

УДК 523.047-355

СВЯЗЬ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА У ЗЕМЛИ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ НА ПОВЕРХНОСТИ ИСТОЧНИКА

© 2006 г. А. В. Белов, В. Н. Обридко, Б. Д. Шельтинг

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. А.Н. Пушкова РАН,
Троицк (Московская обл.)*

E-mail:obridko@izmiran.rssi.ru

Поступила в редакцию 16.02.2005 г.

Для длительного периода (1976–2004 гг.) за каждый день рассчитано солнечное магнитное поле B_s для проекции Земли на поверхность источника солнечного ветра. Эти данные сопоставлялись со среднесуточными значениями скорости солнечного ветра и различными компонентами межпланетного магнитного поля у Земли. Статистический анализ выявил достаточно тесную связь между характеристиками солнечного ветра у Солнца и у Земли в периоды без значительных спорадических солнечных и межпланетных возмущений. Предложены численные эмпирические модели, позволяющие по наблюдениям солнечного магнитного поля вычислять скорость солнечного ветра, напряженность межпланетного магнитного поля, его продольную и B_z -составляющие. Во всех этих моделях главную роль играет величина B_s . Показано, что в спокойные и относительно слабозвозмущенные периоды на основе наблюдений солнечного магнитного поля можно прогнозировать изменения A_p -индекса геомагнитной активности на 3–5 дней вперед, причем качество такого прогноза выше, чем у существующих прогноза, составляемых традиционными методами.

PACS numbers: 96, 50, C1

1. ВВЕДЕНИЕ

К Земле от Солнца приходит только та плазма, которая пересекает поверхность источника солнечного ветра за несколько дней до этого. Поэтому кажется очевидным, что, зная свойства плазмы на поверхности источника, можно предсказывать поведение солнечного ветра у Земли. Более того, поскольку возмущения магнитного поля Земли определяются локальными свойствами солнечного ветра [Akasofu, 1981], таким образом можно было бы предсказывать и изменения геомагнитной активности. Наиболее серьезные предпосылки существуют для прогнозирования различных компонент межпланетного магнитного поля и скорости солнечного ветра. Регулярно проводятся измерения магнитного поля на фотосфере, разработаны модели [Hoeksema and Scherger, 1986], позволяющие на основе фотосферных наблюдений рассчитывать поле на поверхности источника. Wang and Sheeley [1981, 1986, 1992] уже достаточно давно предложили способ для определения скорости солнечного ветра из тех же магнитных наблюдений и доказали его эффективность. Тем не менее, все эти данные и разработки пока еще мало используются в задачах космической погоды, и полная методика прогнозирования межпланетных параметров и геомагнитных индексов, основанная на наблюдениях солнечного магнитного поля, до сих пор не создана. Для объяснения такого положения дел можно упомянуть

несколько основных проблем. Во-первых, солнечный ветер очень сильно изменяется по пути от Солнца к Земле. Если на поверхности источника предполагается строго радиальное магнитное поле и отсутствие поперечной компоненты, то реальные наблюдения межпланетного магнитного поля (ММП) свидетельствуют о большой его изменчивости по направлению. Поперечная (в частности B_z) компонента не только присутствует в реально наблюдаемом поле, но и сравнима с продольной компонентой. Иногда можно даже услышать утверждения о межпланетном происхождении большей части наблюдаемого у Земли магнитного поля. Во-вторых, несмотря на широкое и успешное применение моделей расчета солнечного магнитного поля в потенциальном приближении, они остаются ограниченными и неполными. В частности, эти модели, определенно, не годятся для всех нестационарных ситуаций. В третьих, часто оставляют желать лучшего полнота и точность экспериментальных данных. Это относится и к солнечным наблюдениям и к измерениям солнечного ветра. Возможно, по этим причинам точные количественные связи околосолнечных и околоземных характеристик солнечного ветра пока не установлены, а практическая ценность таких связей не доказана.

В данной работе мы проводили статистический анализ связи измеренных у Земли скорости солнечного ветра и различных компонент меж-

планетного магнитного поля с характеристиками магнитного поля Солнца, рассчитанными для поверхности источника. Цель этого исследования – установить, насколько тесной является такая связь, и получить ее количественное описание, которое можно использовать для краткосрочного прогнозирования характеристик солнечного ветра у Земли и геомагнитной активности.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Работа основана на использовании значений магнитного поля B_s , определенных за каждый день для точки на поверхности источника солнечного ветра, в которую проектируется Земля. Кроме этого мы использовали значения фото-сферного магнитного поля B_p в точке сопряженной с проекцией Земли. Для определения B_s и B_p применялась методика, развитая в работе (Обридки и др., 2005). В этой работе с единой точки зрения проанализированы все общепринятые в настоящее время схемы расчетов и используемые базы исходных данных. Показано, что все эти предположения и ограничения не могут исказить общую структуру и зависимость от цикла как солнечных, так и межпланетных данных. В то же время измеренные на Солнце значения занижены как следствие насыщения сигнала магнитографов. Показано, что поправка должна зависеть как от гелиоцентрической широты наблюдения, так и от фазы цикла. Предложена методика поправки, которая обеспечивает хорошее согласие рассчитанных и измеренных значений. Созданная база данных позволяет производить количественный расчет магнитных полей в солнечном ветре вблизи Земли.

