

О ХАРАКТЕРИСТИКАХ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА И ИНТЕНСИВНОСТИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В МАКСИМУМЕ И ТОЧКАХ ПЕРЕГИБА СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

М. Б. Крайнев

Обсуждается корреляция между значениями характеристик (площадь солнечных пятен и интенсивность галактических космических лучей) в точках перегиба и в максимуме солнечного цикла. Рассматриваются вероятные значения характеристик в предстоящем максимуме 24-го цикла.

Ключевые слова: Солнце, галактические космические лучи, цикл солнечной активности, развитие солнечного цикла 24.

Для прогноза максимальных значений характеристик пятнообразовательной активности Солнца в цикле солнечной активности предпочтительно использовать т. н. физические методы, когда анализируется физически обоснованная связь (например, отражающаяся в теории динамо) для многих прошлых циклов между этими значениями и некоторыми другими характеристиками, наблюдавшимися задолго до момента максимума. Однако сама теория динамо ещё далека от завершения, в частности из-за того, что пока недостаточно хорошо известны коэффициенты уравнений. Поэтому результаты прогноза очень сильно зависят от предпочтений их авторов и сильно меняются. Особенно это справедливо в отношении прогноза характеристик текущего солнечного цикла (СЦ) 24, следующего за аномальным во многих отношениях СЦ 23 (см., напр., [5]).

Однако СЦ 24 развивается уже 3 года, и в этих условиях полезно сопоставить временное поведение характеристик до максимума с их значениями в максимуме в предыдущих циклах и выяснить, нельзя ли использовать эту информацию для оценки (за ≈ 2 года) этих характеристик в максимуме. Мы исходим из того, что у циклической зависимости (с глобальным максимумом и минимумом) какой-либо характеристики F от

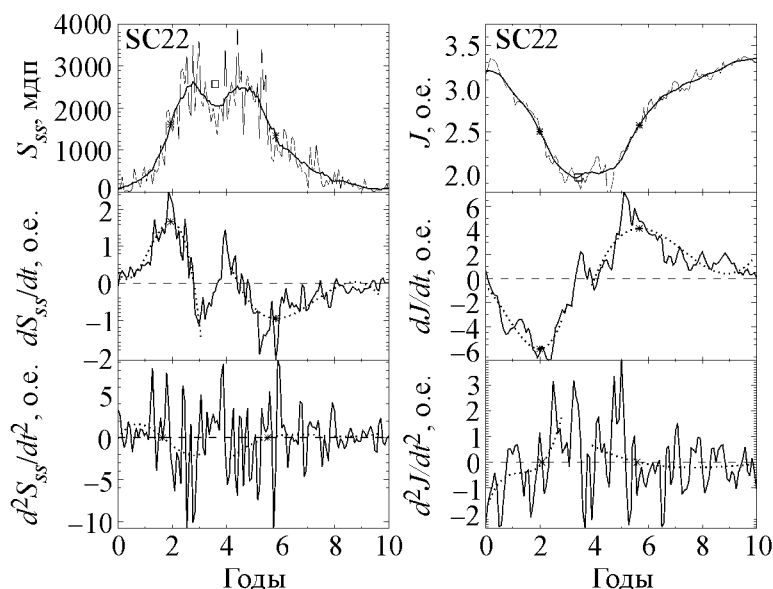


Рис. 1: Площадь солнечных пятен (слева сверху) и интенсивность ГКЛ (справа сверху) и их первые (средние панели) и вторые (нижние панели) производные по времени в СЦ 22. Тонкими линиями на верхних панелях показаны характеристики, определённые за солнечный оборот или 1 месяц, а более толстыми — сглаженные с периодом 1 год. Пунктирными кривыми на средних и нижних панелях показана аппроксимация первой и второй производных кривыми 3-го порядка, а звёздочками — точки перегиба. На временных профилях самих характеристик тоже показаны эти точки, а также точки экстремумов характеристик (квадраты).

