

ПРОГНОЗ И ЭПИГНОЗ ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ИНДЕКСОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

А.В. Белов¹, Р.Т. Гущина¹, В.Н. Обридко¹, Б.Д. Шельтинг¹, В.Г. Янке¹

(1) ИЗМИРАН, Троицк, Московская обл.

С помощью модели, связывающей модуляцию космических лучей (КЛ) с индексами солнечной активности (СА) дан прогноз потока галактических КЛ на следующий солнечный цикл и восстановлено поведение КЛ в 17-20 веках. Прогноз потока КЛ выполнен на основе предварительного прогноза основных характеристик магнитного поля Солнца. Для восстановления поведения КЛ в прошлом использованы числа солнечных пятен и индексы геомагнитной активности (ГА).

Введение

Цель работы – на основании имеющейся информации о связи модуляции галактических КЛ с характеристиками СА и ГА дать прогноз вариаций потока КЛ на следующий цикл СА и восстановить временной ход вариаций КЛ в прошлом. Ставить и решать такую задачу позволяют данные непрерывного мониторинга КЛ сетью станций, работающих как единый многонаправленный и высокоточный прибор в течении более полувека. В данной работе как для прогноза вариаций КЛ, так и для их эпигноза, использована многопараметрическая модель модуляции КЛ, разработанная в наших предшествующих работах [например, 1-4 и ссылки к ним]. Нами показано, что достаточно адекватное модельное описание вариаций КЛ можно получить, используя структурные и количественные характеристики глобального магнитного поля Солнца (ГМПС), а именно, наклон гелиосферного токового слоя и среднюю напряженность магнитного поля, рассчитанную для поверхности источника солнечного ветра. Модель с этими параметрами мы использовали, прогнозируя поток КЛ на следующий цикл. К сожалению, в достаточно отдаленном прошлом отсутствовали не только наблюдения КЛ, но и большая часть современных солнечных и геофизических наблюдений. Мы можем рассчитывать только на числа солнечных пятен, известные с 1749 г. (а для более раннего периода с 1610 г. на числа групп солнечных пятен). С оговорками к ним можно добавить (с 1868 г.) АА-индекс геомагнитной активности и количество внезапных начал магнитных бурь N_{SSC} . Однако даже такой ограниченный набор индексов СА дает, возможно, наилучшую возможность для восстановления вариаций КЛ в прошлом. Получаемые предлагаемым способом ретроспективные данные о вариациях КЛ нужны для сравнения с изотопными данными и долгосрочными изменениями климатических параметров. Измерения концентрации космогенных изотопов (в первую очередь ^{10}Be) позволяют получить количественные данные о модуляции КЛ в прошлом, но эти косвенные данные о потоке КЛ сами нуждаются в независимой поддержке.

Космические лучи являются важной составляющей межпланетной среды – и прогноз их потока КЛ необходим для решения различных задач космической погоды.

Данные и метод

Исходными данными для долгосрочного прогноза вариаций КЛ являются долговременные наблюдения потока КЛ и характеристик ГМПС. В последние годы в качестве тестового ряда при моделировании долговременной модуляции мы использовали вариации плотности КЛ с жесткостью 10 ГВ. Характеристиками ГМПС, использованными ниже для прогноза КЛ, являются наклон гелиосферного токового слоя - α , средняя напряженность магнитного поля - B_{ss} и его полярность p . Все эти параметры рассчитаны для поверхности источника солнечного ветра. Подробное

обоснование такого выбора индексов СА дано в работах [1-2]. Характеристики магнитного поля Солнца получены по методике, разработанной в работе [5] и специально усовершенствованны для моделирования модуляции КЛ [6].

