

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.134-137

О ПОВЕДЕНИИ СОЛНЕЧНЫХ И ГЕЛИОСФЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ФАЗЕ МИНИМУМА МЕЖДУ СОЛНЕЧНЫМИ ЦИКЛАМИ 24 И 25

М.Б. Крайнев

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия; e-mail: mkrainev46@mail.ru

Аннотация. Ранее мы оценили возможные характеристики гелиосферы, важные для распространения ГКЛ, и определяемую ими интенсивность ГКЛ в середине 2019 г. Эта оценка была сделана, исходя из линейного тренда в указанных гелиосферных характеристиках, наблюдаемого в трёх предыдущих минимумах пятнообразовательной активности Солнца. Момент $t_m=2019.5$ тогда оценивался как приблизительное время достижения максимальной интенсивности ГКЛ в минимуме между солнечными циклами 24 и 25. Прошедшие после этих оценок два года продемонстрировали, что наблюдаемое поведение обсуждаемых гелиосферных характеристик существенно отличается от их поведения в предыдущих солнечных циклах. На основании этих данных и сравнения развития 24-го солнечного цикла с предыдущими мы пытаемся дать новые оценки момента минимума 24/25. Используя прогноз методом точек перегиба, оцениваются значения площади солнечных пятен и интенсивности ГКЛ в это время.

1. Введение

Последний минимум солнечной активности между циклами 23 и 24 (минимум 23/24, ~2008-2009 гг.) был необычным по многим характеристикам, как солнечным, так и гелиосферным. Поведение галактических и аномальных космических лучей также было необычным: интенсивность ГКЛ достигла рекордных значений во всех диапазонах энергии с очень мягким спектром вариации, а интенсивность аномальных космических лучей не превысила его значения в предыдущем минимуме 22/23 (~1997 г.).

Уровень солнечной активности в текущем, 24-ом, солнечном цикле по основным характеристикам оказался ещё ниже, чем в предыдущем. Это даёт некоторое основание ожидать ещё более высокие уровни интенсивности ГКЛ в следующем минимуме (24/25, ~2019-2021 гг.). Представляется важным как для понимания процесса модуляции ГКЛ в гелиосфере, так и для прикладных целей, например, для оценки радиационной безопасности планируемых космических полётов, количественно оценить возможные характеристики ГКЛ около Земли в приближающемся минимуме 24/25. Эта оценка может основываться на прогнозе гелиосферных характеристик, важных для модуляции космических лучей, и на численных расчётах интенсивности ГКЛ.

Ранее в работе [1] мы оценили возможные характеристики гелиосферы (радиальная компонента гелиосферного магнитного поля (ГМП) B_r , наклон гелиосферного токового слоя (ГТС) к экватору α_t и скорость солнечного ветра V_{sw}) в минимуме 24/25, исходя из линейного тренда в этих характеристиках, наблюдаемого в трёх предыдущих минимумах пятнообразовательной активности Солнца, а также расчётным путём оценили ожидаемую интенсивность ГКЛ в этот период. Момент $t_f=2019.5$ тогда оценивался нами как ожидаемое приблизительное время достижения максимальной интенсивности ГКЛ.

Прошедшие после этих оценок два года продемонстрировали, что наблюдаемое поведение обсуждаемых гелиосферных характеристик и интенсивности ГКЛ существенно отличается от их поведения в предыдущих солнечных циклах (СЦ). На основании этих данных и сравнения развития СЦ24 с предыдущими циклами мы пытаемся дать новые оценки момента минимума текущего цикла, а используя метод точек перегиба, разработанный нами ранее [2], оцениваются значения площади солнечных пятен и интенсивности ГКЛ в наступающем минимуме.

2. Солнечный цикл 24 в сравнении с предыдущими

На левой панели рис. 1 изображены временные профили гелиосферных характеристик около Земли в 1980-2019 гг., когда в их поведении в трёх минимумах – 21/22, 22/23, 23/24 - существовал значительный линейный тренд, показанный наклонными штриховыми прямыми, проведённый методом наименьших квадратов через значения характеристик в моменты времени t_n , на полгода опережающие моменты достижения максимальных значений интенсивности ГКЛ. Показана также оценка значений этих характеристик в предстоящем минимуме 24/25, сделанная в работе [1], а на правой панели Рис. 2, кроме данных наблюдений, показаны значения интенсивности ГКЛ разных энергий, полученные в работе [1] путём расчёта интенсивности ГКЛ по оцененным значениям гелиосферных характеристик.

