

# ВАРИАЦИИ ПОЛНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ ПО ДАННЫМ О КОНЦЕНТРАЦИИ $^{10}\text{Be}$ В АНТАРКТИЧЕСКОМ ЛЬДУ

© 2025 г. М. Г. Огурцов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 25.04.2025 г.

После доработки 04.08.2025 г.; принята к публикации 19.08.2025 г.

В последнее время был получен ряд долговременных реконструкций полной солнечной радиации (TSI), указывающих на то, что амплитуда ее вековых вариаций не превышает  $1 \text{ Вт/м}^2$ . Такая малая амплитуда предполагает очень слабое влияние TSI на изменение климата Земли как в прошлом, так и в будущем. В настоящей работе показано, что данные по концентрации космогенного бериллия во льдах центральной Антарктиды плохо вписываются в сценарий малой амплитуды. Вариации концентрации  $^{10}\text{Be}$  в антарктическом льду указывают на то, что рост TSI может достигать  $1.4\text{--}2.7 \text{ Вт/м}^2$  после окончания минимума Маундера (конец XVII в.) и до  $3.4 \text{ Вт/м}^2$  после минимума Шперера (первая половина XV в.). Обсуждены причины сохраняющихся неопределенностей и направление дальнейших исследований.

*Ключевые слова:* Солнце, солнечная палеоастрофизика, солнечная активность.

DOI: 10.31857/S0320010825040068

## ВВЕДЕНИЕ

Полная солнечная радиация (total solar irradiance, TSI) представляет собой значение интегрального по всему спектру потока солнечной энергии, приходящего в верхнюю часть земной атмосферы при среднем расстоянии между Солнцем и Землей. Вариации этой величины тесно связаны с изменениями магнитной активности Солнца. Поэтому сведения о временных вариациях TSI представляют значительный интерес для солнечной астрофизики. Однако на сегодня эти сведения весьма ограничены. Какова амплитуда долговременных вариаций этой величины? Всегда ли TSI изменяется синхронно с основными солнечными циклами? Полностью ли определяются вариации TSI соответствующими изменениями числа солнечных пятен и факелов? Ответы на эти вопросы до конца не ясны, в первую очередь по причине краткости экспериментальных данных о полной солнечной радиации – систематические и надежные инструментальные измерения TSI начались лишь в 1978 г. Помимо чисто научного интереса, данные о вариациях TSI имеют и практическое значение, поскольку приходящая от Солнца радиация является одним из климатообразующих факторов. Однако наши знания о долговременных вариациях этой величины пока еще ограничены. Регулярный мониторинг TSI спутниковыми радиометрами начался в 1978 г. Кросс-калибровка и объединение данных от разных инструментов в одну серию создают определенные проблемы, напри-

мер, заполнение пробела ACRIM (ACRIM gap, июль 1989 г.—октябрь 1991 г.) (Кривова и др., 2009; Скафетта, Уилсон, 2019; Амдур, Хайберс, 2023). Поэтому различные версии экспериментально измеренной величины TSI, имеющиеся в настоящее время (ACRIM, PMOD, IRMB), дают различные значения долгосрочного тренда, вследствие чего по вопросу об амплитуде вековой вариации TSI возникли продолжительные дискуссии (Захариас, 2014; Дюдок де Вит и др., 2017; Скафетта, 2023). Наши знания о вариациях TSI в доинструментальную эпоху еще менее полны, особенно если брать период ранее конца XIX в., когда стали доступны наблюдения за полным диском Солнца. В настоящее время имеются три типа реконструкций полной солнечной радиации ранее 1978 г., полученные с помощью различных индикаторов, как прямых инструментальных, так и косвенных:

а) Реконструкции TSI, полученные косвенным способом, при помощи долгоживущих космогенных радиоизотопов. Они используют концентрации изотопов  $^{10}\text{Be}$  и  $^{14}\text{C}$  в земных архивах в качестве индикаторов солнечной магнитной активности и позволяют реконструировать TSI в масштабах времени от многих столетий до тысячелетий.

Несмотря на значительные успехи, достигнутые солнечной палеоастрофизикой в последние годы (см. Усоскин, 2023), эти реконструкции все еще не свободны от ряда недостатков. Наши знания о процессах, которые определяют концентрацию радионуклидов в природных архивах в прошлом — их перераспределение в земных резервуарах, перенос и атмосферное

\*Электронный адрес: maxim.ogurtsov@mail.ioffe.ru

перемешивание, дальнейшее архивирование, значение геомагнитного дипольного момента, — не всегда достаточно точны. Сохраняющиеся неопределенности моделей могут существенно влиять на их результаты. Другим недостатком является то, что данные по космогенным изотопам не позволяют извлечь никакой информации о факельной активности, вариации которой также оказывают существенное влияние на долговременные изменения TSI (Соланки и др., 2002; Клетте и др., 2023).

б) Реконструкции TSI, полученные при помощи телескопных данных о числе солнечных пятен. Регистрация солнечных пятен началась в начале XVII в. Эти временные серии обобщают результаты большого количества астрономов, использовавших разные телескопы и различные методики наблюдения и подсчета солнечных пятен. Они также имеют недостатки. Во-первых, качество наблюдений солнечных пятен ухудшается по мере углубления в прошлое. Из-за возникающих вследствие этого неопределенностей значительная разница между существующими в настоящее время версиями данных о группах солнечных пятен сохраняется до второй половины XIX в. (см. рис. 2 из Чатзистергос и др., 2023). Огурцов (2013) высказал сомнение в принципиальной пригодности инструментальных наблюдений, проведенных до середины XIX в., для количественной оценки солнечной активности. Другая проблема заключается в том, что данные о числе солнечных пятен, также как и данные о концентрации космогенных изотопов, не содержат никакой информации об эволюции солнечных факелов.

в) Реконструкции TSI, использующие как инструментальные наблюдения солнечных пятен, так и наблюдения полного диска Солнца в однократно ионизированной линии Ca—Ca II K. Данные по Ca II K доступны с конца XIX в. (Чатзистергос и др., 2021, 2022). Они дают информацию об эволюции солнечных факелов. Использование фотографических данных в линии Ca II K для реконструкции полной солнечной радиации началось более 20 лет назад (Фоукал, 2012; Ванг, Лин, 2021; Ксю и др., 2021; Пенза и др., 2022; Чатзистергос и др., 2023). К настоящему времени достигнуты успехи в разработке эмпирических и полуэмпирических моделей, которые связывают вариации TSI с соответствующими изменениями числа ярких факелов и темных солнечных пятен (Чатзистергос и др., 2023). Такие модели, как SATIRE, NRLST, EMPIRE, CHRONOS, LIRICA, уже применялись для реконструкции TSI на различных временных масштабах (см. Ву и др., 2018; Егорова и др. 2018; Локвуд и Болл, 2020; Чатзистергос и др., 2024). Реконструкции, которые использовали наблюдения в линии Ca II K и, следовательно, основаны на сочетании данных о факелах и солнечных пятнах, на сегодняшний день являются наиболее точным и надежным источником информации об изменениях TSI ранее 1978 г.

