

УДК 524.1-352

Прогноз вариаций галактических космических лучей в следующем солнечном цикле на основе различных магнитных наблюдений

© 2003г. А.В. Белов, Р.Т. Гущина, В.Н. Обридко, Б.Д. Шельтинг, В.Г. Янке
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН,
Троицк, Московская обл., E - mail: rgus@izmiran.rssi.ru

Поступила в редакцию 22.12.03

Рассматривается возможность долгосрочного прогнозирования потока галактических космических лучей (КЛ). Для прогноза потребовались: 1) долговременные данные о вариациях КЛ и индексах солнечной активности, 2) достоверная модель модуляции КЛ, связывающая глубину модуляции КЛ с солнечными характеристиками и 3) прогноз основных характеристик магнитного поля Солнца. Для следующего цикла солнечной активности выполнено прогнозирование вариаций КЛ в двух вариантах, основанных на наблюдениях магнитного поля на различных солнечных обсерваториях.

1. Введение

Цель работы – на основании имеющейся информации о характере связи модуляции галактических космических лучей (КЛ) с эволюцией глобального магнитного поля Солнца (ГМПС) исследовать возможность долгосрочного прогнозирования вариаций потока космических лучей. Прогноз КЛ предлагается

провести на основе прогноза характеристик ГМПС. В работе [Белов и др., 2003] показано, что вариации потока КЛ в околоземном космическом пространстве можно спрогнозировать, используя хорошо известное явление запаздывания КЛ относительно изменений солнечной активности. Необходимыми элементами для такого прогноза являлись: результаты непрерывного долговременного мониторинга КЛ на сети станций, длительные ряды наблюдений разнообразных проявлений солнечной активности и разработанная модель долговременной модуляции [Belov et. al., 2001a,b; Белов и др., 2002 и ссылки к ним], связывающая наблюдаемый поток КЛ на Земле с характеристиками солнечной активности. Предложенный в [Белов и др., 2003] вариант прогноза КЛ опирается исключительно на уже измеренные к моменту выдачи прогноза солнечные характеристики, и позволяет делать достоверную оценку поведения КЛ не более, чем на 6-7 мес. Здесь рассмотрена другая возможность прогноза КЛ, а именно: сделана попытка выполнить прогноз основных характеристик магнитного поля Солнца, с тем, чтобы при прогнозировании вариаций КЛ, наряду с уже измеренными солнечными индексами, использовать оценку их поведения в будущем цикле. Описание модуляции КЛ проводится на основе многопараметрической модели, разработанной в работах [Belov et. al., 2001a,b; Белов и др., 2002 и ссылки к ним].

2. Данные и метод

Исходными данными для долгосрочного прогноза вариаций КЛ являются результаты долговременных наземных наблюдений потока КЛ и характеристик солнечного магнитного поля. В последние годы в качестве тестового ряда при

моделировании долговременной модуляции использовались вариации плотности КЛ с жесткостью 10 ГВ, полученные на основе данных сети наземных наблюдений с привлечением результатов наблюдений КЛ в стратосфере и в околоземном космическом пространстве. К сожалению, в настоящее время нет возможности определять энергетический спектр вариаций КЛ в реальном времени. Поэтому, несмотря на уверенность в том, что, исследуя модуляцию, предпочтительнее использовать не данные отдельных детекторов, а дифференциальную плотность КЛ, для прогноза потока КЛ, по необходимости, используются данные отдельного нейтронного монитора (НМ), а именно, данные станции Москва. Эта станция КЛ отвечает предъявляемым для прогноза требованиям: здесь непрерывно с 1958 г. по настоящее время на НМ регистрируются частицы с эффективной энергией, близкой к 10 ГВ, и данные представляются в реальном времени в Интернет. В этой работе использована амплитуда долговременных вариаций δ , наблюдаемых НМ в Москве. Рассмотрена связь амплитуды изотропной части долговременных вариаций КЛ с жесткостью 10 ГВ с вариациями КЛ, наблюдаемыми на НМ отдельных станций, в том числе и на ст. Москва. Это позволило получить достаточно точную оценку поведения дифференциального потока КЛ (10 ГВ) из модельных расчетов для ст. Москва.

Характеристиками глобального магнитного поля Солнца, 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 солнечной активности дано в работе [Belov et. al., 2001b]. Характеристики магнитного поля Солнца получены по методике, разработанной в

работах [Hoeksema and Sherrer, 1986; Hoeksema, 2003; Obridko and Shelting, 1999] с использованием магнитных и оптических наблюдений и специально усовершенствованной для моделирования модуляции КЛ.

Измерения фотосферного крупномасштабного магнитного поля с относительно низким разрешением магнитографа (3') проведены в обс. Дж. Вилкокса в Стэнфорде [Hoeksema, 2003] за период с 06.1976 – 08.2003 гг. Данные обс. Стэнфорда дополнены в этой работе соответствующими наблюдениями на магнитографе в обс. Китт-Пик [National Solar Observatory/Kitt Peak <http://www.nso.noao.edu/nsokp/dataarch.html>] 02.1975 – 08.2003 (его разрешение – 1") (рис.1.) Привлечение дополнительных данных о напряженности поля Солнца связано с вопросами, возникшими при использовании новых (начиная с ноября 2000 г.) результатов обс. Стэнфорд, скорректированных после рекалибровки приборов. Модельные расчеты модуляции с этими исправленными солнечными данными обс. Стэнфорд показали небольшое понижение точности модели по сравнению с той, что была ранее до коррекции результатов. Сравнительный анализ связи двух рядов напряженности поля по данным вышеупомянутых обсерваторий показал, что корреляция между ними за весь рассматриваемый период не тесная (рис.2 и табл. 1). Только для 22-ого цикла коэффициент корреляции ρ достигает 0.8 (при величине стандартного среднеквадратичного отклонения $\sigma=1.04$ %). О неэквивалентности этих наблюдений говорят и результаты, полученные в работе [Обридко, Шельтинг, 2003] на основании корреляционного и Фурье- анализа данных о магнитном поле Солнца обсерваторий в Стэнфорде и Китт-Пике.