В работе использованы данные измерений фотосферного крупномасштабного магнитного поля с относительно низким разрешением магнитографа ($3'$), проведенные в Стэнфорде [7] за период 1976 – 2003 гг. После рекалибровки этого магнитографа возникли сомнения в однородности его измерений и они были дополнены наблюдениями в 1975 – 2003 гг. на магнитографе обсерватории Китт-Пик [8] (его разрешение – $1''$). Сравнительный анализ рядов напряженности поля, полученных двумя обсерваториями, выявил большие различия между ними. Из-за существующего различия в особенностях наблюдений обсерваторий Стэнфорд и Китт-Пик трудно сделать выбор в пользу одного из этих магнитографов, поэтому в данной работе для расчета B_{ss} использованы оба ряда наблюдений. Предположительно, различие в данных можно объяснить тем, что обсерватории регистрируют поля разного пространственного масштаба. Магнитограф с низким разрешением ($3'$) в обс. Стэнфорд регистрирует преимущественно крупномасштабное поле Солнца. Магнитограф обс. Китт-Пик, имеющий более высокое разрешение ($1''$), наиболее полно регистрирует сильные локальные магнитные поля на Солнце. Выявленные нами при модельном описании отличия модуляции КЛ в периоды с разным направлением ГМПС могут быть связаны с изменением влияния на долгопериодные вариации КЛ циклических изменений локальных и крупномасштабных полей Солнца, регистрируемых на указанных обсерваториях.

Значения наклона гелиосферного токового слоя, используемые в предлагаемой модели модуляции КЛ, получены по результатам обс. Стэнфорд (1976-2003 гг.). Изменения полярности ГМПС p получены из различных наблюдений на фотосфере и расчетов на поверхности источника солнечного ветра. Определение ожидаемых вариаций КЛ проводилось с помощью многопараметрического регрессионного анализа, позволяющего оценить вклад в прогнозируемую модуляцию КЛ долгосрочных изменений каждой характеристики ГМПС с учетом собственного максимального времени запаздывания τ . Вклад в полную рассчитанную модуляцию от вариаций величины поля различен: по данным Стэнфорда этот вклад в несколько раз больше, чем по данным Китт-Пика. Влияние напряженности поля B_{ss} на модуляцию КЛ по наблюдениям Стэнфорда предполагает участие более удаленной области гелиомагнитосферы, чем влияние наклона токового слоя. В этом случае долгопериодная модуляция КЛ определяется не только изменениями наклона α , но заметно зависит и от напряженности поля B_{ss} .

Предложенный в [4] вариант прогноза КЛ опирался исключительно на уже измеренные к моменту выдачи прогноза солнечные характеристики, и позволял делать оценку поведения КЛ не более чем на 6-7 мес. Здесь рассмотрена другая возможность прогноза КЛ: он делается на основе предварительного прогноза основных характеристик ГМПС. Прогноз параметров магнитного поля Солнца (α и B_{ss}) был выполнен по наблюдениям на обсерваториях Стэнфорд (B_{ss} -ST) и Китт-Пик (B_{ss} -KP). Для основной части времени прогноз полярности поля p прост. Известно, что в ближайшие несколько лет (до максимума следующего цикла) полярность будет отрицательной. В модели предполагается смена знака поля в начале 2012 г.

Результаты

Для прогнозирования индексов СА сейчас используются различные подходы, основанные на анализе поведения суммарных площадей солнечных пятен, плотности потока радиоизлучения на частоте 2800 МГц, различных геомагнитных индексов и других солнечных и геофизических характеристик. Шаттен в своих работах

[например, 9] полагает, что наиболее физически обоснованным является предложенный