Таким образом, реконструкции, основанные на данных по космогенным изотопам и солнечным пятнам, охватывают достаточно длительные временные интервалы (от нескольких столетий до тысячелетий), но страдают от значительных неопределенностей. Как следствие, различные реконструкции TSI сильно отличаются друг от друга. Например, имеющиеся оценки  $\Delta TSI_{mM}^{LMm}$  — роста TSI между поздним минимумом Маундера (LMm, конец XVII—начало XVIII в.) и современным максимумом (mM, 1950 г.—начало XXI века) — охватывают диапазон от 0.2 до 5.8 Вт/м<sup>2</sup> (см. табл. 1).

Реконструкции TSI, которые используют данные как по солнечным пятнам, так и по факелам, лучше согласуются друг с другом (см. рис. 16а из работы Ванг и Лин, 2021). Однако они довольно короткие и начинаются только с конца XIX в.

Таблица 1 показывает, что большинство реконструкций, дающих большую амплитуду (БА) вековых изменений полной солнечной радиации, были получены на ранних этапах исследований. В то время как все большее число современных экспертов приходит к выводу, что величина долговременных вариаций TSI, включая  $\Delta TSI_{mM}^{LMm}$ , была менее 1 Вт/м<sup>2</sup> (см. также Шривер и др., 2011; Коддингтон и др., 2016). В пользу малой амплитуды (МА) вековых колебаний TSI свидетельствуют и данные инструментальных измерений этой величины (Монтиллет и др., 2022). Представления о малой амплитуде долговременных вариаций TSI стали безусловно доминирующими в консорциуме IPCC (МГЭИК) (Михр и др. 2013; МГЭИК, 2021). Радиационный форсинг, связанный с изменениями солнечной активности, IPCC также считает крайне незначительным. В пятом отчете (Михр и др., 2013) величина солнечного радиационного форсинга в 1750–2011 гг. оценена в 0.0–0.10 Вт/м<sup>2</sup>. В шестом отчете (МГЭИК, 2021) эта величина равна  $-0.12 \dots + 0.15$  Вт/м<sup>2</sup>. IPCC явно отдает предпочтение МА-реконструкциям, таким как временные серии Юнгклауса и др. (2017), Маттеса и др. (2017) (см. рис. 2.2 из работы Гулев и др., 2021), которые дают величину векового изменения TSI менее 1 Вт/м<sup>2</sup>. Концепция малой амплитуды вариаций TSI, получила полное выражение в работе Локвуда и Болла (2020), где изменение среднего значения TSI после 1700 г. было оценено в  $-0.75 \dots 0.40$  Вт/м<sup>2</sup>. Авторы настоящей работы так же, как и (МГЭИК, 2021), не исключают того, что полная солнечная радиация в конце Маундеровского минимума была больше, чем в современную эпоху. Уровень доверия к полученным оценкам, фактически определяющийся степенью изученности данного явления, при этом считается средним (Михр и др., 2013; МГЭИК, 2021). Следует отметить, что, если вековые изменения в TSI следуют сценарию МА (амплитуда менее 1 Вт/м<sup>2</sup>), прямое солнечное воздействие на климат Земли оказывается крайне незначительным. В шестом отчете изменения

**Таблица 1.** Долговременные реконструкции полной солнечной радиации, полученные различными способами

Источник	Использованный индикатор TSI	$\Delta TSI_{MM}^{LMM}$ (Вт/м <sup>2</sup> )
Лин и др. (1992)	Солнечные индексы	3.3
Хойт и Шаттен (1993)	Солнечные пятна	4.5
Бард и др. (2000)	<sup>10</sup> Be	3.5
Ванг и др. (2005)	Солнечные индексы	1.0
Балмаседа и др. (2007)	Солнечные пятна	1.3
Делайгу и Бард (2011)	<sup>10</sup> Be	0.80
Шапиро и др. (2011)	<sup>10</sup> Be	6.3
Стейнхилбер и др. (2012)	<sup>14</sup> C, <sup>10</sup> Be	1.2
Рот и Джоос (2013)	<sup>14</sup> C	0.80
Веласко Херрера и др., (2015)	Солнечные пятна	0.70–0.80
Лин (2018)	<sup>14</sup> C, <sup>10</sup> Be	0.75–0.92
Ву и др. (2018)	<sup>14</sup> C, <sup>10</sup> Be	0.90
Егорова и др. (2018)	<sup>14</sup> C, <sup>10</sup> Be	4.7–5.8
Ванг и Лин (2021)	Солнечные пятна	0.2–0.7
Пенза и др. (2022)	<sup>14</sup> C, <sup>10</sup> Be	2.5
Девитт и др. (2022)	Солнечные пятна	0.15
Чатзистергос (2024)	Солнечные пятна	<1.0

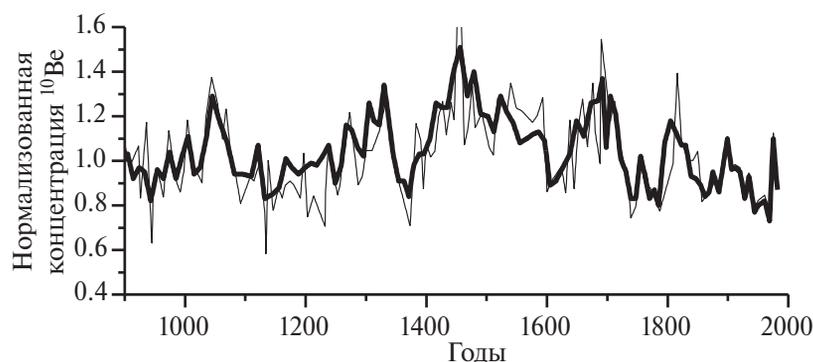
глобальной температуры, связанные с солнечной активностью, оцениваются в 0.01°C начиная с середины XVIII в. (МГЭИК, 2021). Шмутц (2021) оценил амплитуду колебаний глобальной температуры, вызванных вариациями TSI, в 0.02–0.05°C. Соответственно, столь незначительные вариации окажут крайне слабое влияние на будущую эволюцию климата (см. Седлачек и др., 2023).