Поскольку без дополнительного анализа трудно сделать выбор в пользу одной из обсерваторий, в данной работе использованы оба ряда наблюдений для расчета

средней напряженности магнитного поля B_{ss} . Значения наклона гелиосферного токового слоя получены по результатам обс. Стэнфорд (5.1976-8.2003 гг.) и по восстановленной структуре магнитного поля с использованием Н α данных (1.1950-4.1976гг.) с последующей обработкой по методике [Obridko and Shelting, 1999].

Полуэмпирическая модель, связывающая наблюдаемые вариации КЛ с характеристиками солнечного магнитного поля, разработана в ИЗМИРАН и проверена на вариациях плотности КЛ за три последних цикла солнечной активности [Belov et. al., 2001a,b; Белов и др., 2002]. Изменения полярности глобального магнитного поля Солнца p получены из различных наблюдений на фотосфере и на поверхности источника солнечного ветра. Отметим, что модель учитывает как прямое воздействие полярности глобального магнитного поля Солнца на КЛ, так и влияние полярности через механизм модуляции КЛ, связанный с изменением наклона токового слоя. Показано, что поведение КЛ коррелирует с изменением полярности на поверхности источника лучше, чем с инверсией поля на фотосфере. Уточнение полученных границ переполусовок проведено с помощью КЛ, полагая при этом, что глубина модуляции КЛ является индексом солнечной активности, наиболее полно обобщающим различные её проявления. Получены следующие периоды инверсий: 09.1979–03.1981 гг., 10.1989–03.1991 гг. и 04.1999-08.2001 гг.

3. Модуляция КЛ по данным магнитного поля двух обсерваторий

Расчеты проводились с помощью многопараметрического регрессионного анализа, позволяющего оценить вклад в прогнозируемую модуляцию КЛ

долговременных изменений каждой характеристики глобального магнитного поля Солнца с учетом собственного максимального времени запаздывания $\tau_{\text{зап}}$.

Отличие данной работы от [Belov et. al., 2001a,b; Белов и др., 2002] в том, что модельное описание модуляции выполнено с помощью данных магнитного поля Солнца двух обсерваторий: Стэнфорд и Китт-Пик (рис.3). В табл. 2 приведены ρ и σ : для отдельных циклов, для всего анализируемого периода 1976-2003 гг., объединяющего данные с разным направлением глобального магнитного поля Солнца и моментами переполюсовки поля, а также для периода с отрицательной полярностью ($q_A < 0$) 1981–1989 гг. и для периода 1991–2000 гг., когда полярность поля на Солнце была положительной ($q_A > 0$). В скобках под указанными периодами приведены времена запаздывания $\tau_{\text{зап}}$ (в месяцах) для B_{ss} , α и ρ .

Качество модельного описания вариаций КЛ по данным двух обсерваторий за весь исследуемый период похоже ($\rho=0.94$, $\sigma=1.84-1.87\%$). На рис. 3 приведены результаты для данных обс. Китт-Пик. Оказалось, что более адекватна модуляция КЛ в 23-ем цикле ($\rho=0.96$, $\sigma=1.35\%$) данным обс. Китт-Пик, а в 21-м – обс. Стэнфорд ($\rho=0.96$, $\sigma=1.32\%$). 22-ой цикл достаточно хорошо описывается с помощью данных обеих обсерваторий ($\rho=0.97$, $\sigma=1.61\%$). Отметим, что при этом $\tau_{\text{зап}}$ для наклона токового слоя довольно большое (16 месяцев) для обс. Китт-Пик, а для обс. Стэнфорд – 9 месяцев.

В таблице приведены значения максимальных времен запаздывания, полученные из регрессионного анализа. Существует определенное различие в величинах времени запаздывания для B_{ss} -СТ, B_{ss} -КР и α для периодов с разной полярностью. Для обс. Стэнфорд в цикле с отрицательным направлением глобального поля Солнца (1981-1989 гг.) запаздывание для изменений наклона

ГМПС α составляет 5 мес., для вариаций напряженности поля – 10 мес. В том же периоде ($qA < 0$) соответствующие величины запаздывания для обс. Китт-Пик составляют – 9 мес. и 3 мес. При этом коэффициенты регрессии в используемой многопараметрической модели для составляющих, описывающих вклад от изменения B_{ss} -ST и B_{ss} -KP, равны соответственно -1.07 ± 0.17 %/нТл и -0.144 ± 0.08 %/нТл; для вариаций α – эти регрессионные коэффициенты -0.184 ± 0.006 %/градус и -0.195 ± 0.008 %/градус. Вклад в ожидаемые вариации КЛ от изменения α - структурной характеристики магнитного поля на поверхности источника – почти одинаковый, так как в модели используются значения наклона, полученного только из наблюдений обс. Стэнфорд. А вклад в полную рассчитанную модуляцию от вариаций величины поля различен: для Стэнфорда этот вклад в несколько раз больше, чем для Китт-Пика. Для Стэнфорда влияние B_{ss} на модуляцию предполагает участие более удаленной области гелиомагнитосферы, чем влияние наклона токового слоя. В этом случае долгопериодная модуляция КЛ происходит не только от изменения α , но и из-за заметного вклада вариаций величины напряженности поля. В анализируемый период вклад в модуляцию от вариаций B_{ss} -KP меньше, чем для B_{ss} -ST, и влияние его на КЛ ограничено внутренней гелиосферой ($\tau_{зап} = 3$ мес.).