Данные по солнечному магнитному полю сопоставлялись со среднесуточными значениями скорости СВ и характеристиками ММП из базы данных OMNI (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/ow.html>). В результате, в наших руках в общей сложности оказались данные более чем за 28 лет (с конца мая 1976 г. до сентября 2004 г.), но далеко не все они были пригодны для установления количественных связей.

В последние годы, начиная с 1995 и, особенно, с 1998 г. полнота данных (в каталоге OMNI) и по ММП, и по скорости СВ вполне приемлемая. В предыдущие годы она была много хуже, и ситуация с данными менялась от относительно удовлетворительной в 1979–1981 гг. до полного отсутствия измерений скорости в конце 1982 – начале 1983 гг. Выполненные нами предварительные расчеты показали, что не достаточно просто иметь измерения в данный день, желательно чтобы среднесуточные величины скорости солнечного ветра и характеристик ММП основывались на достаточно полных измерениях. Наилучшие результаты получаются для тех дней, когда изме-

рения солнечного ветра проводились 24 ч в сутки. Таких дней в изучаемый период оказалось ~42%.

Еще хуже полнота данных обеспечивается для измерений магнитного поля Солнца. Используемые нами наземные измерения в обс. Стэнфорд зависят от погоды и, особенно, в зимние месяцы содержат множество пробелов. Поскольку поле на поверхности источника вычисляется по синоптическим картам, то данные для каждого дня определяются измерениями за весь солнечный оборот. Мы ввели простой индекс качества данных: количество дней измерений в Стэнфорде для 27-дневного периода с центром в данный день. Как и в отношении солнечного ветра, предварительные расчеты показали существенную зависимость от качества (полноты) данных. Чем строже был критерий качества, тем лучше получались результаты, а самыми лучшими они оказались при использовании самых полных данных (27 дней измерений за оборот). В изучаемый период таких, полностью обеспеченных солнечными наблюдениями, дней оказалось только 15%. Если же стремиться к полноте и солнечным, и межпланетным данным (что весьма желательно), то для анализа из каждых 15 дней остается всего один.

Дополнительные существенные ограничения накладывает и использованный нами подход. С самого начала было ясно, что на основе синоптических карт солнечного магнитного поля и среднесуточных данных можно предсказывать только относительно медленные изменения межпланетной обстановки, обусловленные рекуррентными явлениями и эволюцией крупномасштабных солнечных полей. Спорадические явления на Солнце могут сильно исказить фоновую ситуацию в солнечном ветре. Очевидно, что данный подход совершенно не пригоден для дней, когда к Земле приходят межпланетные возмущения, связанные с выбросами солнечного вещества (СМЕ). Такие дни из анализа необходимо исключать, и мы постарались это сделать. Прежде всего, были исключены дни с межпланетными ударными волнами у Земли, создававшими внезапные начала геомагнитных бурь (SSC). За ударной волной очень часто приходит сам выброс, и несколько дней подряд изменения межпланетной ситуации далеки от квазистационарных. Поэтому кроме дня с SSC пришлось исключать и 3 следующих за ним дня. Заметим, что такое ограничение существенно уменьшает влияние выбросов и мало влияет на эффекты, связанные с корональными дырами, поскольку приход к Земле высокоскоростных потоков солнечного ветра из корональных дыр, как правило, не сопровождается межпланетной ударной волной. Далее мы исключили дни с очень большими и исключительно большими магнитными бурями, в которые максимальный трехчасовой K_p -индекс достигал или превышал уровень 8. Такие магнитные бури всегда связаны с выбросами

и это ограничение еще менее затрагивает эффекты корональных дыр. Это, пожалуй, самый мягкий из использованных критериев, он отбраковывает только 1% данных. Следовало учесть, что далеко не все *CME* создают межпланетную ударную волну и/или очень большую магнитную бурю. Значительная часть приходящих к Земле выбросов солнечного вещества не предваряется ударной волной и часто создает сравнительно небольшие геомагнитные возмущения. Это особенно относится к выбросам, связанным с исчезновением солнечных волокон. Тем не менее и в этих случаях нестационарная природа околоземных явлений несомненна, и такие дни также надо исключать. С этой целью мы дополнительно отфильтровывали дни с повышенной плотностью солнечного ветра N_{SW} и напряженностью B межпланетного магнитного поля, при этом даже при самом жестком отборе все дни со среднесуточными значениями $N_{SW} < 10$ частиц $^{-1}$ см $^{-3}$ и $B_{MF} < 10$ нТл сохранялись. Перечисленные критерии фильтрации данных часто дублируют друг друга и, в общей сложности приводят к исключению только $\sim 1/3$ дней. Таким образом, обсуждаемый подход, при его явной ограниченности, применим к большей части околоземных межпланетных ситуаций и к $\sim 2/3$ всех дней.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Запаздывание. Мы использовали модель скорости солнечного ветра, которая будет обсуждаться в следующем параграфе, чтобы изучить зависимость от запаздывания. Наименьшей дисперсией между наблюдаемыми и рассчитанными величинами скорости была для запаздывания $\tau = 4$ дня, несколько выше для 5 дней и значительно выше для других времен запаздывания. Аппроксимируя зависимость дисперсии от τ многочленом четвертой степени, можно получить оптимальное запаздывание $\tau = 4.2 \pm 0.6$ дня, что соответствует средней скорости ветра между Солнцем и Землей 411 ± 58 км/с. Это значение не сильно отличается от средней для нашей выборки скорости солнечного ветра у Земли, составляющей 428 ± 5 км/с. Задавая для всей выборки одну и ту же величину времени запаздывания 4 или 5 дней, можно получать вполне удовлетворительные результаты. Однако они становятся еще лучше, если использовать наблюдения скорости солнечного ветра V_{SW} и считать, что $\tau = R_E/V_{SW}$ ($R_E = 1$ а.е.). Определенную этим выражением и округленную до целых дней величину τ мы использовали во всех обсуждаемых далее моделях.