Целью данной работы была проверка того, является ли сценарий с малой амплитудой изменений TSI в прошлом безусловно предпочтительным, и следует ли считать альтернативные сценарии полностью устаревшими. В качестве источника информации были использованы данные по концентрации космогенного <sup>10</sup>Be во льдах центральной Антарктиды.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Космогенный радионуклид <sup>10</sup>Be образуется в атмосфере Земли под действием космических лучей. Серии данных по концентрации космогенных изотопов в земных архивах служат хорошо известным показателем солнечной активности. В настоящей работе использованы данные о концентрации <sup>10</sup>Be в антарктическом льду, измеренные Бардом и др. (2000) и Делайгу и Бардом (2011). Данные Барда и др. (2000) охватывают временной интервал 843–1982 гг. н.э., а серия Делайгу и Барда (2011) охватывает временной интервал 695–1982 гг. н.э. Ряд Барда и др. (2000), приведенный в промилле, был преобразован в нормализованную концентрацию бериллия, используемую Делайгу и Бардом (2011). Обе бериллиевые серии показаны на рис. 1.

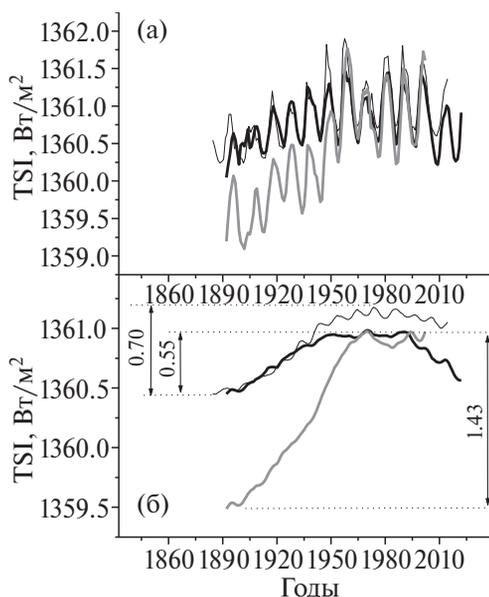
Временной ряд Барда и др. (2000) использовал только измерения <sup>10</sup>Be, сделанные на Южном полюсе, в то время как ряд Делайгу и Барда (2011) был основан на измерениях, сделанных во льдах как Южного полюса, так и купола Фудзи. Эти две станции находятся на расстоянии более 1000 км друг от друга. Хотя области центральной Антарктиды характеризуются довольно высокой метеорологической стабильностью (циклоны — основной источник краткосрочных погодных колебаний — редко проникают в глубь континента), влияние местных метеорологических условий на концентрацию <sup>10</sup>Be во льду нельзя полностью исключить. Поэтому объединение данных, полученных в двух достаточно удаленных местах, должно уменьшить влияние локальной метеорологии на бериллиевый ряд. Для оценки возможных климатических эффектов в данных по концентрации <sup>10</sup>Be Делайгу и Бард (2011) провели численный эксперимент, в котором они рассчитали концентрацию <sup>14</sup>C в атмосфере, используя скорость образования, основанную на концентрации бериллия, в качестве входных данных углеродообменной модели. Поскольку радиоуглерод хорошо перемешивается в атмосфере, его концентрация нечувствительна к колебаниям местного климата центральной Антарктиды. Убедительная корреляция ( $R_1 = 0.9$ ) между значениями  $\Delta^{14}\text{C}$ , измеренными и смоделированными с использованием ряда Делайгу и Барда (2011), доказывает слабость климатических эффектов в этой серии. Оба антарктических ряда были использованы для реконструкции TSI. Масштабный коэффициент, определяющий уменьшение TSI во время минимума Маундера по сравнению с со-



**Рис. 1.** Данные о концентрации  $^{10}\text{Be}$  в антарктическом льду. Тонкая линия – Бард и др. (2000), жирная линия – Делайгу и Бард (2011).

временным значением, является ключевым параметром для оценки изменений полной солнечной радиации в прошлом по данным  $^{10}\text{Be}$ . Значительная разница между реконструкциями, полученными в работах Бард и др. (2000) и Делайгу и Бард (2011), возникла из-за разницы в используемых значениях масштабного коэффициента. Бард и др. (2000) использовали в качестве этого значения 0.25% от современного среднего значения TSI, которое они полагали равным  $1361 \text{ Вт/м}^2$ . Делайгу и Бард (2011) использовали увеличение солнечной радиации между минимумом Маундера и минимумами последних циклов, равное  $0.5 \text{ Вт/м}^2$ , что было рекомендовано четвертым докладом МГЭИК (2007). Это значение, согласно МГЭИК (2007), вытекает из правдоподобного физического понимания процессов на Солнце, в то время как более высокие оценки  $\Delta TSI_{mM}^{LMm}$  базируются на предполагаемых изменениях TSI, основанных на устаревших данных о колебаниях яркости солнцеподобных звезд. В итоге, Бард и др. (2000) получили  $\Delta TSI_{mM}^{LMm} \approx 3.5 \text{ Вт/м}^2$ , в то время как Делайгу и Бард (2011) получили  $\Delta TSI_{mM}^{LMm} \approx 0.8 \text{ Вт/м}^2$ . Фактически, масштабирование в обоих случаях основывалось на весьма произвольных предположениях.

В настоящей работе для преобразования концентрации бериллия в полную солнечную радиацию (калибровки) вместо использования более или менее обоснованных предположений и догадок были использованы наиболее надежные современные реконструкции TSI, основанные на инструментальных данных не только о солнечных пятнах, но и Ca II K (Ванг и Лин, 2021; Пенза и др., 2022; Чатзистергос и др., 2021, 2024). Кривые, полученные в работах Ванг и Лин (2021), Пенза и др. (2022) с помощью модели NRLTSI2 и Чатзистергос и др. (2024) с помощью модели LIRICA, были отсканированы с соответствующих рисунков и оцифрованы. Эти серии охватывают период времени с конца XIX в. до настоящего времени. Здесь мы будем называть этот временной интервал третьим циклом Глейссберга (GIC3). Все три реконструкции показаны на рис. 2. Как следует из рис. 2, ам-



**Рис. 2.** Реконструкции TSI на основе комбинации факельного и пятенного компонентов: (а) – исходные данные, (б) – средние значения за 30 лет. Тонкая черная линия – временной ряд Ванга и Лин (2021) (модель NRLTSI2), толстая черная линия – временной ряд Чатзистергоса и др. (2024) (модель LIRICA), толстая серая линия – ряд Пензы и др. (2022). Все данные были отсканированы и оцифрованы.