На рис.4 приведены рассчитанные вклады в модуляцию от изменений солнечных характеристик для двух периодов для обсерваторий Стэнфорд и Китт-Пик. Видно, что для периода с $qA < 0$ вклад в вариации КЛ от изменения напряженности по данным обс. Китт-Пик не превышает 2%, а для обс. Стэнфорд он составляет – 6-10%. Когда полярность поля на Солнце была положительной ($qA > 0$), изменения B_{ss} для обс. Стэнфорд дали вклад 2-6%. Для обс. Китт-Пик в

этом случае получается, что вклад от Bss почти на протяжении всего периода превышал соответствующий вклад от изменений наклона и достигал более 15% для 1991 г. Для данных, полученных в обс. Стэнфорд, наоборот: вклад от вариаций α или превышает или (для интервала 1996-1998 гг.) становится сравним с вкладом от изменений Bss-ST. Полученные результаты приводят к предположению, что магнитографы этих обсерваторий регистрируют разные поля. В работе [Обридко и Шельтинг, 2003] показано, что солнечный цикл можно описать как сложное взаимодействие двух систем полей: глобального (крупномасштабного) и локального. 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. Однако при расчетах использовались синоптические карты, в которых разрешение составляет 1 гелиографический градус, что соответствует разрешению на порядок более низкому, чем исходное разрешение магнитографа обс. Китт-Пик. Более того, при расчетах поля на поверхности источника использовались только первые 10 гармоник, что, естественно, еще более понижает разрешение. Впрочем для расчетов поля на поверхности источника эффективны, по-видимому, только первые несколько гармоник. С другой стороны, не исключено, что эта разница связана с несовпадением и изменением со временем калибровочных шкал двух магнитографов.

Если же исходить из достоверности положения о различии масштабов полей, наблюдаемых в двух солнечных обсерваториях, то особенности модуляции в

периоды с разным направлением ГМПС нужно объяснять изменением влияния на долгопериодные вариации КЛ циклических изменений локальных и крупномасштабных полей.

4. Долгосрочный прогноз КЛ

Результаты модельных расчетов глубины модуляции КЛ, полученные с помощью характеристик глобального магнитного поля Солнца по данным двух солнечных магнитографов, свидетельствуют о том, что трудно описывать модуляцию КЛ, определенно отдавая предпочтение одному из рядов данных. Поэтому прогноз параметров магнитного поля Солнца (α и B_{ss}) был сделан для наблюдений 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 полярность будет отрицательной, и это будет продолжаться до максимума следующего цикла. В модели предположена смена знака поля в начале 2012 г.

Полученный в работе [Белов и др., 2003] прогноз (названный здесь ортодоксальным) опирался исключительно на уже измеренные к моменту выдачи прогноза солнечные характеристики. Было показано, что для такого варианта прогноза, чем больше срок прогнозирования, тем более широкую область внутренней гелиосферы приходится исключать из модели. Это является большой трудностью для прогноза на срок более 6-7 мес. Понятно, что, пренебрегая влиянием на космические лучи значительной (или даже основной) части гелиосферы, трудно надеяться на идеальные результаты.

Более перспективен прогноз основных характеристик магнитного поля Солнца, с тем, чтобы при прогнозировании вариаций КЛ, наряду с уже измеренными солнечными индексами, использовать оценку их поведения в ближайшем будущем. В настоящее время прогноз индексов солнечной активности проводится, используя разные подходы [Badalyan et.al., 2001; Sofia et.al., 1998; Ohl and Ohl, 1979]. В частности, активно применяется и широко представлен в Интернете прогноз числа солнечных пятен. К сожалению, попытка заменить в используемой модели напряжённость магнитного поля на поверхности источника числом солнечных пятен привела к существенному ухудшению качества модели. Поэтому приходим к необходимости выполнить прогноз характеристик глобального поля Солнца. Полагаем, что даже оценочный прогноз наклона токового слоя и напряженности глобального поля даст положительный результат при прогнозировании вариаций КЛ.

Был применен статистический подход для выполнения такого прогноза. Использовался анализ временных рядов по методу, изложенному на странице Интернет [<http://www.statsoft.com/textbook/sttimser.html>, и ссылки к ней]. Здесь представлен способ проведения интегрированного анализа данных, графического отображения результатов, работа с базами данных, а также с системой приложений с широкими возможностями для подробного научного анализа. Анализ временных рядов основан на предположении, что последовательные значения в файле данных являются последовательными измерениями, проведенными через равные промежутки времени. С помощью методологии ARIMA (авто-регрессионного интегрированного скользящего среднего) можно смоделировать временной ряд данных с учетом их тренда и сезонных изменений и выполнить прогнозирование.