времени должны быть две точки перегиба $\ddot{F}(t_{1,2}^{\text{infl}}) = 0$: перед глобальным максимумом $\dot{F}(t_1^{\text{infl}}) > 0$ и перед глобальным минимумом $\dot{F}(t_2^{\text{infl}}) < 0$, и значение характеристики в первой точке перегиба $F(t_1^{\text{infl}})$ должно коррелировать с её значением в максимуме $F(t_{\text{max}})$. В статье мы проверим эту гипотезу для двух характеристик, в которых сильно проявляется солнечный цикл: полная площадь солнечных пятен S_{ss} [7] (для СЦ 12–24) и интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) J_{GCR} (для СЦ 20–24) — по данным регулярного баллонного мониторинга (РБМ) космических лучей в земной атмосфере, проводимого ФИАН с 1957 г (см. [1, 6] и ссылки в них). Отметим, что хотя интенсивность ГКЛ меняется в противофазе с уровнем солнечной активности, и в максимуме солнечного цикла интенсивность ГКЛ достигает не максимума, а минимума, но мы везде будем говорить о первой точке перегиба как предшественнице эпохи максимума солнечного цикла.

Площадь солнечных пятен и модуляция ГКЛ: точки перегиба и максимум. На рис. 1 показаны временные профили S_{ss} и J_{GCR} и их первых и вторых производных по времени в СЦ 22. Производные по времени определялись по сглаженным с периодом 1 год данным, т. к. в обеих характеристиках (особенно в S_{ss}) присутствует большая стохастическая составляющая, не позволяющая работать с исходными (\approx среднемесячными) данными. Как видно из рисунка, производные даже от сглаженных характеристик ведут себя довольно нерегулярно и для определения точек перегиба их приходится аппроксимировать полиномами третьего порядка. Тем не менее для СЦ 22 обе точки перегиба удаётся выделить достаточно надёжно как для S_{ss} , так и для J_{GCR} . Для других циклов ситуация может быть другой, например, для СЦ 16 точки перегиба в S_{ss} удаётся надёжно выделить лишь после сглаживания с периодом около двух лет, что обусловлено присутствием в этот период, кроме 11-летней, сильной т. н. квазидвухлетней вариации (см., напр., [2]). Всего из 12 прошлых циклов (СЦ 12–23), для которых имеется информация о площади солнечных пятен, первая точка перегиба в S_{ss} при сглаживании с периодом 1 год достоверно выявляется для 9 циклов. При таком же сглаживании для интенсивности ГКЛ по данным эксперимента РБМ первая точка перегиба определена для всех 4 прошлых циклов (СЦ 20–23).

На рис. 2 показано развитие тех же характеристик в текущем СЦ 24. Из левой панели рисунка видно, что в СЦ 24 развитие цикла в S_{ss} ещё, по-видимому, не дошло до первой точки перегиба. Наверняка утверждать этого нельзя, так как, хотя в последнее время активность быстро нарастала, но, если с настоящего момента (декабрь 2011 г.) солнечная активность вдруг сильно и надолго упадёт, то через какое-то время аппроксимация производных сглаженной активности может указать на данный момент как на точку перегиба или даже максимум цикла! Конечно, это будет совершенно аномальный цикл, внезапно оборвавшийся “на взлёте”, что крайне маловероятно. Естественно, что и для J_{GCR} точка перегиба ещё не достигнута, т. к. развитие модуляции интенсивности обычно отстаёт от своей причины – уровня солнечной активности. Поэтому очевидно что замедление в последние месяцы спада J_{GCR} , заметное на верхней правой панели рис. 2, имеет временный характер и должно смениться продолжением спада. По-видимому, отмеченное замедление спада – ещё одно проявление квазидвухлетней вариации в интенсивности ГКЛ.

На левой панели рис. 3 показана регрессия между значениями S_{ss} в первой точке перегиба и в максимуме для всех прошлых циклов, для которых эта точка определена при сглаживании данных с периодом 1 год. Коэффициент линейной корреляции меж-