плитуда изменения среднего значения TSI между концом XIX в. и серединой XX в. (минимум и максимум GIC3) составила  $\Delta TSI^{GIC3} \approx 0.55 \text{ Вт/м}^2$  для ряда (Чатзистергос и др., 2024),  $\Delta TSI^{GIC3} \approx 0.70 \text{ Вт/м}^2$  для ряда (Ванг, Лин, 2021) и  $\Delta TSI^{GIC3} \approx 1.42 \text{ Вт/м}^2$  для ряда (Пенза и др., 2022).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценки прошлых изменений в TSI были сделаны с использованием:

а) Двух рядов солнечного модуляционного потенциала (СМП), полученных Делайгу и Бардом (2011): ряда, полученного в предположении, что весь  $^{10}\text{Be}$ ,

отложившийся в центральной Антарктиде, был сформирован в высоких широтах, и ряда, предполагавшего вклад в 70% со средних широт (более реалистичное предположение). В случае локального выпадения концентрация  $^{10}\text{Be}$  оказывается практически независимой от вариаций геомагнитного момента Земли, а для геомагнитной коррекции перемешанного бериллия Делайгу и Бард (2011) использовали данные Корте и др. (2009) (Ко09).

(б) СМП, рассчитанного при помощи бериллиевого ряда Барда и др. (2000).

Солнечный модуляционный потенциал  $\Phi$ , основанный на серии Барда и др. (2000), вычислялся по формуле

$$\Phi(t) = -637 \ln \left( ([^{10}\text{Be}(t)] \times 0.052 - 0.014) \times \exp \left( - \frac{M(t)/M_0}{0.55 + 0.20M(t)/M_0} \right) \right),$$

где  $\Phi$  в МВ,  $[^{10}\text{Be}]$  – нормированная концентрация бериллия,  $M(t)$  – геомагнитный дипольный момент Земли,  $M_0 = 7.86 \times 10^{22}$  А м<sup>2</sup> – значение  $M(t)$  в современную эпоху (2000 г.). Эта формула является модифицированной версией формулы (б) из работы Огурцова (2018), которая была получена путем аппроксимации модели Ковальцова и Усоскина (2010), описывающей образование космогенного нуклида  $^{10}\text{Be}$  в атмосфере. В данной работе формула Огурцова (2018) была преобразована для использования концентрации  $^{10}\text{Be}$  в нормализованных единицах и нормирована таким образом, чтобы при отсутствии геомагнитной модуляции ( $M(t)/M_0 \equiv 1.0$ ) средний потенциал за 1950–1982 гг. был равен среднему значению  $\bar{\Phi}$  (1950–1982) = 552 МВ, полученному Делайгу и Бардом (2011), в предположении о чисто локальном производстве бериллия.

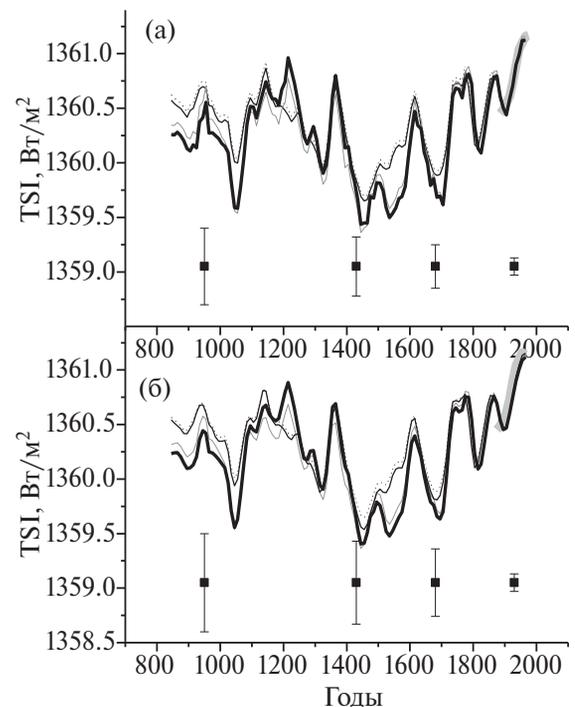
Значения  $M(t)$ , использованные для учета изменений геомагнитного момента, были взяты из реконструкций Корте и др. (2009) и Лихт и др. (2013) (Ко09 и Li13). Полная солнечная радиация рассчитывалась двумя методами:

а) С помощью простой линейной зависимости между TSI и СМП. Хотя линейный подход является весьма упрощенным, достаточно высокие коэффициенты корреляции между усредненными по 30 годам значениям  $\Phi$  и TSI, восстановленной в работах Ванга и Лин (2021), Пензы и др. (2022) и Чатзистергоса (2024), – 0.79–0.92 на интервале 1892–1982 гг. – свидетельствуют в пользу применимости данного упрощения.

б) Более усовершенствованным нелинейным методом, основанным на модели SATIRE-T, развитой в работе Ву и др. (2018). В рамках этой модели средняя за десятилетие спектральная плотность солнечного излучения считалась связанной со средними за десятилетие значениями потока открытого магнитного поля Солнца.

Оба этих метода детально описаны в Приложении. При восстановлении TSI использовались значения бериллиевых рядов до 1969 г. Две последние точки этих серий не учитывались, чтобы исключить резкий скачок концентрации бериллия в 1975 г. Эта часть ряда была получена с наиболее близких к поверхности слоев ядра (глубина не более 2 м), которые продолжают эффективно обмениваться воздухом с атмосферой. Поэтому концентрация  $^{10}\text{Be}$  в этих слоях наиболее чувствительна к метеорологическим флуктуациям, вероятно, породившим всплеск 1975 г. На рис. 3 показана полная солнечная радиация, восстановленная различными способами, с использованием ряда Ванг и Лин (2021) для калибровки.

Полученные в результате расчетов значения величин  $\Delta TSI_{mM}^{LMm}$  и  $\Delta TSI_{Mm}^{ESm}$  – увеличения TSI между поздним Маундеровским минимумом (LMm, конец XVII в.) ранним минимумом Шперера (ESm, первая половина XV в.) и современным максимумом – приведены в табл. 2. Курсивом в скобках показана вероятность того, что реальная амплитуда соответствующей вариации превышает 1.0 Вт/м<sup>2</sup>. Как следует из табл. 2, линейный и нелинейный методы реконструкции TSI дают достаточно близкие результаты.



**Рис. 3.** Реконструкции TSI, полученные с использованием бериллиевых рядов: Делайгу и Барда (2011), локальное выпадение – штриховая линия; Делайгу и Барда (2011), перемешивание – тонкая черная линия; Барда и др. (2000), Ко09 – тонкая серая линия; Барда и др. (2000), Li13 – жирная черная линия. Приведенные на рисунке ряды были калиброваны с помощью реконструкции TSI из работы Ванг и Лин (2021). Сама эта реконструкция показана жирной серой линией; (а) – линейная модель, (б) – нелинейная модель.