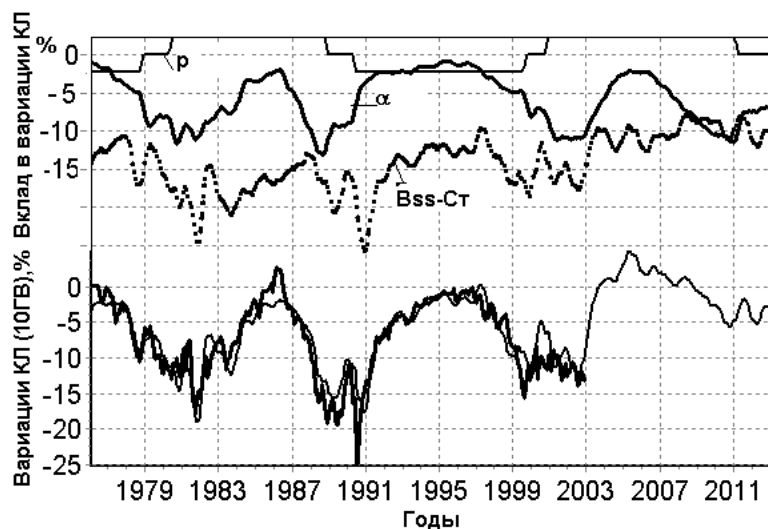


Рис.1. Наблюдаемые и рассчитанные среднеемесячные вариации КЛ в 1976 – 2003 гг. вместе с прогнозом для 2004 - 2012 гг. (нижняя часть). В верхней части – вклады в рассчитанную вариацию от изменений B_{ss} (данные Стэнфорда), α и p .

им Solar Dynamo Amplitude метод, основанный на учете солнечного динамо и структуры магнитного поля в гелиосфере. Для выполнения прогноза характеристик ГМПС α и B_{ss} нами был применен статистический подход, изложенный в [10]. Модель поведения КЛ, основанная на изменениях структурной (наклон гелиосферного слоя α) и количественной (величина поля B_{ss}) характеристик солнечного магнитного поля, физически обоснована и проверена на данных за последние 50 лет. Выполненный с её помощью прогноз

поведения КЛ до 2012 г. показывает: по результатам наблюдений в обсерватории Китт-Пик следующий минимум КЛ должен быть в конце 2006 г. - начале 2007 г., по данным обсерватории Стэнфорд – в середине 2006 г. (рис.1).

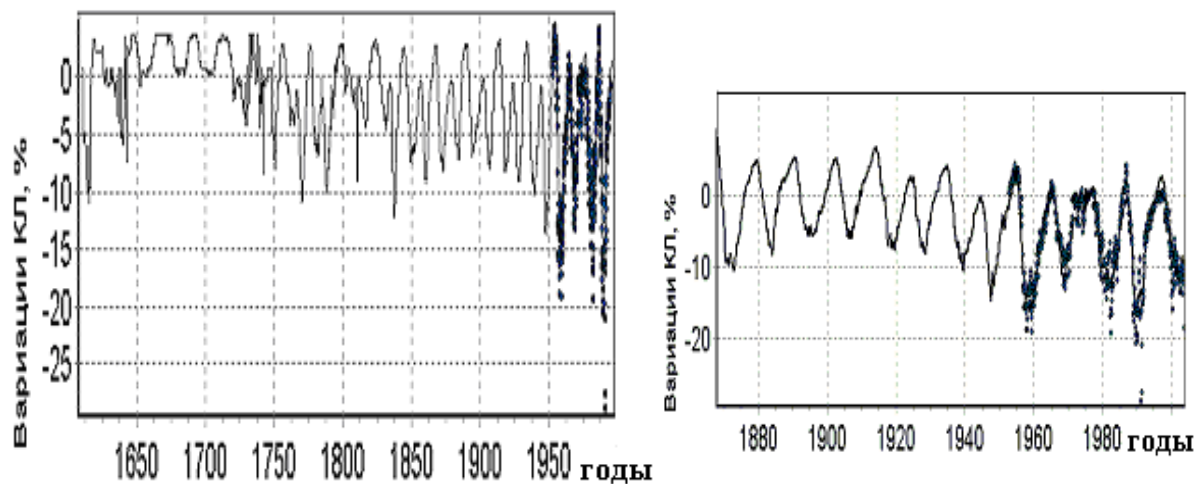


Рис. 2. Вариации КЛ с жесткостью 10 ГВ, восстановленные с 1610 г. по данным о числах групп пятен и с 1868 г. по данным о числах пятен и АА-индексе.

