Brehm, N., et al., 2021. Rapid ^{14}C excursion at 3372-3371 BCE not observed at two different locations. *Nature Communications* 12(1): 10–2, DOI: 10.1038/s41467-020-20695-y.
25. Jull, A.J.T., Panyushkina, I., Miyake, F., Masuda, K., Nakamura, T., Mitsutani, T., et al., 2018. More rapid ^{14}C excursions in the tree-ring record: A record of different kind of solar activity at about 800 BC? *Radiocarbon* 60(4): 1237–48, DOI: 10.1017/RDC.2018.53.
26. Miyake, F., Panyushkina, I.P., Jull, A.J.T., Adolphi, F., Brehm, N., Helama, S., et al., 2021. A Single-Year Cosmic Ray Event at 5410 BCE Registered in ^{14}C of Tree Rings. *Geophysical Research Letters* 48(11), DOI: 10.1029/2021GL093419.
27. Brehm, N., Bayliss, A., Christl, M., Synal, H.-A., Adolphi, F., Beer, J., et al., 2021. Eleven-year solar cycles over the last millennium revealed by radiocarbon in tree rings. *Nature Geoscience* 14(1): 10–5, DOI: 10.1038/s41561-020-00674-0.
28. Terrasi, F., Marzaioli, F., Buompane, R., Passariello, I., Porzio, G., Capano, M., et al., 2020. Can the ^{14}C production in 1055 CE be affected by SN1054? *Radiocarbon* 62(5): 1403–18, DOI: 10.1017/RDC.2020.58.
29. Panyushkina, I., Livina, V., Molnár, M., Varga, T., Jull, A.J.T., 2022. Scaling the ^{14}C -excursion signal in multiple tree-ring series with dynamic time warping. *Radiocarbon* 64(6): 1587–95, DOI: 10.1017/RDC.2022.25.
30. Miyahara, H., Tokanai, F., Moriya, T., Takeyama, M., Sakurai, H., Ohyama, M., et al., 2022. Recurrent Large-Scale Solar Proton Events Before the Onset of the Wolf Grand Solar Minimum. *Geophysical Research Letters* 49(5): 1–8, DOI: 10.1029/2021GL097201.
31. Brehm, N., Christl, M., Knowles, T.D.J., Casanova, E., Evershed, R.P., Adolphi, F., et al., 2022. Tree-rings reveal two strong solar proton events in 7176 and 5259 BCE. *Nature Communications* 13(1): 1196, DOI: 10.1038/s41467-022-28804-9.
32. Reimer, P.J., Austin, W.E.N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., et al., 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon* 62(4): 725–57, DOI: 10.1017/RDC.2020.41.
33. Bard, E., Miramont, C., Capano, M., Guibal, F., Marschal, C., Rostek, F., et al., 2023. A radiocarbon spike at 14,300 cal yr BP in subfossil trees provides the impulse response function of the global carbon cycle during the Late Glacial. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 381(2261), DOI: 10.1098/rsta.2022.0206.
34. Allen, J., 2012. Clue to an ancient cosmic-ray event? *Nature* 486(7404): 473–473, DOI: 10.1038/486473e.
35. Dee, M., Pope, B., Miles, D., Manning, S., Miyake, F., 2017. Supernovae and single-year anomalies in the atmospheric radiocarbon record. *Radiocarbon* 59(2): 293–302, DOI: 10.1017/RDC.2016.50.
36. Hambaryan, V. V., Neuhäuser, R., 2013. A Galactic short gamma-ray burst as cause for the ^{14}C peak in AD 774/5. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 430(1): 32–6, DOI: 10.1093/mnras/sts378.
37. Pavlov, A.K., Blinov, A. V., Konstantinov, A.N., Ostryakov, V.M., Vasilyev, G.I., Vdovina, M.A., et al., 2013. AD 775 pulse of cosmogenic radionuclides production as imprint of a Galactic gamma-ray burst. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 435(4): 2878–84, DOI: 10.1093/mnras/stt1468.