Это же можно сделать, проведя процедуру экспоненциального сглаживания временного ряда, предварительно оценив параметры модели (используя минимизацию суммы квадратов остаточных величин). Метод ARIMA достаточно технически сложен, и получаемый результат зависит от степени «критицизма» исследователя.

Полученный с помощью статистического анализа прогноз наклона токового слоя и напряженности глобального поля представлен на рис.5. Статистические характеристики прогноза наклона: средняя ошибка -0.022 , средняя абсолютная ошибка -4.17 , средняя абсолютная процентная ошибка -12.23% ; для напряженности соответственно: 0.003 , 0.711 , 11.64% .

Затем на основании выполненного прогноза солнечных характеристик и модели модуляции КЛ [Belov et. al., 2001a,b; Белов и др., 2002] был дан долгосрочный прогноз вариаций КЛ (рис.6). При описании вариаций КЛ коэффициент корреляции для варианта с использованием данных обс. Стэнфорд равен $\rho=0.89$ ($\sigma=2.51\% \cdot \tau_{\text{зап}}$ для Bss, α и ρ соответственно 7, 5, и 2 мес.), а для данных обс. Китт-Пик - $\rho=0.69$ ($\sigma=4.08\% \cdot \tau_{\text{зап}}$ для Bss, α и ρ соответственно 2, 6 и 5 мес.). Таким образом, в рамках предложенной модели модуляции прогноз вариаций КЛ более точен для обс. Стэнфорд, данные которой использовались в этой работе и для определения напряженности поля, и для определения наклона гелиосферного токового слоя.

Сопоставляя два полученных прогноза поведения КЛ видно, что по результатам наблюдений обс. Китт-Пик следующий минимум КЛ должен быть в конце 2006 г. - начале 2007 г., по данным обс. Стэнфорд – в середине 2006 г. В работе [Обридко и Шельтинг, 2003] при изучении глобальной магнитологии

Солнца и опорных точек солнечного цикла дана оценка течения 23 цикла и указана ожидаемая дата его конца (середина 2007 г.). При точности использованного метода расхождение с этой датой совсем невелико.

5. Заключение

Модель модуляции ГКЛ в гелиосфере, основанная на сравнении долговременных вариаций КЛ с характеристиками магнитного поля Солнца, дает возможность рассчитывать наблюдаемые вариации ГКЛ с большой точностью и перейти к их долгосрочному прогнозу. Прогноз характеристик глобального магнитного поля Солнца является основополагающим для долгосрочного прогноза вариаций ГКЛ. Особенности модуляции в периоды с разным направлением ГМПС можно объяснить изменением соотношения вкладов в долгопериодные вариации циклических изменений локальных и крупномасштабных полей Солнца.

Из-за существующего различия в особенностях и результатах долговременных наблюдений магнитного поля магнитографами обсерваторий Стэнфорд и Китт-Пик трудно сделать определенный выбор в пользу одной из них. Поэтому прогноз выполнен с учетом данных обеих обсерваторий.

Прогноз поведения КЛ до 2012 г, выполненный с помощью статистических методов, показывает: по результатам наблюдений в обс. Китт-Пик следующий минимум КЛ должен быть в конце 2006г-начале 2007г., по данным обс. Стэнфорд – в середине 2006г.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 02 -02-16992, 01–02-17580 и 02-02-16199).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов А. В, Гущина Р. Т., Обридко В. Н, Шельтинг Б.Д., Янке В. Г. Связь долговременной модуляции космических лучей с характеристиками глобального магнитного поля Солнца // Геомагнетизм и аэрономия. Т.42. №6. С.727-735. 2002.
- Белов А. В, Гущина Р. Т. ,. Обридко В. Н, Шельтинг Б.Д., Янке В. Г. О возможности прогнозирования долговременных вариаций галактических космических лучей // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 67. С.508-511. 2003.
- Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Глобальная магнитология Солнца и опорные точки солнечного цикла // Астрономический журнал. Т. 80. N 11.С. 1034-1045. 2003.
- Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. Глобальная магнитология Солнца и опорные точки солнечного цикла//Тр. 7-ой международной конференции по физике Солнца "Климатические и экологические аспекты солнечной активности». ГАО РАН Пулково. Санкт-Петербург. 7-11 июля 2003 г. С.339-334. 2003.
- Badalyan O. G., Obridko V. N., Sykora J. Brightness of the Coronal Green Line and Prediction for Activity Cycles 23 and 24 //Solar Phys. V. 199. Issue 2. P. 421-435. 2001.
- Belov A.V., Shelting B.D., Gushchina R.T., Kharshiladze A.F., Obridko V.N., Yanke V.G. Global magnetic field of the sun and long-term variations of galactic cosmic rays// J. Atmos. Terr. Phys. V.63. N18. P.1923-1929. 2001.
- Belov A.V., Shelting B.D., Gushchina R.T., Obridko V.N., Yanke V.G. Long-term variations of galactic cosmic rays and their relation to the solar magnetic field parameters// Proc. 27th ICRC, Hamburg. V.10. P.3911-3914. 2001.
- Hoeksema J.T., & Sherrer P.H. The solar magnetic field-1976 – through 1985//Report UAG-94. 1986. WDC-A for Solar Terrestrial Physics

- *Hoeksema J.T.* // <http://quake.stanford.edu/~wso>, 2003.
- <http://www.statsoft.com/textbook/sttimser.html>
- *National Solar Observatory/Kitt Peak* <http://www.nso.noao.edu/nsokp/dataarch.html>
- *Obridko V. N. and Shelting B. D.* Structure of the heliospheric current sheet as considered over a long time interval (1915-1996) // *Solar Phys.* V. 184. P. 187-200. 1999.
- *Ohl A. I. and Ohl G. I.* A new method of very long-term prediction of solar activity// *Solar - Terr. Pred. Proc.*, ed. R. Donnelly. NOAA/SEL. Boulder. CO. USA. V. 2. P 258-263. 1979.
- *Sofia S., Fox P., Schatten K.* Forecast Update for Activity Cycle 23 from a Dynamo-Based Method // *Geophys. Res. Lett.* V.25. No. 22. P. 4149-4152.1998.