Модель для скорости солнечного ветра. В работах [Wang and Sheeley, 1990, 1991] введен параметр, характеризующий расхождение силовых линий. Для расчета этого параметра сначала вычисляется структура магнитного поля в сферическом слое между фотосферой и поверхностью ис-

точника. Затем от точки гелиопроекции земли на поверхности источника прослеживается силовая линия вплоть до ее попадания на фотосферу в какой-то точке. Магнитные поля в начале и в конце этой силовой линии и используются в расчете этого параметра. В нашей работе мы использовали параметр [Ohrisko et al, 1996], обратный по величине, по сравнению с введенным в работе Ванга и Шили. при этом радиус поверхности источника предполагался равным 2.5 радиусов Солнца. Очевидно, что при строго радиальных силовых линиях $W_s = 1.0$, а во всех остальных случаях меньше единицы

$$W_s = 6.25 \left(\frac{B_s}{B_p} \right)^2 \quad (1)$$

Вначале мы проверили, насколько хорошей будет связь скорости СВ с параметром Ванга-Шили W_s для выборки среднесуточных величин. Учитывая взаимосвязь между скоростью и плотностью солнечного ветра, мы, в моделях для скорости V_{SW} не ограничивали плотность N_{SW} солнечного ветра, но использовали все другие, ранее обсуждавшиеся ограничения на данные. Коэффициент корреляции между W_s и V_{SW} оказался равен $\rho = 0.49$, а среднеквадратичная невязка $\sigma = 91.3$ км/с. Такой уровень корреляции между среднесуточными несглаженными величинами обнадеживает. Однако это не лучшая возможная однопараметрическая модель. Коэффициент корреляции между $|B_s|$ и V_{SW} оказался выше, а именно 0.53 при среднеквадратичной невязке 88.7 км/с. Чем выше напряженность магнитного поля на поверхности источника, тем, как правило, выше скорость вытекающей из этой области плазмы. Вызывает удивление, что модуль B_s теснее связан со скоростью солнечного ветра, чем параметр специально сконструированный для оценки скорости. Разумеется, не так важно, какой из этих параметров дает более тесную корреляцию. Значительно важнее, что $|B_s|$ можно объединить с W_s в двухпараметрической модели для вычисления скорости и при этом, как выяснилось, они удачно дополняют друг друга. Не такое значительное, но все-таки статистически значимое, дополнительное улучшение модели можно получить, добавив в качестве третьего параметра модуль фотосферного поля $|B_p|$. Подобрать коэффициенты методом наименьших квадратов, получаем следующую модель скорости:

$$V_{SW}(t) = (393 \pm 8) + (193 \pm 40)W_s + (3.9 \pm 0.4)|B_s| - (0.019 \pm 0.004)|B_p|, \quad (2)$$

где B_s и B_p измеряются в мкТ, $V_{SW}(t)$ в км/с, все солнечные параметры (здесь и далее) определяются в момент $t - \tau$.