Таблица 2. Оценки долговременных вариаций полной солнечной радиации

Ряд TSI использованный для калибровки	Антарктический	Линейный подход		Нелинейный подход	
		$\Delta TSI_{mM}^{LMm}$ (Вт/м <sup>2</sup> )	$\Delta TSI_{Mm}^{ESm}$ (Вт/м <sup>2</sup> )	$\Delta TSI_{mM}^{LMm}$ (Вт/м <sup>2</sup> )	$\Delta TSI_{Mm}^{ESm}$ (Вт/м <sup>2</sup> )
Чатзистергос, (2024)	Делайгу и Бард, (2011), перемешивание	1.12 ± 0.18 (0.22)	1.33 ± 0.25 (0.08)	1.00 ± 0.28 (0.49)	1.22 ± 0.35 (0.37)
	Делайгу и Бард, (2011), локальный	1.0 ± 0.18 (0.51)	1.18 ± 0.27 (0.25)	0.97 ± 0.28 (0.53)	1.18 ± 0.35 (0.20)
	Бард и др., (2000), Ko09	1.11 ± 0.15 (0.24)	1.31 ± 0.24 (0.11)	1.08 ± 0.27 (0.39)	1.33 ± 0.34 (0.18)
	Бард и др., (2000), Li13	1.1 ± 0.16 (0.25)	1.27 ± 0.25 (0.16)	1.12 ± 0.27 (0.34)	1.30 ± 0.34 (0.16)
Ванг и Лин, (2021)	Делайгу и Бард, (2011), перемешивание	1.27 ± 0.20 (0.09)	1.47 ± 0.27 (0.03)	1.30 ± 0.31 (0.19)	1.59 ± 0.38 (0.23)
	Делайгу и Бард, (2011), локальный	1.23 ± 0.17 (0.09)	1.51 ± 0.24 (0.02)	1.22 ± 0.31 (0.27)	1.47 ± 0.38 (0.11)
	Бард и др., (2000), Ko09	1.44 ± 0.18 (5×10 <sup>-3</sup> )	1.80 ± 0.25 (<10 <sup>-3</sup> )	1.43 ± 0.31 (0.08)	1.75 ± 0.39 (0.03)
	Бард и др., (2000), Li13	1.48 ± 0.17 (3×10 <sup>-3</sup> )	1.72 ± 0.25 (2×10 <sup>-3</sup> )	1.48 ± 0.31 (0.06)	1.71 ± 0.38 (0.03)
Пенза и др., (2022)	Делайгу и Бард, (2011), перемешивание	2.77 ± 0.22 (<10 <sup>-3</sup> )	3.31 ± 0.29 (<10 <sup>-3</sup> )	2.53 ± 0.59 (5×10 <sup>-3</sup> )	3.09 ± 0.66 (2×10 <sup>-3</sup> )
	Делайгу и Бард, (2011), локальный	2.51 ± 0.22 (<10 <sup>-3</sup> )	2.99 ± 0.29 (<10 <sup>-3</sup> )	2.41 ± 0.56 (5×10 <sup>-3</sup> )	2.91 ± 0.63 (1×10 <sup>-3</sup> )
	Бард и др., (2000), Ko09	3.01 ± 0.22 (<10 <sup>-3</sup> )	3.47 ± 0.29 (<10 <sup>-3</sup> )	2.70 ± 0.57 (<10 <sup>-3</sup> )	3.30 ± 0.64 (<10 <sup>-3</sup> )
	Бард и др., (2000), Li13	3.02 ± 0.21 (<10 <sup>-3</sup> )	3.47 ± 0.28 (<10 <sup>-3</sup> )	2.78 ± 0.56 (1×10 <sup>-3</sup> )	3.21 ± 0.63 (1×10 <sup>-3</sup> )

Как следует из табл. 2, только бериллиевые данные, прокалиброванные при помощи ряда Чатзистергос (2024), более-менее согласуются с предположением о малой амплитуде вековых колебаний полной солнечной радиации. Если для калибровки использовать данные Ванг и Лин (2021) и Пенза и др. (2022), то изменение среднего значения TSI между современной эпохой и эпохами Маундеровского и Шпереровского минимума может достигать 1.80–3.47 Вт/м<sup>2</sup>, а вероятность того, что долговременные вариации этой величины не превосходят 1 Вт/м<sup>2</sup> (МА), оказывается незначительной.

Также была оценена возможность того, что средняя величина TSI в 1700 г. была выше, чем в современную эпоху – сценарий, который МГЭИК (2021) и Локвуд и Болл (2020) считают возможным. Вероятность того, что восстановленная в данной работе TSI, средняя за период 1685–1725 гг., была выше средней за

1915–1965 гг., была оценена с помощью статистического эксперимента с учетом погрешностей определения TSI в конце Маундеровского минимума от 0.3 до 0.7 Вт/м<sup>2</sup> (см. табл. 2). Во всех случаях она оказалась менее 10<sup>-4</sup>. Если же увеличить погрешности вдвое, эта вероятность достигает 7–9 × 10<sup>-3</sup>.

### ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Анализ данных о концентрации  $^{10}\text{Be}$  в антарктическом льду показал, что изменения TSI между поздним Маундеровским минимумом и серединой XX в. могли достигать 1.4–2.7 Вт/м<sup>2</sup>. Такие колебания солнечной радиации могут вызывать радиационный форсинг до 0.47 Вт/м<sup>2</sup> и вариации глобальной температуры до 0.3–0.5°С. Рост TSI после окончания минимума Шперера мог быть и большим – до 3.4 Вт/м<sup>2</sup>. Исследование показывает, что даже с учетом сохраняю-

щихся неопределенностей, данные по бериллию в Антарктике плохо согласуются с: а) гипотезой о малой амплитуде вариаций полной солнечной радиации и не исключают существенных изменений TSI в прошлом; б) предположением о том, что полная солнечная радиация в 1700 г. могла быть выше современной.