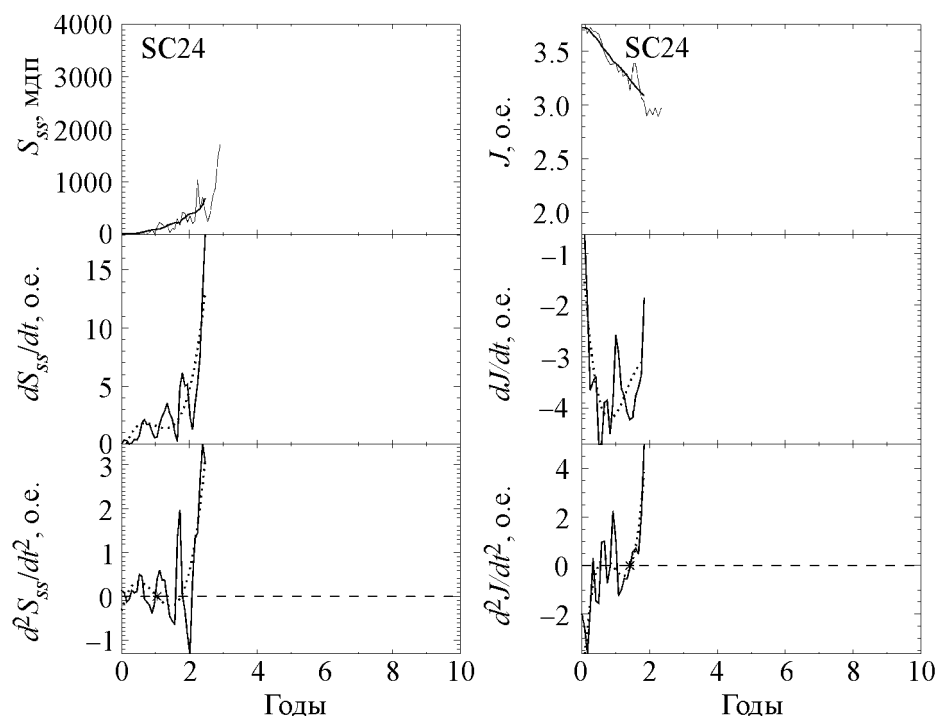


Рис. 2: То же, что на рис. 1, но в СЦ 24.

ду $S_{ss}(t_1^{\text{infl}})$ и $S_{ss}(t_{\text{max}})$ довольно высок ($\rho = 0.83$). Как было показано, точка перегиба для текущего СЦ 24 ещё не достигнута, но если использовать последнее сглаженное значение $S_{ss}(t)$ в качестве нижней оценки $S_{ss}^{24}(t_1^{\text{infl}})$, можно по регрессии для прошлых циклов оценить нижнюю границу $S_{ss}^{24}(t_{\text{max}})$. Пара нижних оценок $\{S_{ss}^{24}(t_1^{\text{infl}}), S_{ss}^{24}(t_{\text{max}})\}$ изображена на левой панели рис. 3 звёздочкой и видно, что ожидаемая по этой оценке максимальная активность Солнца в СЦ 24 несколько выше, чем в относительно слабых циклах конца 19-го начала 20-го веков (СЦ 13–16). На центральной панели рис. 3 показана регрессия между $J_{\text{GCR}}(t_1^{\text{infl}})$ и $J_{\text{GCR}}(t_{\text{max}})$ с коэффициентом линейной корреляции ($\rho = 0.94$), а также пара верхних оценок $\{J_{\text{GCR}}^{24}(t_1^{\text{infl}}), J_{\text{GCR}}^{24}(t_{\text{max}})\}$ (звёздочка). Отмечу, что описанные регрессии получены по данным, сглаженным с периодом 1 год, и коэффициенты корреляции уменьшаются при уменьшении периода сглаживания (в основном, из-за усиления влияния квазидвухлетней вариации) и сильно растут с увеличением периода сглаживания данных. Кроме того, важно, что корреляция между временами первой точки перегиба и максимума значительно хуже ($\rho \approx 0.3 - 0.6$), чем между характеристиками в эти моменты. Наконец, на правой панели рис. 3 показана регрессия между значениями $S_{ss}(t_{\text{max}})$ и $J_{\text{GCR}}(t_{\text{max}})$ для СЦ 20–23, причём показаны результаты