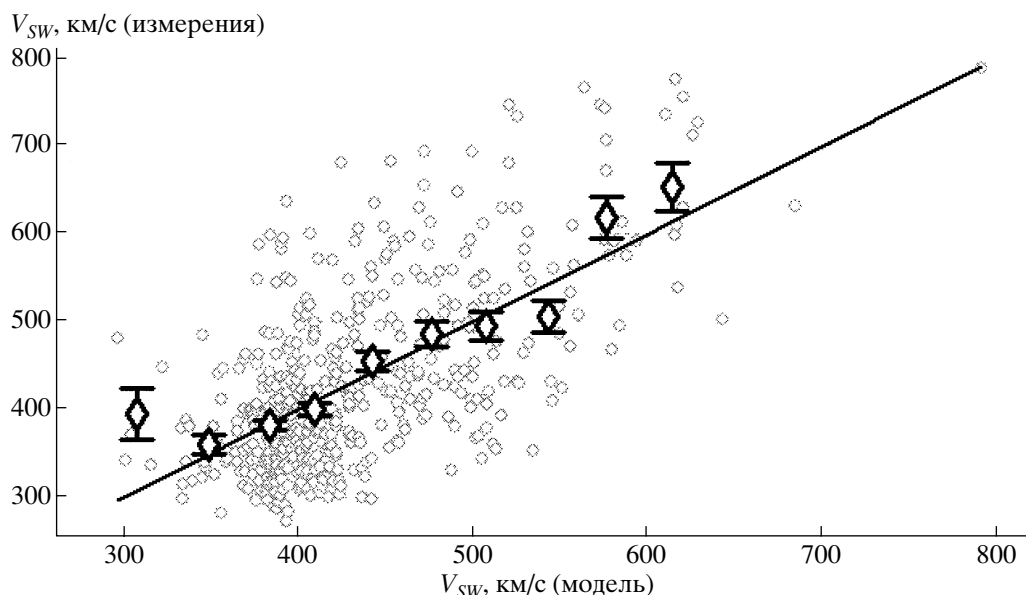


Рис. 1. Связь реально наблюдаемых и рассчитанных среднесуточных значений скорости солнечного ветра. Здесь и далее точки – данные для всех дней, ромбы – результаты усреднения в равных интервалах изменения абсциссы (средние величины приведены со стандартной статистической погрешностью), прямая – соответствует линейной регрессии.

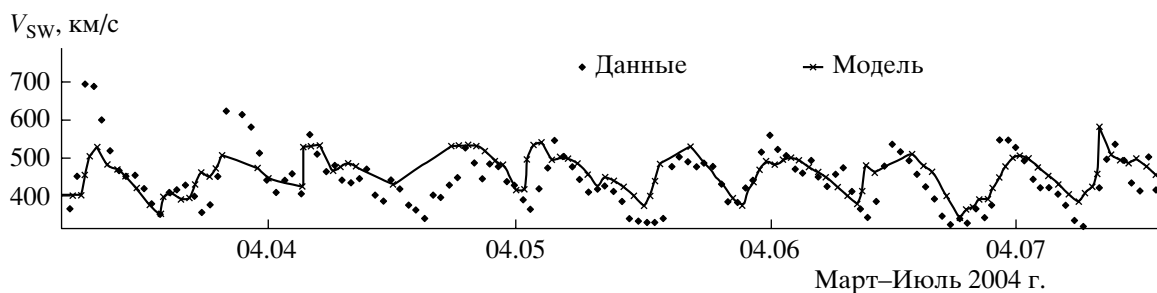


Рис. 2. Поведение реально наблюдаемых и рассчитанных среднесуточных значений скорости солнечного ветра в 2004 г.

Рис. 1 демонстрирует достаточно тесную ($\rho = 0.64$, $\sigma = 81.2$ км/с) связь рассчитанных и реальных значений скорости для этой модели, а средние величины, определенные для различных интервалов изменения скорости, показывают, что эта связь близка к линейной.

Из-за больших пробелов в данных не так просто показать сравнение ожидаемого и реального поведения V_{SW} . Для рис. 2 за несколько месяцев 2004 г. в соответствии с выражением (2) были рассчитаны ожидаемые значения скорости не только для дней, соответствующих всем критериям отбора данных, но практически для всех дней, когда имелись данные по солнечному магнитному полю. Можно видеть, что такая, сознательно загроушенная, модель удовлетворительно отображает чередование высокоскоростных и низкоскоростных потоков солнечного ветра у Земли.

Модель продольной составляющей ММП. Сравним радиальную компоненту межпланетно-

го магнитного поля B_{xe} измеренную у Земли, с величиной B_s на τ дней ранее (рис. 3). Используем только дни с полными данными и все обсуждавшиеся выше ограничения: нет очень большой магнитной бури, SSC не наблюдалось ни в этот, ни в 3 предыдущие дня, $B_{IMF} < 10$ нТл, $N_{SW} < 10$ частиц $^{-1}$ см $^{-3}$.

Рис. 3. наглядно демонстрирует связь между B_s и B_{xe} . В 84% всех дней знак B_s правильно определяет полярность ММП, а при достаточно больших величинах $|B_s|$ соответствие полярностей почти полное. Вместе с тем, картина далека от идеальной: связь B_s и B_{xe} явно не линейна, а при малых величинах $|B_s|$ полярности часто смешиваются. Бросается в глаза, что близкие к нулю напряженности магнитного поля значительно чаще встречаются на поверхности источника, чем у Земли. Если сравнить распределения B_s и B_{xe} по величине (рис. 4), этот факт становится еще оче-