38. Liu, Y., Zhang, Z.F., Peng, Z.C., Ling, M.X., Shen, C.C., Liu, W.G., et al., 2014. Mysterious abrupt carbon-14 increase in coral contributed by a comet. *Scientific Reports* 4: 14–7, DOI: 10.1038/srep03728.
39. Chapman, J., Csikszentmihalyi, M., Neuhäuser, R., 2014. The Chinese comet observation in AD 773 January. *Astronomische Nachrichten* 335(9): 964–7, DOI: 10.1002/asna.201412069.
40. Eichler, D., Mordecai, D., 2012. Comet encounters and carbon 14. *Astrophysical Journal Letters* 761(2): 3–5, DOI: 10.1088/2041-8205/761/2/L27.
41. Chai, Y.-T., Zou, Y.-C., 2015. Searching for events in Chinese ancient records to explain the increase in 14 C from AD 774–775 and AD 993–994. *Research in Astronomy and Astrophysics* 15(9): 1504–12, DOI: 10.1088/1674-4527/15/9/007.
42. Melott, A.L., Thomas, B.C., 2012. Causes of an ad 774-775 14 C increase. *Nature* 491(7426): E1–2, DOI: 10.1038/nature11695.
43. Thomas, B.C., Melott, A.L., Arkenberg, K.R., Snyder, B.R., 2013. Terrestrial effects of possible astrophysical sources of an AD 774-775 increase in 14C production. *Geophysical Research Letters* 40(6): 1237–40, DOI: 10.1002/grl.50222.
44. Usoskin, I.G., Kovaltsov, G.A., 2021. Mind the Gap: New Precise 14C Data Indicate the Nature of Extreme Solar Particle Events. *Geophysical Research Letters* 48(17): 1–5, DOI: 10.1029/2021GL094848.
45. Knudsen, M.F., Riisager, P., Donadini, F., Snowball, I., Muscheler, R., Korhonen, K., et al., 2008. Variations in the geomagnetic dipole moment during the Holocene and the past 50 kyr. *Earth and Planetary Science Letters* 272 (1–2): 319–29, DOI: 10.1016/j.epsl.2008.04.048.
46. Panovska, S., Constable, C.G., Korte, M., 2018. Extending Global Continuous Geomagnetic Field Reconstructions on Timescales Beyond Human Civilization. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 19(12): 4757–72, DOI: 10.1029/2018GC007966.
47. Mekhaldi, F., Muscheler, R., Adolphi, F., Aldahan, A., Beer, J., McConnell, J.R., et al., 2015. Multiradionuclide evidence for the solar origin of the cosmic-ray events of 774/5 and 993/4. *Nature Communications* 6: 1–8, DOI: 10.1038/ncomms9611.
48. Usoskin, I., Miyake, F., Baroni, M., Brehm, N., Dalla, S., Hayakawa, H., et al., 2023. Extreme Solar Events: Setting up a Paradigm. *Space Science Reviews* 219(8), DOI: 10.1007/s11214-023-01018-1.
49. Zhou, D., Wang, C., Peng, Z., Rutledge, R., Sun, Y., Liang, J., et al., 2013. The Solar Cosmic-Ray Origin for the Rapid 14 C Increase in AD775. 33Rd International Cosmic Ray Conference, Rio De Janeiro 2013 the Astroparticle Physics Conference, p. 14–7.
50. Zhou, D., Wang, C., Zhang, B., Zhang, S., Zhou, P., Sun, Y., et al., 2014. Super solar particle event around AD775 was found. *Chinese Science Bulletin* 59(22): 2736–42, DOI: 10.1007/s11434-014-0345-z.
51. Neuhäuser, R., Kunitzsch, P., 2014. A transient event in AD 775 reported by al-Tabarī: A bolide - not a nova, supernova, or kilonova. *Astronomische Nachrichten* 335(9): 968–80, DOI: 10.1002/asna.201412118.
52. Chapman, J., Neuhäuser, D.L., Neuhäuser, R., Csikszentmihalyi, M., 2015. A review of East Asian reports of aurorae and comets circa AD 775. *Astronomische Nachrichten* 336(6): 530–44, DOI: 10.1002/asna.201512193.
53. Stephenson, F.R., 2015. Astronomical evidence relating to the observed 14 C increases in A.D. 774-5 and 993-4 as determined from tree rings. *Advances in Space Research* 55(6): 1537–45, DOI: 10.1016/j.asr.2014.12.014.
54. Neuhäuser, R., Neuhäuser, D.L., 2015. Solar activity around AD 775 from aurorae and radiocarbon. *Astronomische Nachrichten* 336(3): 225–48, DOI: 10.1002/asna.201412160.
55. Hayakawa, H., Tamazawa, H., Kawamura, A.D., Isobe, H., 2015. Records of sunspot and aurora during CE 960-1279 in the Chinese chronicle of the Sòng dynasty. *Earth, Planets and Space* 67(1), DOI: 10.1186/s40623-015-0250-y.
56. Hayakawa, H., Isobe, H., Kawamura, A.D., Tamazawa, H., Miyahara, H., Kataoka, R., 2016. Unusual rainbow and white rainbow: A new auroral candidate in oriental historical sources. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 68(3): 1–8, DOI: 10.1093/pasj/psw032.

57. Hayakawa, H., Iwahashi, K., Tamazawa, H., Ebihara, Y., Kawamura, A.D., Isobe, H., et al., 2017. Records of auroral candidates and sunspots in Rikkokushi, chronicles of ancient Japan from early 7th century to 887. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 69(6): 1–13, DOI: 10.1093/pasj/psx087.
58. Tamazawa, H., Kawamura, A.D., Hayakawa, H., Tsukamoto, A., Isobe, H., Ebihara, Y., 2017. Records of sunspot and aurora activity during 581-959 CE in Chinese official histories concerning the periods of Suí, Táng, and the Five Dynasties and Ten Kingdoms. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 69(2): 1–14, DOI: 10.1093/pasj/psw132.
59. Hayakawa, H., Mitsuma, Y., Fujiwara, Y., Kawamura, A.D., Kataoka, R., Ebihara, Y., et al., 2017. The earliest drawings of datable auroras and a two-tail comet from the Syriac Chronicle of Zūqñīn. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 69(2): 1–15, DOI: 10.1093/pasj/psw128.
60. Hayakawa, H., Tamazawa, H., Ebihara, Y., Miyahara, H., Kawamura, A.D., Aoyama, T., et al., 2017. Records of sunspots and aurora candidates in the Chinese official histories of the Yuán and Míng dynasties during 1261–1644. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 69(4): 1–25, DOI: 10.1093/pasj/psx045.
61. Neuhäuser, D.L., Neuhäuser, R., Chapman, J., 2018. New sunspots and aurorae in the historical Chinese text corpus? Comments on uncritical digital search applications. *Astronomische Nachrichten* 339(1): 10–29, DOI: 10.1002/asna.201713390.
62. Stephenson, F.R., Willis, D.M., Hayakawa, H., Ebihara, Y., Scott, C.J., Wilkinson, J., et al., 2019. Do the Chinese Astronomical Records Dated AD 776 January 12/13 Describe an Auroral Display or a Lunar Halo? A Critical Re-examination. *Solar Physics* 294(4): 1–24, DOI: 10.1007/s11207-019-1425-7.
63. Hayakawa, H., Stephenson, F.R., Uchikawa, Y., Ebihara, Y., Scott, C.J., Wild, M.N., et al., 2019. The Celestial Sign in the Anglo-Saxon Chronicle in the 770s: Insights on Contemporary Solar Activity. *Solar Physics* 294(4): 1–30, DOI: 10.1007/s11207-019-1424-8.
64. Maden, N., 2020. Historical aurora borealis catalog for Anatolia and Constantinople (hABcAC) during the Eastern Roman Empire period: Implications for past solar activity. *Annales Geophysicae* 38(4): 889–99, DOI: 10.5194/angeo-38-889-2020.
65. Wang, Y., Chen, S., Xu, K., Yan, L., Yue, X., He, F., et al., 2021. Ancient Auroral Records Compiled From Korean Historical Books. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 126(1): 1–6, DOI: 10.1029/2020JA028763.
66. Борисенков, Е.П., Пасецкий, В.М., 1988. Тысячелетняя летопись необычайных явлений природы.
67. Okamoto, S., Notsu, Y., Maehara, H., Namekata, K., Honda, S., Ikuta, K., et al., 2021. Statistical Properties of Superflares on Solar-type Stars: Results Using All of the Kepler Primary Mission Data. *The Astrophysical Journal* 906(2): 72, DOI: 10.3847/1538-4357/abc8f5.
68. Usoskin, I.G., 2023. A history of solar activity over millennia. vol. 20, Springer International Publishing.
69. Sukhodolov, T., Usoskin, I., Rozanov, E., Asvestari, E., Ball, W.T., Curran, M.A.J., et al., 2017. Atmospheric impacts of the strongest known solar particle storm of 775 AD. *Scientific Reports* 7: 1–9, DOI: 10.1038/srep45257.
70. Miyake, F., Usoskin, I., Poluianov, S., 2019. *Extreme Solar Particle Storms*. IOP Publishing.
71. Kanzawa, K., Miyake, F., Horiuchi, K., Sasa, K., Takano, K., Matsumura, M., et al., 2021. High-Resolution ¹⁰Be and ³⁶Cl Data From the Antarctic Dome Fuji Ice Core (~100 Years Around 5480 BCE): An Unusual Grand Solar Minimum Occurrence? *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 126(10), DOI: 10.1029/2021JA029378.
72. Usoskin, I.G., Solanki, S.K., Krivova, N.A., Hofer, B., Kovaltsov, G.A., Wacker, L., et al., 2021. Solar cyclic activity over the last millennium reconstructed from annual ¹⁴C data. *Astronomy and Astrophysics* 649: 1–13, DOI: 10.1051/0004-6361/202140711.
73. Miyake, F., Hakozaiki, M., Kimura, K., Tokanai, F., Nakamura, T., Takeyama, M., et al., 2022. Regional Differences in Carbon-14 Data of the 993 CE Cosmic Ray Event. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 9(July): 1–8, DOI: 10.3389/fspas.2022.886140.