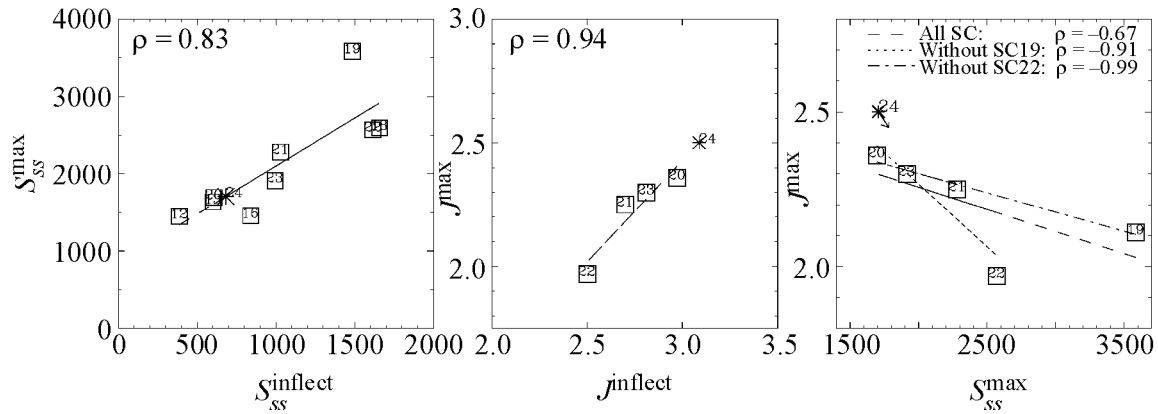


Рис. 3: Регрессионные зависимости между значениями характеристик в первой точке перегиба и в максимуме солнечного цикла, определённые по исходным данным, сглаженным с периодом 1 год, а также линейные коэффициенты корреляции. Звёздочками обозначены оценки характеристик для текущего СЦ 24. Левая панель: Регрессия между значениями S_{ss} в первой точке перегиба и в максимуме. Центральная панель: Регрессия между значениями J_{GCR} в первой точке перегиба и в максимуме. Правая панель: Регрессия между значениями S_{ss} и J_{GCR} в максимуме солнечных циклов.

как полного учёта всех четырёх циклов, так и регрессий без учёта СЦ 19 или 22. Звёздочкой обозначена пара нижняя оценка $S_{ss}^{24}(t_{max})$ – верхняя оценка $J_{GCR}^{24}(t_{max})$. Видно, что самой высокой является корреляция по прошлым циклам, полученная без учёта СЦ 22 ($\rho = -0.99$), но и корреляция без учёта СЦ 19 тоже высокая ($\rho = -0.91$), наша же оценка для СЦ 24 значительно ближе к регрессии, полученной без учёта СЦ 19.

О максимуме СЦ 24. На рис. 4 сравнивается поведение $S_{ss}(t)$ и $J_{GCR}(t)$ в СЦ 24 с поведением этих характеристик в предыдущие солнечные циклы (для ГКЛ — СЦ 20–23, а для площади пятен — со средними циклами групп высоких и низких циклов, см. [3, 4]), а также показаны наши оценки нижней границы $S_{ss}(t_{max})$ и верхней границы $J_{GCR}(t_{max})$ для СЦ 24. Для пятнообразовательной активности, кроме суммарной по полушариям площади пятен, показано также различие в поведении площади пятен в северном и южном полушариях. Видно, что наша нижняя оценка $S_{ss}^{24}(t_{max})$ указывает, что максимальная площадь пятен в СЦ 24 может даже превзойти площадь, характерную для минимума Глайсберга, но многое зависит от того, какой будет асимметрия активности в N- и S-полушариях Солнца. На данный момент развитие СЦ 24 в N-полушарии больше соответствует развитию циклов в “современном максимуме” (СЦ 17–23), а в S-