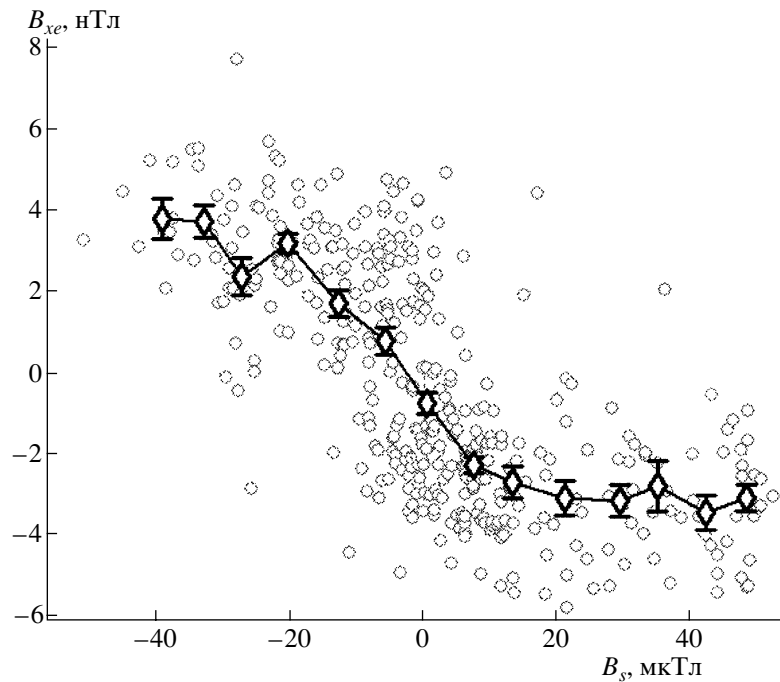


Рис. 3. Связь среднесуточных значений магнитного B_s (проекция Земли на поверхности источника) и радиальной составляющей ММП у Земли.

виднее. Возможно, частично это различие может быть объяснено меньшей точностью определения магнитного поля на поверхности источника в сравнении с точностью межпланетных измерений, но мы полагаем, что за этим различием стоят и более серьезные физические причины.

Из сравнения приведенных распределений следует, что слабые солнечные поля, как правило, не доходят до Земли. Как уже не раз отмечалось [Обридко и др. 2004], сферическая поверхность источника со строго радиальным магнитным полем во всех точках – это не более чем абстракция. Реальное магнитное поле не может быть строго радиальным по всей сфере. Оно расширяется ниже поверхности источника и (в некоторых областях, например, над корональными дырами) не остается радиальным и выше этой поверхности. В этом процессе слабые поля могут замещаться более сильными, не всегда сохраняя первоначальную полярность.

Чтобы учесть это обстоятельство, мы ввели для магнитного поля на поверхности источника индекс полярности p_s который определили следующим образом: $p_s = 1$ или -1 , если $B_s > B_u$ или $B_s < -B_u$ соответственно, а для остальных промежуточных величин $p_s = B_s/B_u$. Оказалось, что в качестве критической величины B_u удобно использовать медианное значение модуля B_s . Для нашей выборки $B_u = \text{med}|B_s| = 9.08$ мкТ.

При отсутствии межпланетного взаимодействия радиальное поле B_s у Земли должно трансформироваться в поле направленное вдоль спиральной силовой линии под углом $\psi = \arctg(\Omega R_E/V_{SW})$ к радиусу, где Ω – частота вращения Солнца. Вычислим проекцию ММП у Земли на ожидаемую в соответствии с величиной V_{SW} силовую линию: $B_L = B_{xe} \cos \psi + B_{ye} \sin \psi$, (B_{xe} и B_{ye} – компоненты поля в плоскости эклиптики) и будем называть ее продольной составляющей ММП. Знаки в последнем выражении выбраны так, чтобы положительным величинам B_L соответствовало направление от Солнца. Линейная регрессионная модель:

$$B_L(t) = (0.4 \pm 0.1) + (3.4 \pm 0.4)p_s(t-\tau) + (0.04 \pm 0.01)B_s(t-\tau) - (0.0003 \pm 0.0001)B_p(t-\tau), \quad (3)$$

позволяет определять величину продольной составляющей ММП с коэффициентом корреляции $\rho = 0.79$, и среднеквадратичным стандартным отклонением $\sigma = 2.4$ нТл (рис. 5).

Модель (3) описывает секторную структуру и другие особенности поведения ММП, как это видно на примере нескольких месяцев 2004 г. (рис. 6).

Как и ранее для скорости солнечного ветра, для построения рис. 6 из-за пропусков в данных мы были вынуждены применять модель, полученную для строго отобранных данных за весь период (1976–2004 гг.), к практически всем имеющимся данным в ограниченном временном интервале. Однако и в таких, сознательно ухудшенных,

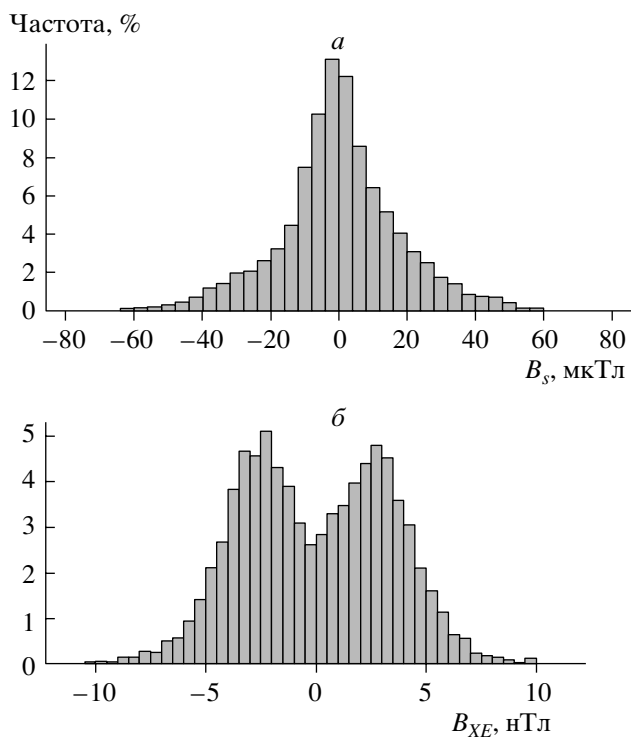


Рис. 4. Распределение по величине среднесуточных значений магнитного поля B_s и радиальной составляющей ММП у Земли (1976–2004 гг.).