А. В. Белов 334-09-24

Р.Т. Гущина 334-09-25

В.Н. Обридко 334-02-82

Б.Д. Шельтинг 334-02-96

В. Г. Янке 334-09-25

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН

Подписи к рисункам к статье

А.В. Белова, Р.Т. Гущиной, В.Н. Обридко, Б.Д. Шельтинг, В.Г. Янке «Прогноз вариаций галактических космических лучей в следующем солнечном цикле на основе различных магнитных наблюдений»

Рис.1 Средняя напряженность магнитного поля Солнца B_{ss} , рассчитанная на поверхности источника по данным обс. Стэнфорд (B_{ss} -ST) (штриховая кривая) и обс. Китт-Пик (B_{ss} -KP) (сплошная кривая).

Рис.2 Корреляция величин напряженности магнитного поля Солнца двух обсерваторий (B_{ss} -ST), (B_{ss} -KP).

Рис.3 Вариации КЛ с жесткостью 10 ГВ (%) (жирная кривая) и ожидаемые вариации (%), полученные из модельных расчетов для 1976-2003 гг.(тонкая кривая)

Рис.4 Вклад в вариации КЛ изменений напряженности магнитного поля на поверхности источника B_{ss} и изменений наклона токового слоя α для 1981 –1989 гг. и 1991-2000 гг. по наблюдениям двух обсерваторий (Стэнфорд и Китт-Пик).

Рис.5 Изменения средней напряженности B_{ss} и наклона гелиосферного токового слоя α по данным обс. Стэнфорд и Китт-Пик. Методика определения B_{ss} и α дана в [Obriidko and Shelting, 1999]. Наклон гелиосферного токового слоя - результаты обс. Стэнфорд (5.1976 - 8.2003 гг.), (1.1950-4.1976 гг.) - по восстановленной структуре магнитного поля с использованием $N\alpha$ данных. С 9.2003 г. – прогноз наклона и напряженности поля на поверхности источника.

Рис.6а,б. Наблюдаемые (НМ, Москва) и рассчитанные по модели среднемесячные вариации КЛ в 1976 – 2012 гг (нижняя часть). На верхней части – вклады в рассчитанную вариацию от изменений B_{SS} -ST, α и p . Прогноз вариаций КЛ – для периода 9.2003- 5.2012 гг.

Таблица 1. Параметры корреляционной связи Bss-ST и Bss-KP

Период	1976-05- 1986-01	1986-12- 1996-04	1995-04- 2003-04	1976-05- 2003-8
ρ	0.43	0.80	0.65	0.51
σ , %	1.60	1.04	1.01	1.40

Таблица 2 Параметры регрессионной связи δ - Bss-ST, α , ρ и δ -Bss-KP, α , ρ .

Bss-ST			Bss-ST			Bss-KP			Bss-KP		
Период	ρ	σ , %	Период	ρ	σ , %	Период	ρ	σ , %	Период	ρ	σ , %
1977.0 1- 1987.0 5 (6 15 5)	0.96	1.32	(qA<0) 1981.01 - 1989.12 (10 5 1)	0.96	1.51	1975.07 - 1987.05 (8 16 4)	0.95	1.54	(qA<0) 1981.01 - 1989.12 (3 9 2)	0.95	1.67
1987.0 6- 1997.1 2 (7 9 1)	0.97	1.61	(qA>0). 1991.01 - 2000.08 (2 15 3)	0.95	1.65	1987.07 - 1997.03 (5 16 0)	0.97	1.62	(qA>0). 1991.01 - 2000.08 (5 9 2)	0.95	1.61
1997.0 2- 2003.0 8 (16 0 2)	0.94	1.53				1996.11 - 2003.08 (20 5 5)	0.96	1.35			
1977.0 1- 2003.0 8 (7 10 2)	0.94	1.87				1976.10 - 2003.08 (7 15 3)	0.94	1.84			

Примечание: Цифры (в скобках) под датами обозначают запаздывание КЛ (мес.) относительно изменений средней напряженности магнитного поля B_{ss} , наклона гелиосферного токового слоя α и полярности поля ρ .