74. Sigl, M., Winstrup, M., McConnell, J.R., Welten, K.C., Plunkett, G., Ludlow, F., et al., 2015. Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years. *Nature* 523(7562): 543–9, DOI: 10.1038/nature14565.
75. Paleari, C.I., Mekhaldi, F., Adolphi, F., Christl, M., Vockenhuber, C., Gautschi, P., et al., 2022. Cosmogenic radionuclides reveal an extreme solar particle storm near a solar minimum 9125 years BP. *Nature Communications* 13(1), DOI: 10.1038/s41467-021-27891-4.
76. Fowler, A.M., 2015. Are cosmogenic events about to revolutionise the crossdating of multi-millennial tree-ring chronologies? *Dendrochronologia* 35: 1–3, DOI: 10.1016/j.dendro.2015.05.004.
77. Walker, M., Mueller, A., Allen, K., Fenwick, P., Agrawal, V., Anchukaitis, K., et al., 2023. High resolution radiocarbon spike confirms tree ring dating with low sample depth. *Dendrochronologia* 77(October 2022): 126048, DOI: 10.1016/j.dendro.2022.126048.
78. Römer, P., Reinig, F., Konter, O., Friedrich, R., Urban, O., Čáslavský, J., et al., 2023. Multi-proxy crossdating extends the longest high-elevation tree-ring chronology from the Mediterranean. *Dendrochronologia* 79(March), DOI: 10.1016/j.dendro.2023.126085.
79. Black, B.A., Pearl, J.K., Pearson, C.L., Pringle, P.T., Frank, D.C., Page, M.T., et al., 2023. A multifault earthquake threat for the Seattle metropolitan region revealed by mass tree mortality 2(September): 1–10, DOI: 10.1126/sciadv.adh4973.
80. Quarta, G., Filippo, A. Di., Calcagnile, L., D’Elia, M., Biondi, F., Saba, E.P., et al., 2019. Identifying the 993-994 CE Miyake event in the oldest dated living tree in Europe. *Radiocarbon* 61(5): 1317–25, DOI: 10.1017/RDC.2019.37.
81. Wacker, L., Güttler, D., Goll, J., Hurni, J.P., Synal, H.-A., Walti, N., 2014. Radiocarbon Dating to a Single Year by Means of Rapid Atmospheric ^{14}C Changes. *Radiocarbon* 56(2): 573–9, DOI: 10.2458/56.17634.
82. Oppenheimer, C., Wacker, L., Xu, J., Galván, J.D., Stoffel, M., Guillet, S., et al., 2017. Multi-proxy dating the ‘Millennium Eruption’ of Changbaishan to late 946 CE. *Quaternary Science Reviews* 158: 164–71, DOI: 10.1016/j.quascirev.2016.12.024.
83. Hakozaki, M., Miyake, F., Nakamura, T., Kimura, K., Masuda, K., Okuno, M., 2018. Verification of the annual dating of the 10th century baitoushan volcano eruption based on an AD 774-775 radiocarbon spike. *Radiocarbon* 60(1): 261–8, DOI: 10.1017/RDC.2017.75.
84. Büntgen, U., Eggertsson, Ó., Wacker, L., Sigl, M., Ljungqvist, F.C., di Cosmo, N., et al., 2017. Multi-proxy dating of Iceland’s major pre-settlement Katla eruption to 822-823 CE. *Geology* 45(9): 783–6, DOI: 10.1130/G39269.1.
85. Kuitens, M., Panin, A., Scifo, A., Arzhantseva, I., Kononov, Y., Doeve, P., et al., 2020. Radiocarbon-based approach capable of subannual precision resolves the origins of the site of Por-Bajin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117(25): 14038–41, DOI: 10.1073/pnas.1921301117.
86. Kraepiec, M., Rakowski, A., Pawlyta, J., Wiktorowski, D., Bolka, M., 2021. Absolute dendrochronological scale for pine (*Pinus sylvestris* L.) from Ujście (NW Poland), dated using rapid atmospheric ^{14}C changes. *Radiocarbon* 63(4): 1205–14, DOI: 10.1017/RDC.2020.116.
87. Kuitens, M., Wallace, B.L., Lindsay, C., Scifo, A., Doeve, P., Jenkins, K., et al., 2022. Evidence for European presence in the Americas in ad 1021. *Nature* 601(7893): 388–91, DOI: 10.1038/s41586-021-03972-8.
88. Meadows, J., Zunde, M., Lēgere, L., Dee, M.W., Hamann, C., 2023. Single-Year ^{14}C Dating of the Lake-Fortress At Āraiši, Latvia. *Radiocarbon* 00(00): 1–11, DOI: 10.1017/rdc.2023.24.
89. Maczkowski, A., Pearson, C., Francuz, J., Giagkoulis, T., Szidat, S., Wacker, L., et al., 2023. Absolutely dating the European Neolithic through a rapid ^{14}C excursion (October), DOI: 10.21203/rs.3.rs-3419721/v1.
90. Barrett, J.H., 2022. A radiocarbon revolution sheds light on the Vikings. *Nature* 601(7893): 326–7, DOI: 10.1038/d41586-021-03769-9.
91. Eisenstein, M., 2023. Seven technologies to watch in 2023. *Nature* 613(7945): 794–7, DOI: 10.1038/d41586-023-00178-y.
92. Price, M., 2023. Marking time. *Science* 380(6641): 124–8, DOI: 10.1126/science.adi2032.