условиях модель дает полезные результаты. Дополнительный анализ показывает, что наибольшие расхождения модели с экспериментом приходятся на межпланетные возмущения, обусловленные спорадическими явлениями на Солнце.

На основе $|B_s|$ (с небольшим вкладом от $|B_p|$) можно создать следующую модель для напряженности межпланетного магнитного поля B :

$$B(t) = (5.1 \pm 0.1) + (0.043 \pm 0.006)|B_s|(t-\tau) + (0.00010 \pm 0.00007)|B_p|(t-\tau), \quad (4)$$

согласующуюся с реальными данными со среднеквадратичным отклонением $\sigma = 1.5$ нТл.

Модель B_z -составляющей ММП. В зависимости от сезона та или иная часть эклиптической компоненты ММП проецируется на ось магнитного диполя Земли. Поскольку проекция оси магнитного диполя за год совершает полный оборот по плоскости эклиптики, а эклиптическая компонента ММП определяется величиной B_s , то B_{zm} (B_z -составляющая ММП в геомагнитной системе координат) будет зависеть от величин $B_s \sin(2\pi t/T)$ и $B_s \cos(2\pi t/T)$, где $T = 1$ год. Действительно, величины B_{zm} , определяемые моделью:

$$B_{zm}(t) = (-0.09 \pm 0.06) + (0.042 \pm 0.004) \times B_s \sin(2\pi t/T) - (0.014 \pm 0.004) B_s \cos(2\pi t/T), \quad (5)$$

где время t для определенности отсчитывается от зимнего солнцестояния, коррелируют ($\rho = 0.48$, $\sigma = 1.10$ нТл) с реально наблюдаемыми B_{zm} (рис. 7).

Прогнозирование Ар-индекса геомагнитной активности. Мы видим, что на основе магнитного поля B_s , определяемого для поверхности источника, можно оценивать модуль и различные составляющие межпланетного магнитного поля и скорость солнечного ветра у Земли, т.е. почти все ключевые параметры солнечного ветра, влияющие на геомагнитную активность.

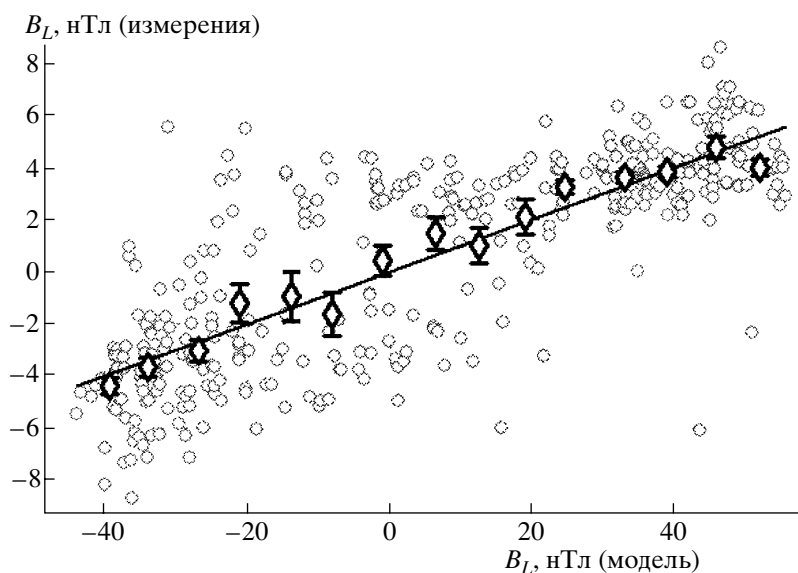


Рис. 5. Связь реально наблюдаемых и рассчитанных среднесуточных значений продольной компоненты межпланетного магнитного поля у Земли.

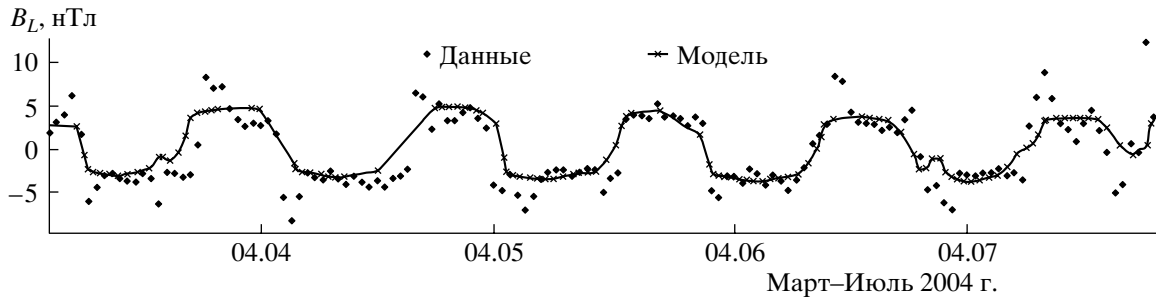


Рис. 6. Поведение реально наблюдаемых и рассчитанных среднесуточных значений продольной компоненты межпланетного магнитного поля у Земли в марте–июле 2004 г.