Видно, что момент достижения максимума интенсивности ГКЛ в минимуме 24/25, оцененный в [1] как $t_H = 2019.5$, явно занижен. Интенсивность ГКЛ во всех трёх диапазонах энергии, особенно средних и высоких энергий, демонстрирует платообразный временной профиль, характерный для периода с $A > 0$ и, судя по двум предыдущим минимумам с $A > 0$, этот процесс будет продолжаться ещё примерно год. Кроме того, поведение основных гелиосферных характеристик за последние 1.5-2 года явно не соответствует сделанным в [1] оценкам этих характеристик для $t_H = 2019$. Особенно четко видно отклонение в поведении тилта ГТС (средняя левая панель Рис. 1).

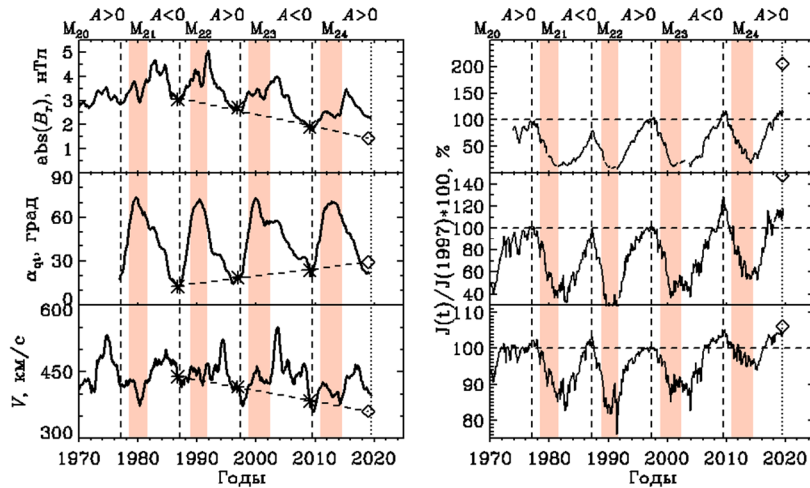


Рисунок 1. Временные профили наблюдаемых в районе орбиты Земли гелиосферных характеристик, важных для распространения ГКЛ (левая панель), и интенсивности ГКЛ (правая панель) в 1970-2019 гг. Над панелями обозначены моменты максимума циклов пятнообразования и полярность ГМП, а вертикальными полосами показаны периоды инверсии ГМП [3]. Вертикальными штриховыми линиями обозначены моменты (t_H) наблюдения максимальной интенсивности ГКЛ в минимумах 21/22, 22/23 и 23/24, а пунктирными – ожидавшийся в [1] момент максимальной интенсивности в минимуме 24/25. Левая панель сверху вниз – модуль радиальной компоненты ГМП, квазитилт ГТС и скорость солнечного ветра. Звёздочками показаны наблюдавшиеся в моменты $t_H = t_H - 0.5$ значения гелиосферных характеристик, а ромбами – их значения, ожидаемые в $t_H = 2019.0$ по линейному тренду (штриховые прямые). Правая панель сверху вниз – нормированная на 100% в 1996 г. интенсивность протонов ГКЛ низкой ($T=200$ МэВ), средней ($T > 100$ МэВ) и высокой ($T \approx 10000$ МэВ) энергии. Ромбами показаны ожидавшиеся в $t_H = 2019.5$ значения интенсивности.

Для уточнения оценки характеристик максимальной интенсивности ГКЛ в предстоящем минимуме 24/25 требуется уточнить момент достижения этой интенсивности, а также значения т.н. глобальных измеряемых гелиосферных характеристик, в наибольшей степени влияющих на распространение ГКЛ. К таким характеристикам мы прежде всего относим модуль радиальной компоненты ГМП на орбите Земли, а также определяемый по сканированию фотосферного магнитного поля Солнца т.н. квазитилт, равный полуширине диапазона гелиошироты, занимаемый зоной секторной структуры ГМП. Скорость же солнечного ветра V_{sw} , измеряемую на орбите Земли, мы к глобальным гелиосферным характеристикам не относим.

3. Длительность всего цикла и периода после максимума активности

Далее мы пытаемся уточнить оценку момента достижения максимума интенсивности ГКЛ, считая, что 1) момент t_H достижения гелиосферными характеристиками, сглаженными с периодом 1 год, их значений, определяющих максимальную интенсивность ГКЛ, на полгода опережает момент максимума этой интенсивности t_H , и 2) момент t_H близок к моменту конца солнечного цикла пятнообразования. Таким образом, прежде всего надо уточнить оценку длительности текущего СЦ 24.