93. Dee, M.W., Pope, B.J.S., 2016. Anchoring historical sequences using a new source of astro-chronological tie-points. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 472(2192), DOI: 10.1098/rspa.2016.0263.

94. Helama, S., Mielikäinen, K., Timonen, M., Eronen, M., 2008. Finnish supra-long tree-ring chronology extended to 5634 BC. *Norsk Geografisk Tidsskrift* 62(4): 271–7, DOI: 10.1080/00291950802517593.

95. Хантемиров, Р.М., Шиятов, С.Г., Горланова, Л.А., Кукарских, В.В., Сурков, А.Ю., Хамзин, И.Р., и др., 2021. 8768-летняя Ямальская древесно-кольцевая хронология как инструмент для палеоэкологических реконструкций. *Экология* 5(5): 388–97, DOI: 10.31857/S0367059721050085.

96. Heaton, T.J., Bard, E., Ramsey, C.B., Butzin, M., Köhler, P., Muscheler, R., et al., 2021. Radiocarbon: A key tracer for studying Earth's dynamo, climate system, carbon cycle, and Sun. *Science* 374(6568), DOI: 10.1126/science.abd7096.

References

1. Miyake, F., Nagaya, K., Masuda, K., Nakamura, T., 2012. A signature of cosmic-ray increase in ad 774–775 from tree rings in Japan. *Nature* 486(7402): 240–2, DOI: 10.1038/nature11123.

2. Stuiver, M., Becker, B., 1993. High-Precision Decadal Calibration of the Radiocarbon Time Scale, AD 1950–6000 BC. *Radiocarbon* 35(1): 35–65, DOI: 10.1017/S0033822200013801.

3. Stuiver, M., Reimer, P.J., Braziunas, T.F., 1998. High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples. *Radiocarbon* 40(3): 1127–51, DOI: 10.1017/S0033822200019172.

4. Usoskin, I.G., Kromer, B., Ludlow, F., Beer, J., Friedrich, M., Kovaltsov, G.A., et al., 2013. The AD775 cosmic event revisited: the Sun is to blame. *Astronomy & Astrophysics* 552: L3, DOI: 10.1051/0004-6361/201321080.

5. Jull, A.J.T., Panyushkina, I.P., Lange, T.E., Kukarskih, V. V., Myglan, V.S., Clark, K.J., et al., 2014. Excursions in the 14C record at A.D. 774-775 in tree rings from Russia and America. *Geophysical Research Letters* 41(8): 3004–10, DOI: 10.1002/2014GL059874.

6. Büntgen, U., Wacker, L., Nicolussi, K., Sigl, M., Gütler, D., Tegel, W., et al., 2014. Extraterrestrial confirmation of tree-ring dating. *Nature Climate Change* 4(6): 404–5, DOI: 10.1038/nclimate2240.

7. Büntgen, U., Wacker, L., Galván, J.D., Arnold, S., Arseneault, D., Baillie, M., et al., 2018. Tree rings reveal globally coherent signature of cosmogenic radiocarbon events in 774 and 993 CE. *Nature Communications* 9(1): 3605, DOI: 10.1038/s41467-018-06036-0.

8. Gütler, D., Adolphi, F., Beer, J., Bleicher, N., Boswijk, G., Christl, M., et al., 2015. Rapid increase in cosmogenic 14C in AD 775 measured in New Zealand kauri trees indicates short-lived increase in 14C production spanning both hemispheres. *Earth and Planetary Science Letters* 411: 290–7, DOI: 10.1016/j.epsl.2014.11.048.

9. Rakowski, A.Z., Krapiec, M., Huels, M., Pawlyta, J., Dreves, A., Meadows, J., 2015. Increase of radiocarbon concentration in tree rings from Kujawy (SE Poland) around AD 774-775. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 361: 564–8, DOI: 10.1016/j.nimb.2015.03.035.

10. Büntgen, U., Myglan, V.S., Ljungqvist, F.C., McCormick, M., Di Cosmo, N., Sigl, M., et al., 2016. Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD. *Nature Geoscience* 9(3): 231–6, DOI: 10.1038/ngeo2652.

11. Park, J., Southon, J., Fahrni, S., Creasman, P.P., Mewaldt, R., 2017. Relationship between solar activity and $\Delta 14\text{C}$ peaks in AD 775, AD 994, and 660 BC. *Radiocarbon* 59(4): 1147–56, DOI: 10.1017/RDC.2017.59.

12. Uusitalo, J., Arppe, L., Hackman, T., Helama, S., Kovaltsov, G., Mielikäinen, K., et al., 2018. Solar superstorm of AD 774 recorded subannually by Arctic tree rings. *Nature Communications* 9(1): 1–8, DOI: 10.1038/s41467-018-05883-1.

13. Park, J., Seo, J.-W., Hong, W., Park, G., Sung, K., Park, Y.J., et al., 2020. Estimation of the occurrence time of the $\Delta 14\text{C}$ peak in ad 775 based on the oxidation time of ^{14}C in the atmosphere and $\Delta 14\text{C}$ values in subannual tree rings. *Radiocarbon* 62(5): 1285–98, DOI: 10.1017/RDC.2020.69.