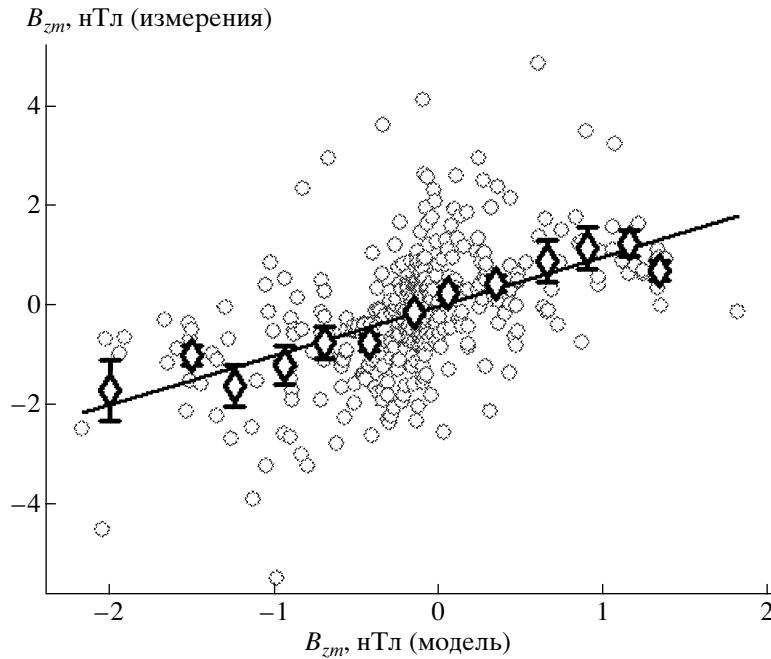


Рис. 7. Связь реально наблюдаемых и рассчитанных среднесуточных значений B_z -компоненты межпланетного магнитного поля в геомагнитной системе координат.

Akasofu [1981] для оценки поступающей в магнитосферу энергии предложил параметр:

$$E_A = V_{SW} B^2 L_0^2 \sin^4(\theta/2), \quad (6)$$

где L_0 – радиус магнитопаузы на дневной стороне, а θ – угол наклона межпланетного магнитного поля к плоскости магнитного экватора. Величина E_A хорошо контролирует уровень геомагнитной активности. В этом мы убедились сами, рассчитав величины E_A для каждого часа и получив для нашей выборки дней коэффициент корреляции 0.77 между среднесуточными величинами E_A и A_p -индексов геомагнитной активности. Выражения (2–6) дают нам возможность определять параметр Акасофу E_{AS} непосредственно из данных по солнечному магнитному полю. К сожалению, правда, у нас нет среднечасовых солнечных данных и это дела-

ет оценку E_{AS} достаточно грубой. Тем не менее, как оказалось, величины E_{AS} коррелируют и с E_A ($\rho = 0.43$) и, даже несколько лучше ($\rho = 0.46$), с A_p -индексами.

Еще лучше результаты дает объединение для оценки A_p -индексов в одной линейной регрессионной модели параметров, определяющих V_{SW} , B , B_{zm}

$$A_p = (7.1 \pm 0.6) + (22 \pm 3)W_s + (0.15 \pm 0.03)|B_s| - (0.19 \pm 0.03)B_s \sin(2\pi t/T) + (0.05 \pm 0.03)B_s \cos(2\pi t/T). \quad (7)$$

Рассчитанные с помощью последнего выражения, A_p -индексы коррелируют с реально наблюдаемыми с коэффициентом $\rho = 0.52$ (рис. 8).

Этот уровень корреляции следует признать хорошим. Дело в том, что выражение (7) фактически

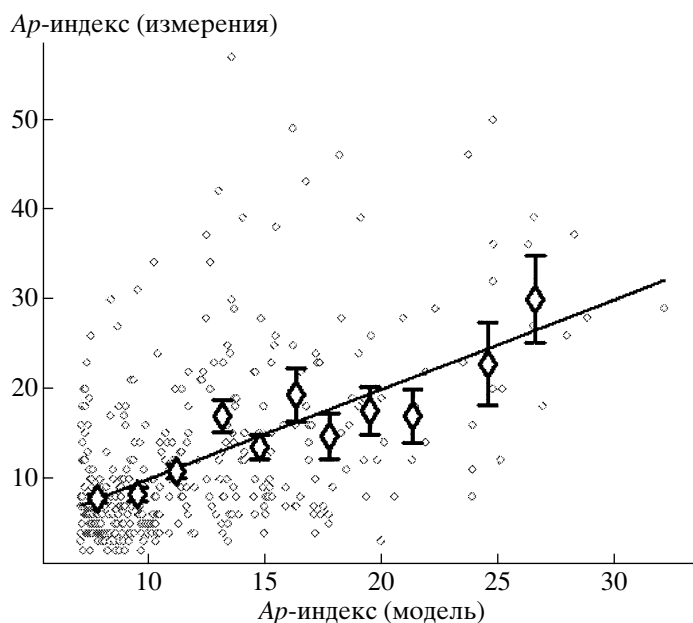


Рис. 8. Связь реально наблюдаемых и рассчитанных среднесуточных значений A_p -индекса геомагнитной активности.