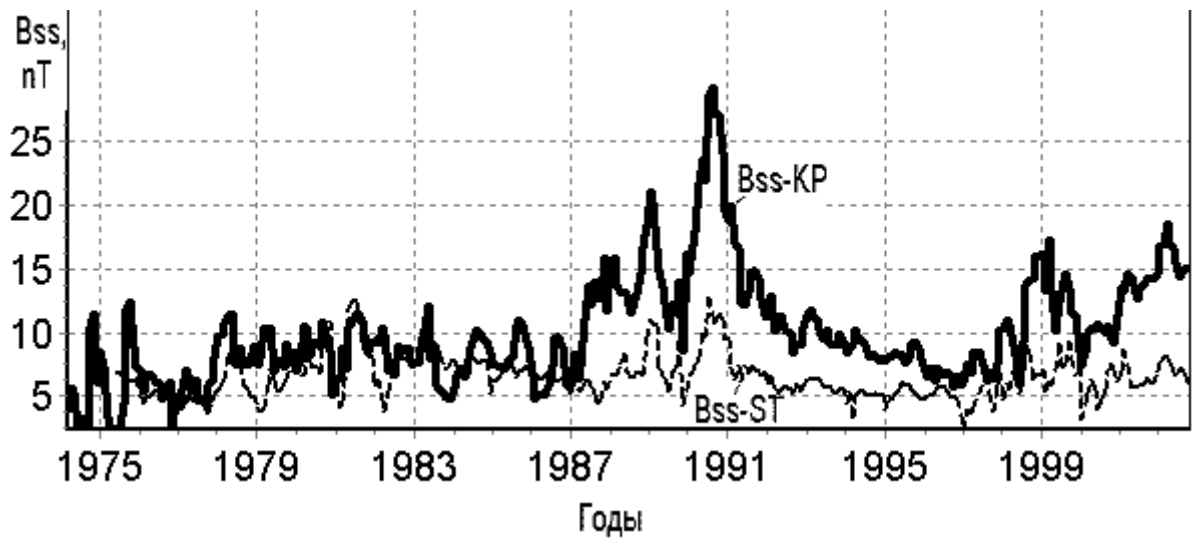


Рис.1 Средняя напряженность магнитного поля Солнца B_{ss} , рассчитанная на поверхности источника по данным обс. Стэнфорд (B_{ss-ST}) (штриховая кривая) и обс. Китт-Пик (B_{ss-KP}) (сплошная кривая).

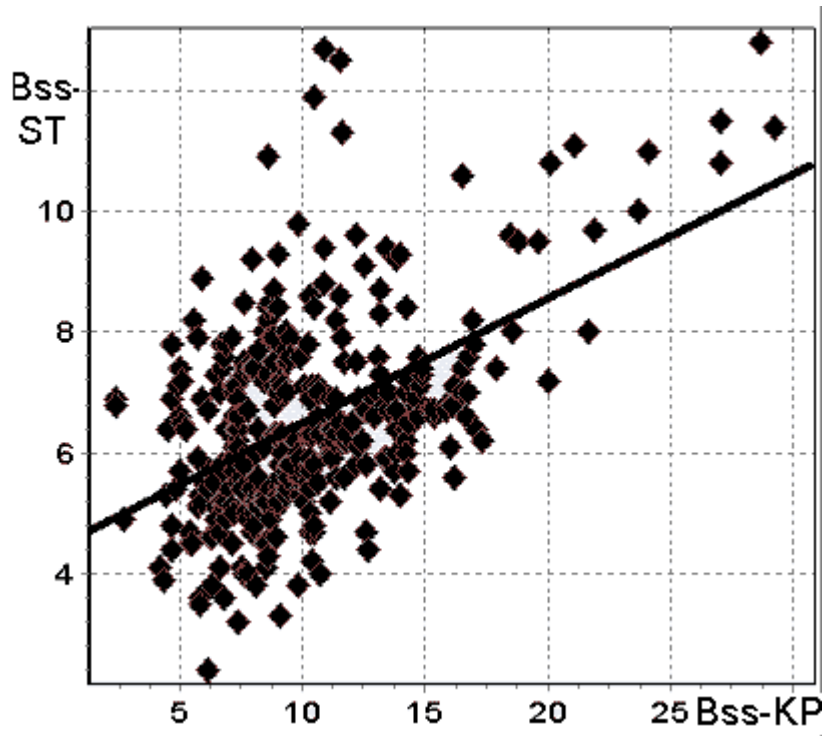


Рис.2 Корреляция величин напряженности магнитного поля Солнца двух обсерваторий

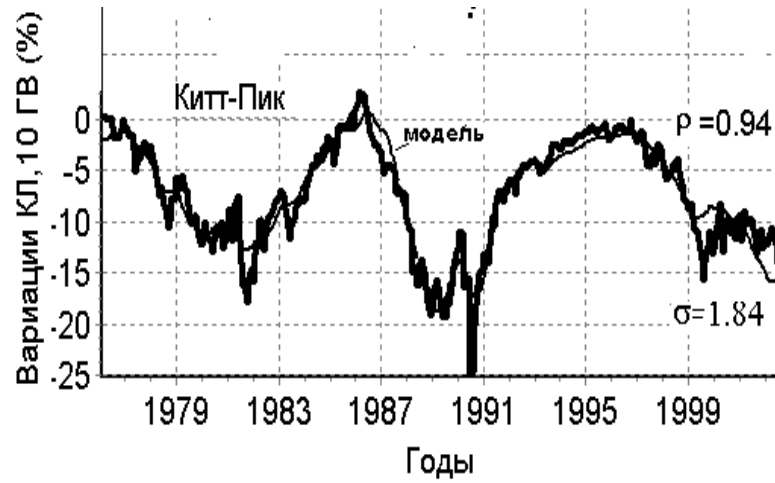


Рис.3 Вариации КЛ с жесткостью 10 ГВ (%) (жирная кривая) и ожидаемые вариации (%), полученные из модельных расчетов для 1976-2003 гг.(тонкая кривая)