Можно отметить, что Стейнхилбер и др. (2012), восстановившие TSI с использованием данных по радиуглероду и бериллию как в Антарктиде, так и в Гренландии, получили амплитуду  $\Delta TS I_{mM}^{LMm} = 1.23 \text{ Вт/м}^2$ , что также превышает  $1.0 \text{ Вт/м}^2$ . Реконструкция TSI, проведенная в работе Пенза и др. (2022), выполненная также с использованием концентраций  $^{14}\text{C}$  в кольцах деревьев и  $^{10}\text{Be}$  во льдах Антарктиды и Гренландии, дала значительно большее значение  $\Delta TS I_{mM}^{LMm} = 2.5 \text{ Вт/м}^2$ . В работе Пенза и др. (2024) были получены значения  $\Delta TS I_{mM}^{LMm} = 2.2$  и  $\Delta TS I_{mM}^{ESm} = 2.3 \text{ Вт/м}^2$ . Соответствующие радиационные форсинги достигают  $0.40 \text{ Вт/м}^2$ . Еще большие значения получились у Егоровой и др. (2018), которые использовали: а) несколько рядов данных о потенциале солнечной модуляции, основанных на космогенных изотопах  $^{10}\text{Be}$  и  $^{14}\text{C}$ ; б) модель CHRONOS; в) инструментальные данные о солнечных пятнах и факелах за 1974–2010 гг., и получили  $\Delta TS I_{mM}^{LMm} = 4.7\text{--}5.8 \text{ Вт/м}^2$ .

Разница между реконструкциями, полученными с использованием одной и той же бериллиевой серии, обусловлена сохраняющимися неопределенностями, в том числе: а) неопределенностями палеомагнитных данных (см. рис. 1 работы Павон-Карраско и др. (2018)); б) различием в локальных межзвездных спектрах, которое может влиять на расчет скорости образования  $^{10}\text{Be}$  (Хербст и др., 2010); в) различием в моделях переноса  $^{10}\text{Be}$ , которое может влиять на концентрацию бериллия в полярном льду (Хейккила и др., 2013; Педро и др., 2012; Адольфи и др., 2023); г) различием в реконструкциях, основанных на инструментальных данных и использованных для калибровки. В немалой степени они связаны с остающимися проблемами с фотометрической калибровкой исторических данных по Ca II K и их дальнейшей обработкой. Существенные – почти в два раза – расхождения, выявившиеся при оценках вариаций TSI, произведенных с использованием одного и того же бериллиевого ряда, указывают на то, что оценка уровня достоверности получаемых результатов термином “средний” (Михр и др. 2013; МГЭИК, 2021) пока еще слишком оптимистична. Несмотря на обилие МАР-реконструкций, полученных в последнее время, значительная неопределенность наших знаний о вариациях TSI в прошлом сохраняется. Полученные в данной работе результаты свидетельствуют в пользу мнения Шмутца (2021) и Усоскина (2023), отмечавших, что величина амплитуды вековых вариаций TSI пока неясна.

Полученные в настоящей работе значения амплитуд долговременных вариаций TSI не противоречат

современным теоретическим представлениям о минимально возможных значениях полной солнечной радиации. Моделирование локального динамо в трехмерной магнитогидродинамике, проведенное в работе Иео и др. (2020), показало, что при наименее активном состоянии Солнца TSI не более чем на  $2.0 \pm 0.7 \text{ Вт/м}^2$  слабее, чем в 2019 г. Поскольку в минимуме 2019 г.  $TSI = 1360.3 \text{ Вт/м}^2$  (см. Монтилет и др., 2022), это означает, что амплитуда долговременных изменений TSI до  $3.4 \text{ Вт/м}^2$  не запрещены солнечной астрофизикой. Полученные значения  $\Delta TS I_{mM}^{ESm}$  попадают в этот диапазон, хотя и находятся на самом краю.

Полученные значения  $\Delta TS I_{mM}^{LMm}$  и  $\Delta TS I_{mM}^{ESm}$  не запрещены и современными данными по вариациям светимости солнцеподобных звезд. Джадж и др. (2020) недавно проанализировали данные по фотометрии 72 солнцеподобных звезд, полученные в период с 1993 по 2017 г. Они оценили изменение солнечного форсинга, воздействующего на атмосферу Земли с 1750 г., как  $\pm 4.5 \text{ Вт/м}^2$ . Этот разброс указывает на то, что 25–30 лет фотометрических измерений ограниченного числа звезд еще недостаточно для точной оценки возможной долговременной изменчивости Солнца.

Полученные в работе результаты указывают на то, что предположение о малой амплитуде долговременных вариаций TSI, все более доминирующее в последнее время, пока еще трудно считать надежно доказанным. Для прояснения вопроса о том, какова была амплитуда вековых изменений полной солнечной радиации в прошлом, необходимы дополнительные исследования, в том числе: а) получение новых долговременных реконструкций вариаций TSI в прошлом; б) расширение и уточнение инструментальных спутниковых данных об вариациях TSI; в) дальнейшее совершенствование радиационных моделей. Длительный и тщательный фотометрический мониторинг солнцеподобных звезд также может помочь решить эту проблему.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

**Линейный метод.** В этом методе использовался СМП, рассчитанный по формуле (1) из нормализованной концентрации бериллия. Все полученные ряды СМП интерполировались ежегодно и сглаживались по 30 годам. Долгосрочные (усредненные за 30 лет) изменения TSI были реконструированы по формуле

$$TSI = a + b \times \bar{\Phi}, \quad (\text{П1})$$

где  $\bar{\Phi}$  – 30-летние средние значения  $\Phi$ , рассчитанные на предыдущем шаге.

Значения параметров  $a$  и  $b$  подбирались так, чтобы восстановленная при помощи бериллиевого ряда величина TSI согласовывалась наилучшим образом с реконструкциями (Ванг и Лин, 2021; Пенза и др., 2022;

Чатзистергос и др., 2024), основанными на данных по солнечным пятнам и Ca II K. Полученные значения  $a$  лежат в диапазоне 1357.19–1359.78 Вт/м<sup>2</sup>,  $b$  – в диапазоне 0.0020–0.0056 Вт/(м<sup>2</sup>×МВ). Для  $\Delta TSI^{XX}$  – среднеквадратичного отклонения между TSI, рассчитанной по формуле (П1), и TSI, восстановленной по солнечным пятнам и Ca II K, на интервале с конца XIX в. до настоящего времени – были получены значения 0.068–0.119 Вт/м<sup>2</sup>.

Погрешность восстановленной полной солнечной радиации определялась как сумма:

$$\Delta TSI = \Delta TSI^{XX} + \Delta TSI^{\text{geom}}, \quad (\text{П2})$$

где  $\Delta TSI^{XX}$  – среднеквадратичное отклонение между TSI, рассчитанной по формуле (П1) и TSI, восстановленной по солнечным пятнам и Ca II K, на интервале с конца XIX в. до настоящего времени,  $\Delta TSI^{\text{geom}}$  – погрешность, связанная с неопределенностью знаний о дипольном моменте Земли в прошлом. Последняя оценивалась как разница между реконструкциями TSI, полученными с применением поправок, сделанных с использованием максимально расходящихся кривых дипольного момента Дженевей и др. (2008) и Корте и Констэбл (2005) (см. рис. 4 работы Усокин, 2008).