Описание поведения КЛ в прошлом основано на той же модели модуляции, что использовалась при прогнозировании КЛ. Отличие состоит в выборе характеристик солнечной активности. При ретроспективном долговременном анализе среднюю величину поля B_{ss} приходится заменять на числа Вольфа W , а для самого раннего периода до 1749 г. на (хуже известные) числа групп пятен. Однако этого недостаточно, поскольку нельзя построить полную и надежную модель модуляции КЛ без данных о полярности магнитного поля Солнца и о наклоне гелиосферного токового слоя. Учитывая, что периоды переполусовок связаны с периодами максимальных чисел пятен, достаточно легко восстановить изменения полярности p . Что же касается

наклона токового слоя α , то к имеющимся с 1976 данным мы применили метод наложения эпох и нашли наиболее вероятные значения α для каждой фазы солнечного цикла. Параметры регрессионной связи вариаций КЛ с изменениями W , α и p были найдены для периода 1976-2003 гг., т.е. для периода, в который имеются прямые наблюдения необходимых солнечных характеристик. Используя найденные регрессионные параметры, числа солнечных пятен и закономерности поведения индексов СА в 11- и 22-летнем циклах, мы восстановили вариации КЛ за каждый месяц в прошлом, начиная с 1610 г. (рис.2). Для более недавнего периода (с 1868 г.) была дополнительно использована другая модель, в которой, кроме перечисленных, участвовал еще и АА-индекс геомагнитной активности (правая часть рис. 2). Отметим, что наименьшая модуляция КЛ наблюдалась в период вторая половина 19 века – первая треть 20 века. Более поздний современный период, начинающийся с 18-го цикла, – это эпоха самой большой модуляции КЛ за последние 4 века.

Заключение

Разработанная нами многопараметрическая модель модуляции КЛ в гелиосфере, позволяет рассчитать наблюдаемые вариации КЛ с хорошей точностью и перейти к их долгосрочному прогнозу. Для долгосрочного прогноза вариаций КЛ основным является прогноз характеристик магнитного поля Солнца. Прогноз поведения КЛ до 2012 г., выполненный с помощью статистического метода показывает: по результатам наблюдений в обс. Китт-Пик следующий минимум КЛ должен быть в конце 2006 г-начале 2007 г., по данным обс. Стэнфорд – в середине 2006 г. Прогноз выполнен с учетом данных двух обсерваторий в связи с существующим различием в особенностях и результатах долговременных наблюдений магнитного поля магнитографами этих обсерваторий. Восстановленный (на основе изменения числа пятен и индексов геомагнитной активности) временной ход вариаций КЛ в прошлом свидетельствует о том, что в 5 последних солнечных циклах космические лучи модулировались значительно сильнее, чем в предшествовавшие 300 лет.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 02-02-16992, 04-02-16763 и 02-02-16199) и государственного контракта N 10002-251/П-06/048-051/200404-046

Список литературы

1. *Belov A.V. et al.* // J. Atmos. Terr. Phys. 2001. V.63. N18. P.1923.
2. *Belov A.V. et al.* // Proc. 27th ICRC, Hamburg. 2001. V.10. P.3911-3914.
3. *Белов А.В. и др.* // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. Т.42. N.6. С.727.
4. *Белов А.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2003.Т. 67. С.508.
5. Hoeksema J.T., & Sherrer P.H. //Report UAG-94. 1986. WDC-A for Solar Terrestrial Physics
6. Obridko V.N. and Shelting B.D. // Solar Phys. 1999. V. 184. P. 187.
7. Hoeksema J.T. // <http://quake.stanford.edu/~wso>, 2003.
8. National Solar Observatory Kitt Peak <http://www.nso.noao.edu/nsokp/dataarch.html>
9. Schatten K.H. //COSPAR D2.3/E3.3. Symp. Solar Variability and Climate Change 2002. Houston. USA.
10. <http://www.statsoft.com/textbook/sttimser.html>