Рассмотрение показанных на левой панели Рис. 2 характеристических длительностей (полная длительность цикла и интервал времени от его максимума до минимума) солнечных циклов пятнообразования для СЦ 1-23, демонстрирует, что текущие значения характеристических длительностей СЦ 24 пока значительно ниже средних по всем циклам значений, а до максимальных длительностей СЦ 23 должно пройти ещё примерно год. Наконец, зависимость длительностей СЦ как функции максимальной площади солнечных пятен, показанная на правой панели Рис. 2, указывает на то, существует определённая связь между характеристическими длительностями СЦ и максимальной площадью пятен, наблюдавшемся в этом цикле.

Чем меньше эта площадь, тем выше характеристические длительности СЦ. Поскольку текущий СЦ 24 – самый низкий из последних 14-ти, для него можно ожидать и более высокие значения характеристических длительностей, около или больше 12 лет и 7.5 лет для полной длительности цикла и времени от его максимума до минимума, соответственно.

Таким образом, можно ожидать, что СЦ 24 кончится не раньше середины 2020 года, и наша предварительная оценка моментов t_H и t_I - 2020.0 и 2020.5 г., соответственно.

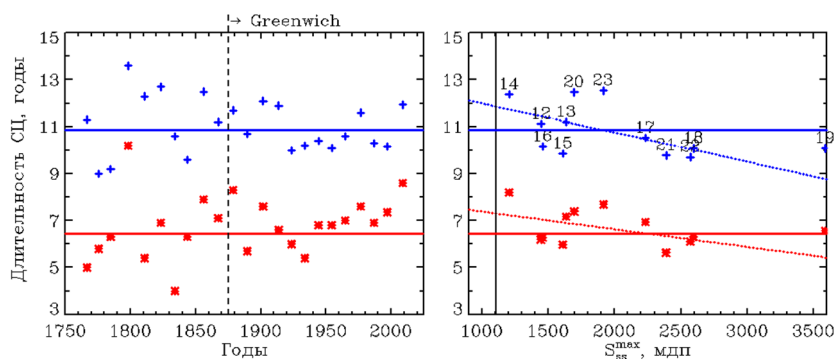


Рисунок 2. Характеристические времена (длительности цикла (синие кресты) и времени после максимума площади пятен (красные звёздочки)). Горизонтальные сплошные линии – текущие значения (на 09.2019) характеристических времён для СЦ24. Левая панель – зависимость от времени характеристических времён для СЦ 1-23. Штриховая вертикальная прямая – момент начала регулярных измерений площади и координат солнечных пятен. Правая панель – зависимость характеристических времён от максимальной площади солнечных пятен. Пунктирными прямыми показан линейный тренд, полученный методом наименьших квадратов (без учёта СЦ 19). Вертикальная прямая – значение максимальной площади пятен в СЦ 24.

4. Прогноз солнечных и гелиосферных характеристик в минимуме 24/25 методом точек перегиба

Пользуясь ранее разработанной методикой [4], оценим характеристики солнечной активности и ГКЛ в экстремумах солнечного цикла по их значениям в соответствующих точках перегиба (экстремум первой производной характеристики по времени). В качестве примера на Рис. 3 показана иллюстрация этого метода в применении к площади солнечных пятен и интенсивности ГКЛ средних энергий в СЦ 23.

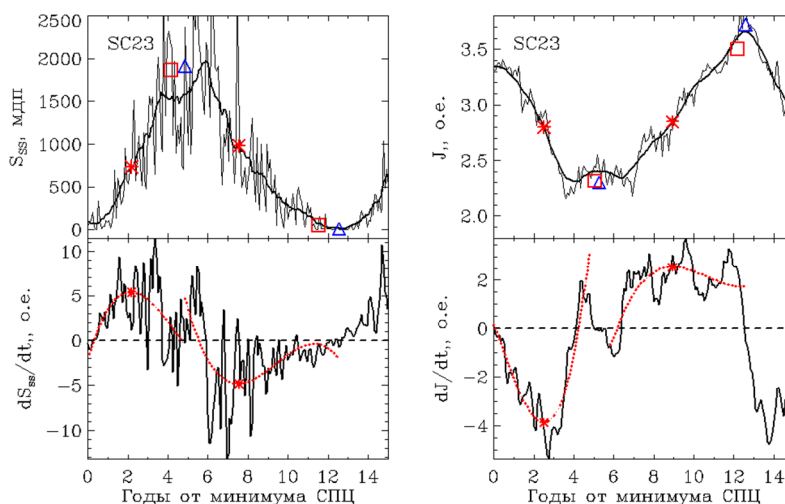


Рисунок 3. Использование метода точек перегиба к прогнозу площади солнечных пятен (левые панели) и интенсивности ГКЛ средних энергий (правые панели) в СЦ 23. Зависимость от времени от начала цикла среднемесячных (тонкие) и сглаженных с периодом 1 год (толстые линии) характеристик показана на верхних панелях, а производные по времени от сглаженных характеристик – на нижних. Синими треугольниками показаны наблюдаемые экстремальные значения, красными квадратами – оцененные по значениям характеристик в точках перегиба (красные звёздочки).