14. Park, J.H., Southon, J., Seo, J.W., Creasman, P.P., Hong, W., Park, G., et al., 2021. $\Delta^{14}\text{C}$ Peaks Appearing in Earlywood and Latewood Tree Rings (AD 770-780) in Northeastern Arizona. *Radiocarbon* 63(1): 223–8, DOI: 10.1017/RDC.2020.108.
15. Miyake, F., Masuda, K., Nakamura, T., 2013. Another rapid event in the carbon-14 content of tree rings. *Nature Communications* 4: 1–6, DOI: 10.1038/ncomms2783.
16. Miyake, F., Masuda, K., Hakozaiki, M., Nakamura, T., Tokanai, F., Kato, K., et al., 2014. Verification of the Cosmic-Ray Event in AD 993–994 by Using a Japanese Hinoki Tree. *Radiocarbon* 56(3): 1189–94, DOI: 10.2458/56.17769.
17. Fogtmann-Schulz, A., Østbø, S.M., Nielsen, S.G.B., Olsen, J., Karoff, C., Knudsen, M.F., 2017. Cosmic ray event in 994 C.E. recorded in radiocarbon from Danish oak. *Geophysical Research Letters* 44(16): 8621–8, DOI: 10.1002/2017GL074208.
18. Miyake, F., Masuda, K., Nakamura, T., Kimura, K., Hakozaiki, M., Jull, A.J.T., et al., 2017. Search for annual ^{14}C excursions in the past. *Radiocarbon* 59(2): 315–20, DOI: 10.1017/RDC.2016.54.
19. Miyake, F., Jull, A.J.T., Panyushkina, I.P., Wacker, L., Salzer, M., Baisan, C.H., et al., 2017. Large ^{14}C excursion in 5480 BC indicates an abnormal sun in the mid-Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(5): 881–4, DOI: 10.1073/pnas.1613144114.
20. Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., et al., 2009. IntCal09 and Marine09 Radiocarbon Age Calibration Curves, 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon* 51(4): 1111–50, DOI: 10.1017/S0033822200034202.
21. Sakurai, H., Tokanai, F., Miyake, F., Horiuchi, K., Masuda, K., Miyahara, H., et al., 2020. Prolonged production of ^{14}C during the ~660 BCE solar proton event from Japanese tree rings. *Scientific Reports* 10(1): 1–7, DOI: 10.1038/s41598-019-57273-2.
22. Rakowski, A.Z., Pawlyta, J., Miyahara, H., Krapiec, M., Molnár, M., Wiktorowski, D., et al., 2023. Radiocarbon concentration in sub-annual tree rings from Poland around 660 BCE. *Radiocarbon*: 1–10, DOI: 10.1017/RDC.2023.79.
23. Wang, F.Y., Yu, H., Zou, Y.C., Dai, Z.G., Cheng, K.S., 2017. A rapid cosmic-ray increase in BC 3372-3371 from ancient buried tree rings in China. *Nature Communications* 8(1): 4–8, DOI: 10.1038/s41467-017-01698-8.
24. Jull, A.J.T., Panyushkina, I.P., Molnár, M., Varga, T., Wacker, L., Brehm, N., et al., 2021. Rapid ^{14}C excursion at 3372-3371 BCE not observed at two different locations. *Nature Communications* 12(1): 10–2, DOI: 10.1038/s41467-020-20695-y.
25. Jull, A.J.T., Panyushkina, I., Miyake, F., Masuda, K., Nakamura, T., Mitsutani, T., et al., 2018. More rapid ^{14}C excursions in the tree-ring record: A record of different kind of solar activity at about 800 BC? *Radiocarbon* 60(4): 1237–48, DOI: 10.1017/RDC.2018.53.
26. Miyake, F., Panyushkina, I.P., Jull, A.J.T., Adolphi, F., Brehm, N., Helama, S., et al., 2021. A Single-Year Cosmic Ray Event at 5410 BCE Registered in ^{14}C of Tree Rings. *Geophysical Research Letters* 48(11), DOI: 10.1029/2021GL093419.
27. Brehm, N., Bayliss, A., Christl, M., Synal, H.-A., Adolphi, F., Beer, J., et al., 2021. Eleven-year solar cycles over the last millennium revealed by radiocarbon in tree rings. *Nature Geoscience* 14(1): 10–5, DOI: 10.1038/s41561-020-00674-0.
28. Terrasi, F., Marzaioli, F., Buompane, R., Passariello, I., Porzio, G., Capano, M., et al., 2020. Can the ^{14}C production in 1055 CE be affected by SN1054? *Radiocarbon* 62(5): 1403–18, DOI: 10.1017/RDC.2020.58.
29. Panyushkina, I., Livina, V., Molnár, M., Varga, T., Jull, A.J.T., 2022. Scaling the ^{14}C -excursion signal in multiple tree-ring series with dynamic time warping. *Radiocarbon* 64(6): 1587–95, DOI: 10.1017/RDC.2022.25.
30. Miyahara, H., Tokanai, F., Moriya, T., Takeyama, M., Sakurai, H., Ohyama, M., et al., 2022. Recurrent Large-Scale Solar Proton Events Before the Onset of the Wolf Grand Solar Minimum. *Geophysical Research Letters* 49(5): 1–8, DOI: 10.1029/2021GL097201.