ки дает прогноз A_p -индекса, в среднем, на 4 дня вперед. Надежный прогноз геомагнитной активности с такой заблаговременностью пока не обеспечивает ни один прогностический центр. Так, например, в 1999–2004 гг. прогнозы среднесуточных A_p -индексов от NOAA/SEC и Австралийского Прогностического Агентства (*IPS*) на 3 дня вперед оправдывались с коэффициентом корреляции 0.26–0.28 (Ораевский и др. 2002, Belov et al., 2005). Это означает, что существующие прогнозы согласуются с наблюдениями приблизительно вдвое хуже, чем обсуждаемая модель и ее использование в практике прогнозирования могло бы существенно улучшить качество краткосрочных прогнозов.

4. ВЫВОДЫ

На основе характеристик магнитного поля, рассчитанного для проекции Земли на поверхности источника солнечного ветра, можно прогнозировать скорость солнечного ветра, основные свойства межпланетного магнитного поля у Земли и уровень геомагнитной активности в спокойные и умеренно возмущенные периоды. Хотя такой вывод мы получили из статистического анализа ограниченного (около 400 точек) количества специально отобранных дней, мы уверены, что он относится к большей части всего времени, за исключением только тех дней, когда к Земле приходят выбросы солнечного вещества или существенно влияние таких выбросов.

Полученные здесь эмпирические связи могут найти практическое применение, с их помощью

вполне реально улучшить качество краткосрочных геомагнитных прогнозов. Для этого нужны только надежные измерения магнитного поля Солнца и их оперативная (ежедневная или более частая) обработка. Лучше опираться на спутниковые, не зависящие от погоды магнитные измерения, подобные тем, которые проводятся в эксперименте *SOHO/MDI*. Нам представляется, что переход к таким данным – это не только путь к практической реализации обсуждаемой методики, но и наилучший способ ее совершенствования. Если вместо синоптической магнитной карты использовать только измерения одного дня, нестационарные солнечные явления будут влиять на данные этого дня, но не на весь солнечный оборот. Да и величина поля в центре солнечного диска будет, в этом случае, определяться точнее. Есть и другие возможности для улучшения методики, связанные, например, с усложнением моделей и отказа от их линейности.

Разумеется, обсуждаемый здесь способ прогнозирования должен дополнить, а не заменить другие применяемые сейчас способы. Так, в прогнозе геомагнитной активности он может быть легко объединен с традиционным учетом инерционности, 27-дневной повторяемости и сезонной зависимости. Такое объединение может дать достаточно качественный фоновый прогноз $A_p(Kp)$ -индексов, для основной части времени, который в свою очередь должен быть дополнен прогнозом быстро распространяющихся межпланетных возмущений, основанном на наблюдении спорадических солнечных явлений.

Настоящая работа поддержана грантами РФФИ 04-02-15763, 05-02-15090 и 05-02-17251.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д., Харишладзе А.Ф. Многопараметрические расчеты параметров солнечного ветра по данным о солнечном магнитном поле // Астрон. Вестн. Т. 38. № 3. С. 261–272. 2004.
- Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д., Харишладзе А.Ф. Расчеты магнитного поля в околоземном пространстве по данным о солнечном магнитном поле // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 46. № 2. С. 2006.
- Akasofu S.I. The solar wind-magnetosphere energy coupling and magnetosphere disturbances // Planet. Space Sci. V. 28. P. 495–509. 1980.
- Belov A.V., Gaidash S.P., Kanonidi Kh.D., Kanonide K.Kh., Kuznetsov V.D., Eroshenko E.A. Operative center of the geophysical prognosis (Izmiran), 2005 (в печати).
- Hoeksema J.T., Schemer P.H. The solar magnetic field // Rep. UAG-94. NOAA. Boulder. Colo 1986.
- Oraevsky V.N., Kanonidi Kh.D., Belov A.V., Gaidash S.P. Operative Center IZMIRAN on Forecasting of Helio-physical conditions. Problem of the forecasting of extreme situations and their sources. Trudy Nauchno-practicheskoy Conferentsii on 26–27 June 2001. M.: Center “Antistikhiya”, 222–229, 2002.
- Wang Y.M. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere // Space Sci. Rev. V. 28. P. 121. 1981.
- Wang Y.V., Sheeley N.R. Solar wind speed and coronal flux tube expansion // Astrophys. J. V. 335. P. 726–732. 1990.
- Wang Y.M., Sheeley N.R. Why fast solar wind originates from slowly expanding coronal flux tubes // Astrophys. J. V. 372. P. L45–48. 1991.
- Wang Y.M., Sheeley N.R. On potential fields models of the solar corona // Astrophys. J.V. 392. P. 310–319. 1992.