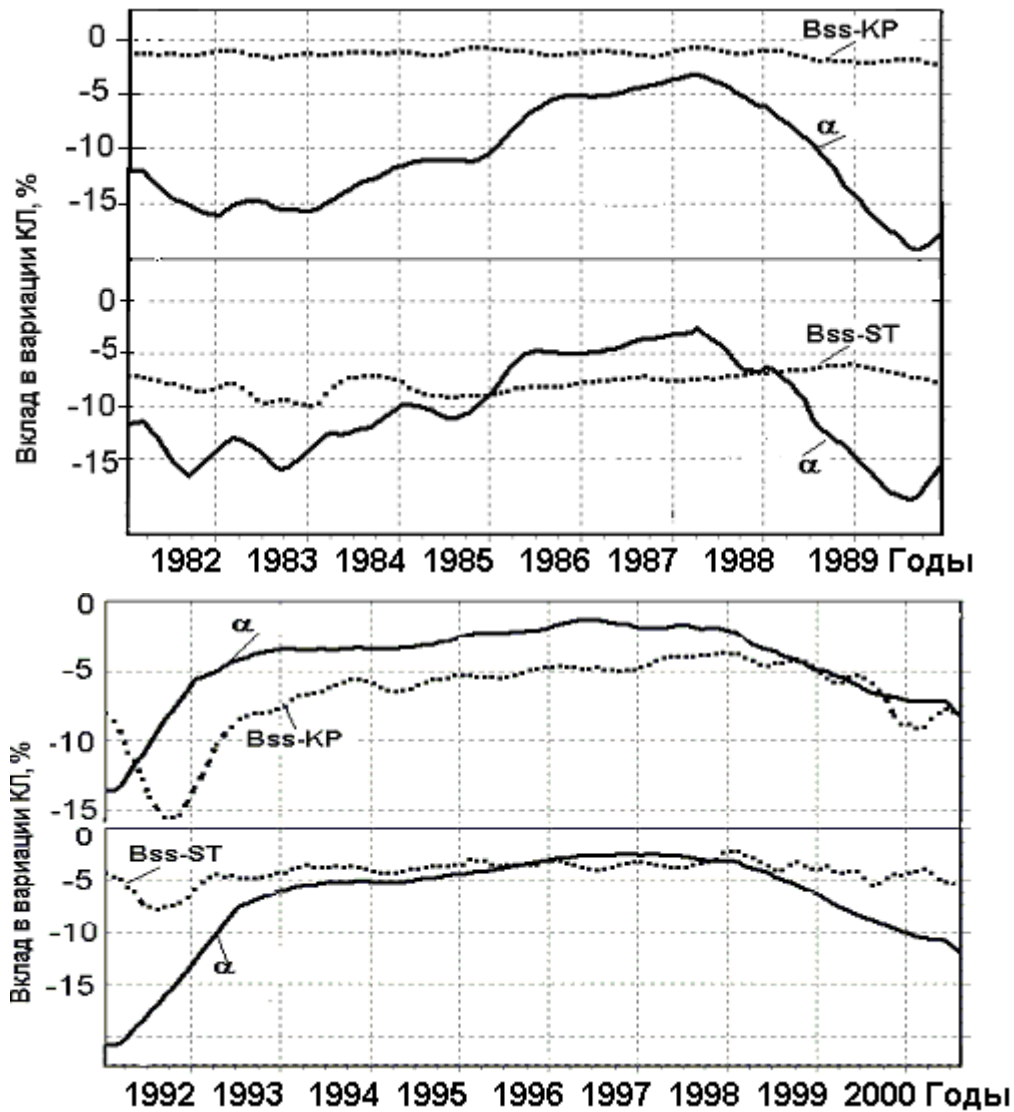


Рис.4 Вклад в вариации КЛ изменений напряженности магнитного поля на поверхности источника B_{ss} и изменений наклона токового слоя α для периода 1981-1989 гг. и 1991-2000 гг. по наблюдениям двух обсерваторий (Стэнфорд и Китт-Пик)