Прогноз методом точек перегиба осуществляется по регрессионной зависимости между наблюдаемыми экстремальными значениями характеристик и их значениями в соответствующих точках перегиба. Для примера на Рис. 4 показаны эти зависимости для интенсивности ГКЛ средней энергии.

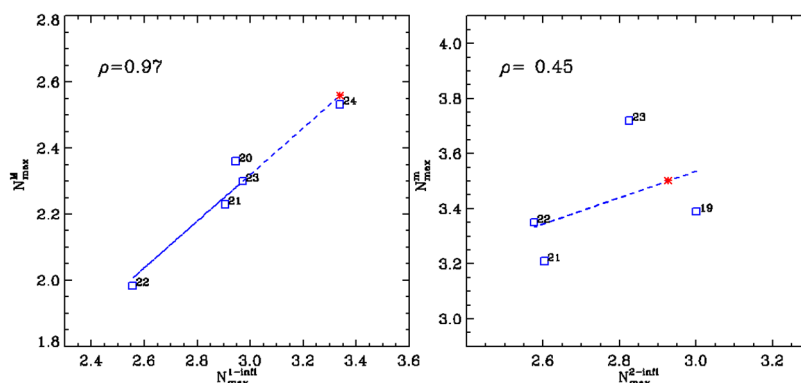


Рисунок 4. Регрессионные зависимости между экстремальными интенсивностями ГКЛ средней энергии и их значениями в точках перегиба. *Левая панель* – зависимость между интенсивностями ГКЛ в максимуме СЦ и их значениями в первой точке перегиба. *Правая панель* - зависимость между интенсивностями ГКЛ в минимуме СЦ и их значениями во второй точке перегиба. Штриховые прямые показывает линейную регрессию, а красные звёздочки - прогноз для СЦ 24.

Пока можно сделать лишь предварительный вывод, что характеристики в первой точке перегиба (на фазе роста пятенной активности) значительно более тесно связаны с значением характеристики в максимуме цикла, чем характеристики во второй точке перегиба (на фазе спада пятенной активности) - со значением характеристики в минимуме цикла.

5. Обсуждение и выводы

Для уточнения количественных оценок значений важных для распространения ГКЛ гелиосферных характеристик в приближающемся минимуме солнечного цикла требуется проанализировать как детали наблюдаемого поведения гелиосферных характеристик и их связи с разными солнечными характеристиками, так и накопленные данные по временному поведению интенсивности ГКЛ. Кроме того, должна быть уточнена модель модуляции интенсивности ГКЛ, по которой мы определяем эту интенсивность по гелиосферным характеристикам.

Рассмотрение разных особенностей текущего пятнообразовательного СЦ 24 по сравнению с предыдущими указывает на то, что до момента достижения гелиосферными характеристиками, которыми определяются максимальные значения интенсивности ГКЛ в текущем цикле, должно пройти ещё примерно 0.5 года, а до момента максимума интенсивности ГКЛ – 1 год.

Складывается впечатление, что характеристики в первой точке перегиба (на фазе роста пятенной активности) значительно более тесно связаны с значением характеристики в максимуме цикла, чем характеристики во второй точке перегиба (на фазе спада пятенной активности) - со значением характеристики в минимуме цикла. Это согласуется с точкой зрения, что гелиосферные характеристики, от которых зависит интенсивность ГКЛ, в первой и второй половинах фазы спада пятнообразовательной активности определяются разными ветвями Солнца.

Благодарности. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 17-02-00584_a, 18-02-00582_a, 19-52-60003_ЮАР-г).

Литература

1. Крайнев М.Б. и др., Интенсивность галактических космических лучей в приближающемся минимуме цикла солнечной активности. Геомагнетизм и аэрономия, 58(2), 177-186, 2018
2. Крайнев М.Б., О характеристиках активности Солнца и интенсивности галактических космических лучей в максимуме и точках перегиба солнечного цикла. Кр. сообщ. по физике ФИАН. М.: ФИАН, № 1, 3-9, 2013
3. Крайнев М. Б., О причинах долговременных вариаций интенсивности галактических космических лучей во внутренней гелиосфере. Изв. РАН, сер. физ., 81(2), 185-188, 2017