31. Brehm, N., Christl, M., Knowles, T.D.J., Casanova, E., Evershed, R.P., Adolphi, F., et al., 2022. Tree-rings reveal two strong solar proton events in 7176 and 5259 BCE. *Nature Communications* 13(1): 1196, DOI: 10.1038/s41467-022-28804-9.
32. Reimer, P.J., Austin, W.E.N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., et al., 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon* 62(4): 725–57, DOI: 10.1017/RDC.2020.41.
33. Bard, E., Miramont, C., Capano, M., Guibal, F., Marschal, C., Rostek, F., et al., 2023. A radiocarbon spike at 14,300 cal yr BP in subfossil trees provides the impulse response function of the global carbon cycle during the Late Glacial. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 381(2261), DOI: 10.1098/rsta.2022.0206.
34. Allen, J., 2012. Clue to an ancient cosmic-ray event? *Nature* 486(7404): 473–473, Doi: 10.1038/486473e.
35. Dee, M., Pope, B., Miles, D., Manning, S., Miyake, F., 2017. Supernovae and single-year anomalies in the atmospheric radiocarbon record. *Radiocarbon* 59(2): 293–302, DOI: 10.1017/RDC.2016.50.
36. Hambaryan, V. V., Neuhäuser, R., 2013. A Galactic short gamma-ray burst as cause for the 14C peak in AD 774/5. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 430(1): 32–6, DOI: 10.1093/mnras/sts378.
37. Pavlov, A.K., Blinov, A. V., Konstantinov, A.N., Ostryakov, V.M., Vasilyev, G.I., Vdovina, M.A., et al., 2013. AD 775 pulse of cosmogenic radionuclides production as imprint of a Galactic gamma-ray burst. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 435(4): 2878–84, DOI: 10.1093/mnras/stt1468.
38. Liu, Y., Zhang, Z.F., Peng, Z.C., Ling, M.X., Shen, C.C., Liu, W.G., et al., 2014. Mysterious abrupt carbon-14 increase in coral contributed by a comet. *Scientific Reports* 4: 14–7, DOI: 10.1038/srep03728.
39. Chapman, J., Csikszentmihalyi, M., Neuhäuser, R., 2014. The Chinese comet observation in AD 773 January. *Astronomische Nachrichten* 335(9): 964–7, DOI: 10.1002/asna.201412069.
40. Eichler, D., Mordecai, D., 2012. Comet encounters and carbon 14. *Astrophysical Journal Letters* 761(2): 3–5, DOI: 10.1088/2041-8205/761/2/L27.
41. Chai, Y.-T., Zou, Y.-C., 2015. Searching for events in Chinese ancient records to explain the increase in 14 C from AD 774–775 and AD 993–994. *Research in Astronomy and Astrophysics* 15(9): 1504–12, DOI: 10.1088/1674-4527/15/9/007.
42. Melott, A.L., Thomas, B.C., 2012. Causes of an ad 774-775 14 C increase. *Nature* 491(7426): E1–2, DOI: 10.1038/nature11695.
43. Thomas, B.C., Melott, A.L., Arkenberg, K.R., Snyder, B.R., 2013. Terrestrial effects of possible astrophysical sources of an AD 774-775 increase in 14C production. *Geophysical Research Letters* 40(6): 1237–40, DOI: 10.1002/grl.50222.
44. Usoskin, I.G., Kovaltsov, G.A., 2021. Mind the Gap: New Precise 14C Data Indicate the Nature of Extreme Solar Particle Events. *Geophysical Research Letters* 48(17): 1–5, DOI: 10.1029/2021GL094848.
45. Knudsen, M.F., Riisager, P., Donadini, F., Snowball, I., Muscheler, R., Korhonen, K., et al., 2008. Variations in the geomagnetic dipole moment during the Holocene and the past 50 kyr. *Earth and Planetary Science Letters* 272(1–2): 319–29, DOI: 10.1016/j.epsl.2008.04.048.
46. Panovska, S., Constable, C.G., Korte, M., 2018. Extending Global Continuous Geomagnetic Field Reconstructions on Timescales Beyond Human Civilization. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 19(12): 4757–72, DOI: 10.1029/2018GC007966.
47. Mekhaldi, F., Muscheler, R., Adolphi, F., Aldahan, A., Beer, J., McConnell, J.R., et al., 2015. Multiradionuclide evidence for the solar origin of the cosmic-ray events of 774/5 and 993/4. *Nature Communications* 6: 1–8, DOI: 10.1038/ncomms9611.
48. Usoskin, I., Miyake, F., Baroni, M., Brehm, N., Dalla, S., Hayakawa, H., et al., 2023. Extreme Solar Events: Setting up a Paradigm. *Space Science Reviews* 219(8), DOI: 10.1007/s11214-023-01018-1.