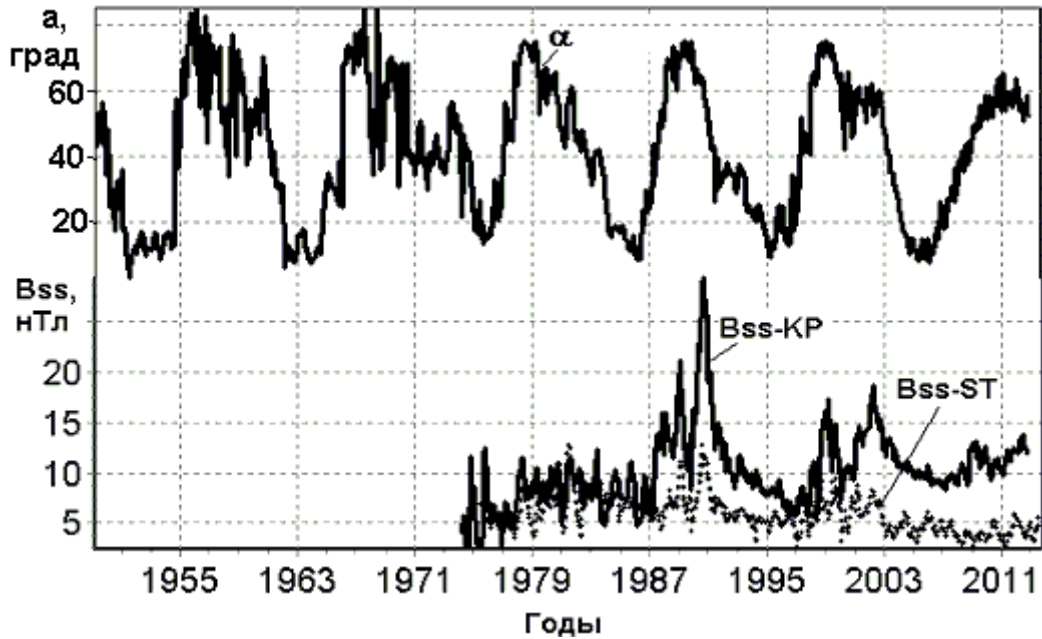


Рис.5 Изменения средней напряженности B_{ss} и наклона гелиосферного токового слоя α по данным обсерваторий Стэнфорд и Китт-Пик. Методика определения B_{ss} и α дана в [Obridko and Shelting, 1999]. Наклон гелиосферного токового слоя - результаты obs. Стэнфорд (5.1976- 8.2003 гг.), (1.1950-4.1976 гг.) - по восстановленной структуре магнитного поля с использованием $N\alpha$ данных . С 9.2003 г. – прогноз наклона и напряженности поля на поверхности источника.

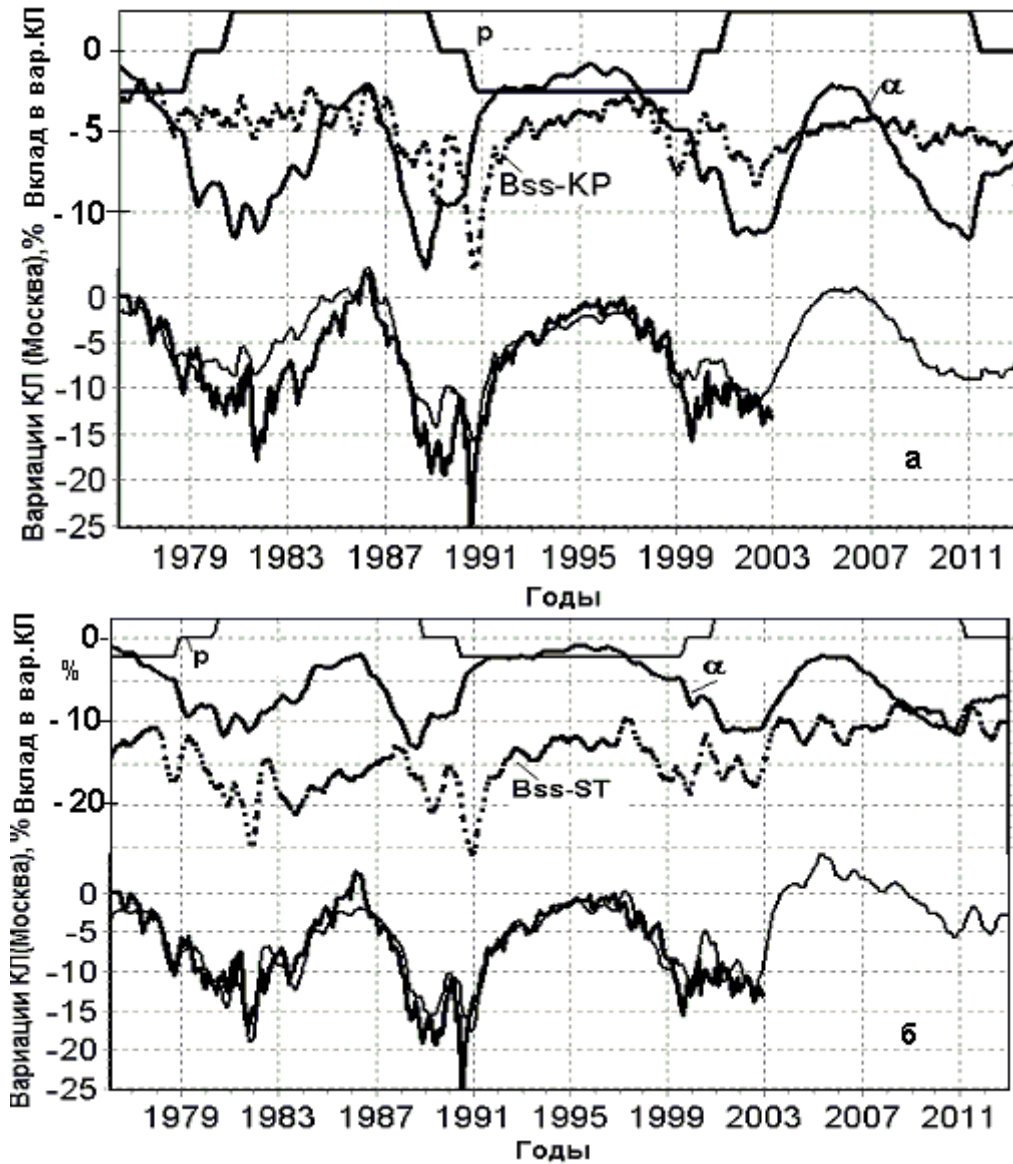


Рис.6а,б. Наблюдаемые (НМ, Москва) и рассчитанные по модели среднемесячные вариации КЛ в 1976 – 2012 гг. (нижняя часть). На верхней части – вклады в рассчитанную вариацию от изменений а) B_{SS-KP} , α и ρ , б) B_{SS-ST} , α и ρ . Прогноз – для периода 9.2003- 5.2012 гг.