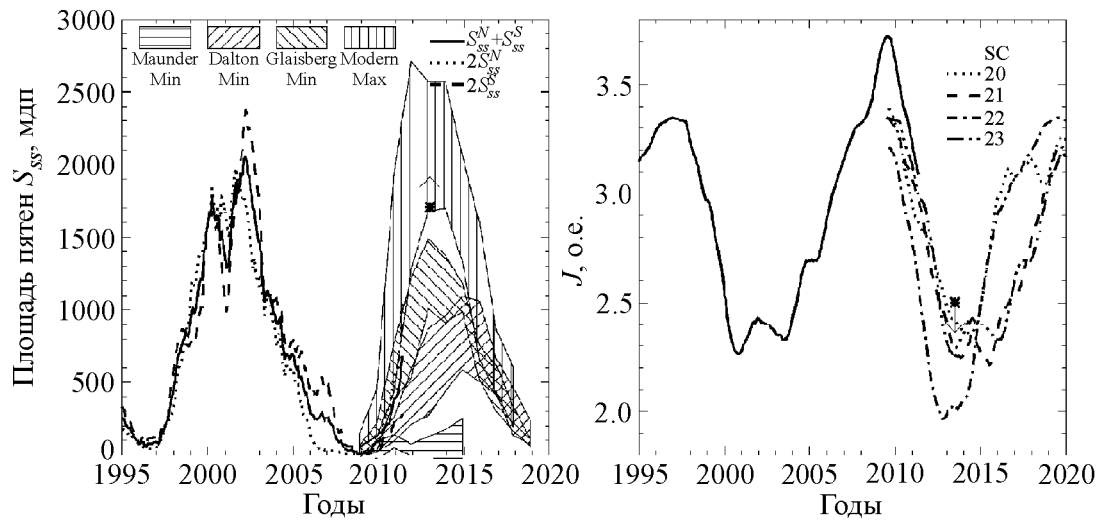


Рис. 4: СЦ 24 в сравнении с предыдущими солнечными циклами. Звёздочками со стрелками показаны верхний или нижний предел характеристик в максимуме солнечного цикла, оцененный по регрессии на рис. 3. Левая панель: Сплошной линией показана суммарная площадь солнечных пятен, а пунктирной и штриховой – удвоенные площади пятен в N- и S-полушариях Солнца, соответственно. Как и на рис. 3 из [3], полосами с различной штриховкой показано развитие циклов, усреднённых за периоды различных глобальных минимумов и “современного максимума”, причём площади пятен за эти годы оценены согласно [4]. Границы этих полос по вертикали равны среднему значению площади плюс–минус среднеквадратичное отклонение. Правая панель: Сплошной линией показана среднемесячная интенсивность ГКЛ, сглаженная с периодом 1 год. Прерывистыми линиями разных типов показано поведение сглаженной интенсивности ГКЛ в СЦ 20–23.

полушарии – в минимуме Дальтона (СЦ 5–7). Что касается интенсивности ГКЛ, наша верхняя оценка $J_{\text{GCR}}^{24}(t_{\text{max}})$ указывает, что минимальная интенсивность в СЦ 24 будет на том же уровне, что и в циклах 20, 21, 23 или несколько выше.

Выводы

1. В большинстве прошлых солнечных циклов во временном профиле как площади солнечных пятен, так и интенсивности ГКЛ могут быть выделены глобальные точки перегиба, предшествующие экстремальным периодам (соответственно максимуму и минимуму), значения характеристик в которых коррелируют с их экстремальными значениями.

2. Развитие в течение первых трёх лет текущего солнечного цикла 24 указывает, что точки перегиба как площади пятен, так и интенсивности ГКЛ пока не пройдены, и можно лишь оценить нижнюю и верхнюю границу максимальной площади пятен и минимальной интенсивности ГКЛ, соответственно.

3. Сравнение оценок для СЦ 24 с экстремальными значениями в предыдущих циклах позволяет заключить, что минимальная интенсивность в СЦ 24 будет на том же уровне, что и в циклах 20, 21, 23 или несколько выше. Максимальная площадь пятен может даже превысить значение, характерное для сравнительно низких циклов минимума Глайсберга (СЦ 12–16), но многое будет зависеть от того, как будет в ближайшие годы меняться активность в разных полушариях Солнца.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] G. A. Bazilevskaya, A. K. Svirzhevskaya, *Space Science Reviews* **85**, 431 (1998).
- [2] G. A. Bazilevskaya et al., *Solar Phys.* **197**, 157 (2000).
- [3] М. Б. Крайнев, *Краткие сообщения по физике ФИАН*, **39**(4), 3 (2012) М. В. Krainev, *Bulletin of the Lebedev Physical Institute*, **39**(4), 95 (2012)].
- [4] Ю. А. Наговицын, *Астрофизический бюллетень* **63**(1), 45 (2008) [Yu. A. Nagovitsyn, *Astrophysical Bulletin* **63**, № 1, 45 (2008)].
- [5] N. R. Sheeley, Jr., *ASP Conference Series* **428**, 3 (2010).
- [6] Ю. И. Стожков и др. Препринт ФИАН № 14 (ФИАН, Москва, 2007) [Yu. I. Stozhkov et al., *Preprint Lebedev Physical Institute № 14, Moscow, 77 p.* (2007)].
- [7] <http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>

Поступила в редакцию 20 декабря 2011 г.