**Нелинейный метод.** Этот подход был основан на упрощенной модели SATIRE-T, развитой в работе Ву и др. (2018). В рамках этой модели средняя за десятилетие спектральная плотность солнечного излучения  $F(\lambda, t)$  считалась связанной со средними за десятилетие значениями потока открытого магнитного поля Солнца (opened magnetic flux) соотношением

$$\langle F(\lambda, t) \rangle_j = a_F(\lambda) \phi_{\text{open}j} + b_F(\lambda) \phi_{\text{open}j+1} + F_q(\lambda), \quad (\text{П3})$$

где  $F_q(\lambda)$  – плотность излучения невозмущенного Солнца, а скобки означают усреднение по 10 годам. В рамках этого подхода сначала были восстановлены изменения магнитного потока открытых силовых линий (open magnetic flux), по формуле

$$\phi_{\text{open}} = a_0 + a_1 \times \Phi^\gamma, \quad (\text{П4})$$

где  $\phi_{\text{open}}$  – в  $10^{14}$  Вб,  $\Phi$  в МВ,  $a_0 = 1.5$ ,  $a_1 = 0.01$ ,  $\gamma = 0.97$ .

Данная формула основана на результатах работ (Усокин и др., 2002; Асвестари и Усокин, 2016). Коэффициенты определялись таким образом, чтобы на промежутке 1951–2004 гг.  $\phi_{\text{open}}$ , рассчитанный по этой формуле с использованием модуляционного потенциала, определенного в работе (Усокин и др., 2005) на основе данных нейтронных мониторов, согласовывался бы наилучшим образом с  $\phi_{\text{open}}$ , вычисленным в работе Ву и др. (2018). Среднеквадратичное отклонение между двумя этими рядами на интервале 1951–2004 гг. составило  $0.97 \times 10^{14}$  Вб для годовичных значений, и  $0.66 \times 10^{14}$  Вб для средних за десятилетие.

Полученный ряд значений открытого магнитного потока усреднялся и интерполировался по десятилетиям (временной шаг 10 лет) на промежутке 845–1965 гг. Затем полная солнечная радиация вычислялась при помощи несколько модифицированной формулы (П2):

$$\langle TSI(t) \rangle_j = a_F \langle \phi'_{\text{open}} \rangle_j + b_F \langle \phi'_{\text{open}} \rangle_{j+1} + TSI_q, \quad (\text{П5})$$

где  $j$  – номер соответствующего десятилетнего отрезка,  $\phi'_{\text{open}} = \phi_{\text{open}} + \Delta\phi$ ,  $TSI_q$  – значение полной радиации Солнца, находящегося в полностью невозмущенном состоянии (the quiet-Sun irradiance). В данной работе она считалась равной минимальному значению TSI, наблюдавшемуся в октябре 2014 г. ( $TSI_q = 1358.7$  Вт/м<sup>2</sup>). Значения  $\Delta\phi$  подбирались так, чтобы восстановленная при помощи бериллиевого ряда величина TSI согласовывалась наилучшим образом с реконструкциями (Ванг, Лин, 2021; Пенза и др., 2022; Чатзистергос и др., 2024), основанными на данных по солнечным пятнам и Ca II K. Величина  $b_F$  равнялась  $a_F/1.6$ , согласно (Ву и др., 2018). Полученные значения  $a_F$  лежат в диапазоне  $(0.138–0.446) \times 10^{-14}$  Вт/(м<sup>2</sup>×Вб),  $\Delta\phi$  – в диапазоне  $(–3.80–3.65) \times 10^{14}$  Вб. Погрешность восстановленной полной солнечной радиации определялась как:

$$\Delta TSI = \Delta TSI^{XX} + \Delta TSI^{\text{geom}} + dTSI/d\phi_{\text{open}} \times \Delta\phi_{\text{open}}, \quad (\text{П6})$$

где  $dTSI/d\phi_{\text{open}} \times \Delta\phi_{\text{open}}$  – погрешность, связанная с погрешностью определения потока открытых линий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адольфи и др. (F. Adolphi, K. Herbst, A. Nilsson, and S. Panovska), *J. Geophys. Res.: Atmosph.* **128**, e2022JD038203 (2023).
- Амдур, Хайберс (T. Амдур and P. Huybers), *J. Geophys. Res. Atmospheres.* **128** (15), e2023JD038941 (2023).
- Асвестари, Усокин (E. Asvestari and I.G. Usoskin), *J. Space Weather Space Clim.* **6**, A15 (2016).
- Балмаседа и др. (L. Balmaceda, N.A. Krivova, and S.K. Solanki), *Adv. Space Res.* **40**, 986 (2007).
- Бард и др. (E. Bard, G. Raisbeck, F. Yiou, and J. Jouzel), *Tellus B* **52**, 985 (2000).
- Ванг и др. (Y.M. Wang, J. Lean, and N. Sheeley), *Astrophys. J.* **625**, 522 (2005).
- Ванг, Лин (Y.M. Wang and J. L. Lean), *Astrophys. J.* **920**(2) (2021).
- Веласко Херрера и др. (V.C. Velasco Herrera, Br. Mendoza, and H. Graciela), *New Astron.* **34**, 221 (2015).
- Ву и др. (C.-J. Wu, N.A. Krivova, S.K. Solanki, and I.G. Usoskin), *Astron. Astrophys.* **620**, A120 (2018).
- Гулев и др. (S.K. Gulev, P.W. F.J. Thorne, J. Ahn, et al.), *Changing State of the Climate System. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Ed. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, et al., Cambridge: Cambridge Univer. Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021), p. 287.