49. Zhou, D., Wang, C., Peng, Z., Rutledge, R., Sun, Y., Liang, J., et al., 2013. The Solar Cosmic-Ray Origin for the Rapid 14 C Increase in AD775. 33Rd International Cosmic Ray Conference, Rio De Janeiro 2013 the Astroparticle Physics Conference, p. 14–7.
50. Zhou, D., Wang, C., Zhang, B., Zhang, S., Zhou, P., Sun, Y., et al., 2014. Super solar particle event around AD775 was found. *Chinese Science Bulletin* 59(22): 2736–42, DOI: 10.1007/s11434-014-0345-z.
51. Neuhäuser, R., Kunitzsch, P., 2014. A transient event in AD 775 reported by al-Tabarī: A bolide - not a nova, supernova, or kilonova. *Astronomische Nachrichten* 335(9): 968–80, DOI: 10.1002/asna.201412118.
52. Chapman, J., Neuhäuser, D.L., Neuhäuser, R., Csikszentmihalyi, M., 2015. A review of East Asian reports of aurorae and comets circa AD 775. *Astronomische Nachrichten* 336(6): 530–44, DOI: 10.1002/asna.201512193.
53. Stephenson, F.R., 2015. Astronomical evidence relating to the observed 14 C increases in A.D. 774-5 and 993-4 as determined from tree rings. *Advances in Space Research* 55(6): 1537–45, DOI: 10.1016/j.asr.2014.12.014.
54. Neuhäuser, R., Neuhäuser, D.L., 2015. Solar activity around AD 775 from aurorae and radiocarbon. *Astronomische Nachrichten* 336(3): 225–48, DOI: 10.1002/asna.201412160.
55. Hayakawa, H., Tamazawa, H., Kawamura, A.D., Isobe, H., 2015. Records of sunspot and aurora during CE 960-1279 in the Chinese chronicle of the Sòng dynasty. *Earth, Planets and Space* 67(1), DOI: 10.1186/s40623-015-0250-y.
56. Hayakawa, H., Isobe, H., Kawamura, A.D., Tamazawa, H., Miyahara, H., Kataoka, R., 2016. Unusual rainbow and white rainbow: A new auroral candidate in oriental historical sources. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 68(3): 1–8, DOI: 10.1093/pasj/psw032.
57. Hayakawa, H., Iwahashi, K., Tamazawa, H., Ebihara, Y., Kawamura, A.D., Isobe, H., et al., 2017. Records of auroral candidates and sunspots in Rikkokushi, chronicles of ancient Japan from early 7th century to 887. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 69(6): 1–13, DOI: 10.1093/pasj/psx087.
58. Tamazawa, H., Kawamura, A.D., Hayakawa, H., Tsukamoto, A., Isobe, H., Ebihara, Y., 2017. Records of sunspot and aurora activity during 581-959 CE in Chinese official histories concerning the periods of Suí, Táng, and the Five Dynasties and Ten Kingdoms. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 69(2): 1–14, DOI: 10.1093/pasj/psw132.
59. Hayakawa, H., Mitsuma, Y., Fujiwara, Y., Kawamura, A.D., Kataoka, R., Ebihara, Y., et al., 2017. The earliest drawings of datable auroras and a two-tail comet from the Syriac Chronicle of Zūqnīn. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 69(2): 1–15, DOI: 10.1093/pasj/psw128.
60. Hayakawa, H., Tamazawa, H., Ebihara, Y., Miyahara, H., Kawamura, A.D., Aoyama, T., et al., 2017. Records of sunspots and aurora candidates in the Chinese official histories of the Yuán and Míng dynasties during 1261–1644. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 69(4): 1–25, DOI: 10.1093/pasj/psx045.
61. Neuhäuser, D.L., Neuhäuser, R., Chapman, J., 2018. New sunspots and aurorae in the historical Chinese text corpus? Comments on uncritical digital search applications. *Astronomische Nachrichten* 339(1): 10–29, DOI: 10.1002/asna.201713390.
62. Stephenson, F.R., Willis, D.M., Hayakawa, H., Ebihara, Y., Scott, C.J., Wilkinson, J., et al., 2019. Do the Chinese Astronomical Records Dated AD 776 January 12/13 Describe an Auroral Display or a Lunar Halo? A Critical Re-examination. *Solar Physics* 294(4): 1–24, DOI: 10.1007/s11207-019-1425-7.
63. Hayakawa, H., Stephenson, F.R., Uchikawa, Y., Ebihara, Y., Scott, C.J., Wild, M.N., et al., 2019. The Celestial Sign in the Anglo-Saxon Chronicle in the 770s: Insights on Contemporary Solar Activity. *Solar Physics* 294(4): 1–30, DOI: 10.1007/s11207-019-1424-8.
64. Maden, N., 2020. Historical aurora borealis catalog for Anatolia and Constantinople (hABcAC) during the Eastern Roman Empire period: Implications for past solar activity. *Annales Geophysicae* 38(4): 889–99, DOI: 10.5194/angeo-38-889-2020.
65. Wang, Y., Chen, S., Xu, K., Yan, L., Yue, X., He, F., et al., 2021. Ancient Auroral Records Compiled From Korean Historical Books. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 126(1): 1–6, DOI: 10.1029/2020JA028763.

66. Borisenkov, E.P., Pasetsky, B.M. *Tsyacheletnyaya letopis' neobychainykh yavlenii prirody* [The millennial chronicle of extraordinary natural phenomena]. Moscow: Mysl, 1988.
67. Okamoto, S., Notsu, Y., Maehara, H., Namekata, K., Honda, S., Ikuta, K., et al., 2021. Statistical Properties of Superflares on Solar-type Stars: Results Using All of the Kepler Primary Mission Data. *The Astrophysical Journal* 906(2): 72, DOI: 10.3847/1538-4357/abc8f5.
68. Usoskin, I.G., 2023. A history of solar activity over millennia. vol. 20, Springer International Publishing.
69. Sukhodolov, T., Usoskin, I., Rozanov, E., Asvestari, E., Ball, W.T., Curran, M.A.J., et al., 2017. Atmospheric impacts of the strongest known solar particle storm of 775 AD. *Scientific Reports* 7: 1–9, DOI: 10.1038/srep45257.
70. Miyake, F., Usoskin, I., Poluianov, S., 2019. *Extreme Solar Particle Storms*. IOP Publishing.
71. Kanzawa, K., Miyake, F., Horiuchi, K., Sasa, K., Takano, K., Matsumura, M., et al., 2021. High-Resolution ¹⁰Be and ³⁶Cl Data From the Antarctic Dome Fuji Ice Core (~100 Years Around 5480 BCE): An Unusual Grand Solar Minimum Occurrence? *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 126(10), DOI: 10.1029/2021JA029378.
72. Usoskin, I.G., Solanki, S.K., Krivova, N.A., Hofer, B., Kovaltsov, G.A., Wacker, L., et al., 2021. Solar cyclic activity over the last millennium reconstructed from annual ¹⁴C data. *Astronomy and Astrophysics* 649: 1–13, DOI: 10.1051/0004-6361/202140711.
73. Miyake, F., Hakozaiki, M., Kimura, K., Tokanai, F., Nakamura, T., Takeyama, M., et al., 2022. Regional Differences in Carbon-14 Data of the 993 CE Cosmic Ray Event. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 9(July): 1–8, DOI: 10.3389/fspas.2022.886140.
74. Sigl, M., Winstrup, M., McConnell, J.R., Welten, K.C., Plunkett, G., Ludlow, F., et al., 2015. Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years. *Nature* 523(7562): 543–9, DOI: 10.1038/nature14565.
75. Paleari, C.I., Mekhaldi, F., Adolphi, F., Christl, M., Voekenhuber, C., Gauthschi, P., et al., 2022. Cosmogenic radionuclides reveal an extreme solar particle storm near a solar minimum 9125 years BP. *Nature Communications* 13(1), DOI: 10.1038/s41467-021-27891-4.
76. Fowler, A.M., 2015. Are cosmogenic events about to revolutionise the crossdating of multi-millennial tree-ring chronologies? *Dendrochronologia* 35: 1–3, DOI: 10.1016/j.dendro.2015.05.004.
77. Walker, M., Mueller, A., Allen, K., Fenwick, P., Agrawal, V., Anchukaitis, K., et al., 2023. High resolution radiocarbon spike confirms tree ring dating with low sample depth. *Dendrochronologia* 77(October 2022): 126048, DOI: 10.1016/j.dendro.2022.126048.
78. Römer, P., Reinig, F., Konter, O., Friedrich, R., Urban, O., Čáslavský, J., et al., 2023. Multi-proxy crossdating extends the longest high-elevation tree-ring chronology from the Mediterranean. *Dendrochronologia* 79(March), DOI: 10.1016/j.dendro.2023.126085.
79. Black, B.A., Pearl, J.K., Pearson, C.L., Pringle, P.T., Frank, D.C., Page, M.T., et al., 2023. A multifault earthquake threat for the Seattle metropolitan region revealed by mass tree mortality 2(September): 1–10, DOI: 10.1126/sciadv.adh4973.
80. Quarta, G., Filippo, A. Di., Calcagnile, L., D'Elia, M., Biondi, F., Saba, E.P., et al., 2019. Identifying the 993-994 CE Miyake event in the oldest dated living tree in Europe. *Radiocarbon* 61(5): 1317–25, DOI: 10.1017/RDC.2019.37.
81. Wacker, L., Güttler, D., Goll, J., Hurni, J.P., Synal, H.-A., Walti, N., 2014. Radiocarbon Dating to a Single Year by Means of Rapid Atmospheric ¹⁴C Changes. *Radiocarbon* 56(2): 573–9, DOI: 10.2458/56.17634.
82. Oppenheimer, C., Wacker, L., Xu, J., Galván, J.D., Stoffel, M., Guillet, S., et al., 2017. Multi-proxy dating the 'Millennium Eruption' of Changbaishan to late 946 CE. *Quaternary Science Reviews* 158: 164–71, DOI: 10.1016/j.quascirev.2016.12.024.
83. Hakozaiki, M., Miyake, F., Nakamura, T., Kimura, K., Masuda, K., Okuno, M., 2018. Verification of the annual dating of the 10th century baitoushan volcano eruption based on an AD 774-775 radiocarbon spike. *Radiocarbon* 60(1): 261–8, DOI: 10.1017/RDC.2017.75.