11. Девиитт и др. (S. Dewitte, J. Cornelis, and M. Meftah), *Remote Sens.* **14**, 1072 (2022).
12. Делайгу, Бард (G. Delaygue and E. Bard), *Clim. Dyn.* **36**, 2201 (2011).
13. Джадж др. (P.G. Judge, R. Egeland, and G.W. Henry), *Astrophys. J.* **891**(1), 96 (2020).
14. Дженевей и др. (A. Genevey, Y. Gallet, C. Constable, et al.), *Geophys. Geosyst.* **9**, Q04038 (2008).
15. Дюдок де Витт и др. (T. Dudok de Wit, G. Копп, C. Fröhlich, and M. Schöll), *Geophys. Res. Lett.* **44**, 1196 (2017).
16. Егорова и др. (T. Egorova, W. Schmutz, E. Rozanov, et al.), *Astron. Astrophys.* **615**, A85 (2018).
17. Захариас (P. Zacharias), *Surv. Geophys.* **35**, 897 (2014).
18. Иео и др. (K.L. Yeо, S.K. Solanki, N.A. Krivova, et al.), *Geophys. Res. Lett.* **47**, e2020GL090243 (2020).
19. Клетте и др. (F. Clette, L. Lefèvre, T. Chatzistergos, et al.), *Status Rep. Solar Phys.* **298**, 44 (2023).
20. Ковальцов, Усокин (G.A. Kovaltsov and I.G. Usoskin), *Earth Planet. Sci. Lett.* **291**, 182 (2010).
21. Кодингтон и др. (O. Coddington, J. Lean, P. Pilewskie, et al.), *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **97**, 1265 (2016).
22. Корте, Констэбл (M. Korte and C.G. Constable), *Earth Planet. Sci. Lett.* **236**, 348 (2005).
23. Корте и др. (M. Korte, F. Donadini, and C. Constable), *Geochem. Geophys. Geosyst.* **10**(6), Q06008 (2009).
24. Кривова и др. (N.A. Krivova, S.K. Solanki, and T. Wenzler), *Geophys. Res. Lett.* **36**, L20101 (2009).
25. Ксю и др. (H. Xu, B. Lei, and Z. Li), *Earth Space Sci.* **8**, e2021EA001819A (2021).
26. Лин и др. (J. Lean, A. Skumanich, and O. White), *Geophys. Res. Lett.* **19**, 1591 (1992).
27. Лин (J.L. Lean), *Earth Space Sci.* **5**(4), 133 (2018).
28. Лихт и др. (G. Licht, G. Hulot, Y. Gallet, and E. Thebault), *Phys. Earth Planet. Int.* **224**, 38 (2013).
29. Локвуд, Болл (M. Lockwood and W.T. Ball), *Proc. Roy. Soc. A* **476**(2238), 20200077 (2020).
30. Маттес и др. (K. Matthes, B. Funke, M. Anderson, et al.), *Geosci. Model Dev.* **10**, 2247 (2017).
31. МГЭИК (IPCC), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Ed. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, et al. Cambridge Univer. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007), 996 p.
32. МГЭИК (IPCC), *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Ed. P. Masson-Delmotte, V. Zhai, A. Pirani et al., Cambridge Univer. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021), p. 3-32.
33. Михр и др. (G.D. Myhre, F.-M. Shindell, W. Bréon, et al.) *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Ed. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, et al. Cambridge Univer. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013).
34. Огурцов (M.G. Ogurtsov), *Geomagn. Aeron.* **53**, 663 (2013).
35. Огурцов (M. Ogurtsov), *Astron. Lett.* **44**(4), 278 (2018).
36. Павон-Карраско и др. (F. Pavón-Carrasco, M. Gómez-Raccard, S. Campuzano, et al.), *Sci. Rep.* **8**, 9820 (2018).
37. Педро и др. (J.B. Pedro, J.R. McConnell, T. van Ommen, et al.), *Earth Planet. Sci. Lett.* **355**(356), 174 (2012).
38. Пенза и др. (V. Penza, F. Berrilli, L. Bertello, et al.), *Astrophys. J.* **937**, 84 (2022).
39. Рот, Джоос (R. Roth and F. Joos), *Climate of the Past* **9**, 1879 (2013).
40. Скафетта, Виллсон (N. Scafetta and R. Willson), *Adv. Astron.* **1214**, 896 (2019).
41. Седлачек и др. (J. Sedlacek, T. Sukhodolov, T. Egorova, et al.), *Earth Space Sci.* **10**, e2022EA002783 (2023).
42. Скафетта (N. Scafetta), *Geoscience Front.* **14**(6), 101650 (2023).
43. Соланки и др. (S.K. Solanki, M. Schüssler, and M. Fligge), *Astron. Astrophys.* **383**(2), 706 (2002).
44. Стейнхильбер и др. (F. Steinhilber, J.A. Abreu, J. Beer, et al.), *Proc. Nat. Acad. Sci.* **109**(16), 5967 (2012).
45. Усокин и др. (I. G. Usoskin, K. Mursula, S. K. Solanki, et al.), *J. Geophys. Res.* **107**(A11), (2002).
46. Усокин и др. (I.G. Usoskin, K. Alanko-Huotari, G.A. Kovaltsov, and K. Mursula), *J. Geophys. Res.* **110**(A12) (2005).
47. Усокин (I.G. Usoskin), *Living Rev. Sol. Phys.* **5**, 1 (2008).
48. Усокин (I.G. Usoskin), *Living Rev. Sol. Phys.* **20**, 2 (2023).
49. Фоукал (P. Foukal), *Geophys. Res. Lett.* **29**, 2089 (2002).
50. Хейккила и др. (U. Heikkilä, S.J. Phipps, and A.M. Smith), *Climate of the Past.* **9**(6), 2641 (2013).
51. Хербст и др. (K. Herbst, A. Kopp, B. Heber, et al.), *J. Geophys. Res.: Atmosph.* **115** (D1), D00120 (2010).
52. Хойт, Шаттен (D.V. Hoyt and K.H. Schatten), *J. Geophys. Res.* **98**, 18 (1993).
53. Чатзистергос и др. (T. Chatzistergos, N.A. Krivova, I. Ermolli, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A104 (2021).
54. Чатзистергос и др. (T. Chatzistergos, N.A. Krivova, and I. Ermolli), *Front. Astron. Space Sci.* **9** (2022).
55. Чатзистергос (T. Chatzistergos), *Rend. Fis. Acc. Lincei* **34**, 11 (2023).
56. Чатзистергос и др. (T. Chatzistergos, N.A. Krivova, and L. Yeо), *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **252**, 106150 (2023).
57. Чатзистергос (T. Chatzistergos), *Solar Phys.* **299**, 21 (2024).
58. Чатзистергос и др. (T. Chatzistergos, N. Krivova, and I. Ermolli), *J. Space Weather Space Clim.* **14** (2024).
59. Шапиро и др. (A.I. Shapiro, W. Schmutz, E. Rozanov, et al.), *Astron. Astrophys.* **529**, A67 (2011).
60. Шмутц (W. Schmutz), *J. Space Weather Space Clim.* **11**, 40, (2021).
61. Шривер и др. (C.J. Schrijver, W.C. Livingston, T.N. Woods, and R.A. Mewaldt), *Geophys. Res. Lett.* **38**, L06701 (2011).
62. Юнгклаус и др. (J.H. Jungclaus, E. Bard, M. Baroni, and P. Braconnot), *Geosci. Model Dev.* **10**, 4005 (2017).