84. Büntgen, U., Eggertsson, Ó., Wacker, L., Sigl, M., Ljungqvist, F.C., di Cosmo, N., et al., 2017. Multi-proxy dating of Iceland's major pre-settlement Katla eruption to 822-823 CE. *Geology* 45(9): 783–6, DOI: 10.1130/G39269.1.
85. Kuitens, M., Panin, A., Scifo, A., Arzhantseva, I., Kononov, Y., Doeve, P., et al., 2020. Radiocarbon-based approach capable of subannual precision resolves the origins of the site of Por-Bajin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117(25): 14038–41, DOI: 10.1073/pnas.1921301117.
86. Krapiec, M., Rakowski, A., Pawlyta, J., Wiktorowski, D., Bolka, M., 2021. Absolute dendrochronological scale for pine (*Pinus sylvestris* L.) from Ujście (NW Poland), dated using rapid atmospheric ¹⁴C changes. *Radiocarbon* 63(4): 1205–14, DOI: 10.1017/RDC.2020.116.
87. Kuitens, M., Wallace, B.L., Lindsay, C., Scifo, A., Doeve, P., Jenkins, K., et al., 2022. Evidence for European presence in the Americas in ad 1021. *Nature* 601(7893): 388–91, DOI: 10.1038/s41586-021-03972-8.
88. Meadows, J., Zunde, M., Lēgere, L., Dee, M.W., Hamann, C., 2023. Single-Year 14 C Dating of the Lake-Fortress At Āraiši, Latvia. *Radiocarbon* 00(00): 1–11, DOI: 10.1017/rdc.2023.24.
89. Maczkowski, A., Pearson, C., Francuz, J., Giagkoulis, T., Szidat, S., Wacker, L., et al., 2023. Absolutely dating the European Neolithic through a rapid ¹⁴C excursion (October), DOI: 10.21203/rs.3.rs-3419721/v1.
90. Barrett, J.H., 2022. A radiocarbon revolution sheds light on the Vikings. *Nature* 601(7893): 326–7, DOI: 10.1038/d41586-021-03769-9.
91. Eisenstein, M., 2023. Seven technologies to watch in 2023. *Nature* 613(7945): 794–7, DOI: 10.1038/d41586-023-00178-y.
92. Price, M., 2023. Marking time. *Science* 380(6641): 124–8, DOI: 10.1126/science.adi2032.
93. Dee, M.W., Pope, B.J.S., 2016. Anchoring historical sequences using a new source of astro-chronological tie-points. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 472(2192), DOI: 10.1098/rspa.2016.0263.
94. Helama, S., Mielikäinen, K., Timonen, M., Eronen, M., 2008. Finnish supra-long tree-ring chronology extended to 5634 BC. *Norsk Geografisk Tidsskrift* 62(4): 271–7, DOI: 10.1080/00291950802517593.
95. Hantemirov, R.M., Shiyatov, S.G., Gorlanova, L.A., Kukarskih, V. V., Surkov, A.Y., Hamzin, I.R., et al., 2021. An 8768-year Yamal Tree-ring Chronology as a Tool for Paleoecological Reconstructions. *Russian Journal of Ecology* 52(5): 419–27, DOI: 10.1134/S1067413621050088.
96. Heaton, T.J., Bard, E., Ramsey, C.B., Butzin, M., Köhler, P., Muscheler, R., et al., 2021. Radiocarbon: A key tracer for studying Earth's dynamo, climate system, carbon cycle, and Sun. *Science* 374(6568), DOI: 10.1126/science.abd7096.

Сведения об авторе

✉ *Хантемиров Рашит Мигатович* – доктор биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории естественнонаучных методов в гуманитарных исследованиях Уральского гуманитарного института Уральского федерального университета, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620002; ведущий научный сотрудник лаборатории дендрохронологии Института экологии растений и животных УрО РАН, ул. 8 Марта, 202, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620144, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3033-8312>, e-mail: rashit@ipae.uran.ru.

Information about the author

Rashit M. Hantemirov – Dr. Sci. (Biol.), Senior Researcher of the Laboratory of Natural Methods in Humanities, Ural Institute of Humanities, Ural Federal University, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russian Federation, 620002; Senior Researcher of the Laboratory of Dendrochronology, Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Sciences, 8 Marta str., 202, Ekaterinburg, Russian Federation, 620144, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3033-8312>, e-mail: rashit@ipae.uran.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author