ВАРИАЦИИ НАПРЯЖЕННОСТИ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДЛИТЕЛЬНЫХ ВРЕМЕННЫХ ШКАЛАХ

Наговицын Ю.А.^{1,2}, Осипова А.А.¹

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия

INTERPLANETARY MAGNETIC FIELD VARIATIONS ON THE LONG TIME SCALES

Nagovitsyn Yu.A.^{1,2}, Osipova A.A.¹

¹Central Astronomical observatory of RAS at Pulkovo, St. Petersburg, Russia

²State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

The IDV index of geomagnetic activity is used by many researchers as a proxy of the interplanetary magnetic field B . Using the original MSR multiscale regression method based on the wavelet transform, in this work we initially obtained a long series of B starting from 1845. Then based on the new versions 2.0 of the sunspot number and group sunspot number using MSR method and this series as a reference, interplanetary magnetic field strength starting from 1610 was reconstructed. Further extension of the reconstruction is associated with radiocarbon reconstructions of solar activity at a time scale up to several millennia.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-305-308

Введение. Напряженность B межпланетного магнитного поля (ММП) на орбите Земли – важный параметр космической погоды. Она измеряется с помощью космических аппаратов, начиная с середины 60-х годов 20-го века. С другой стороны, имеются длительные ряды геомагнитных индексов, измерение которых началось в середине 19-го века. Как показано в [1], можно на основе геомагнитных индексов (а именно, введенного индекса IDV – Inter-Durnal Variability index) восстановить историю изменений B за последние полтора века. Кроме того, основным источником изменений ММП является солнечная активность, ряд которой (версия 2.0 [2] вместе с рядом [3]) охватывает уже 400 лет. Также имеются реконструкции поведения солнечной активности по радиоуглеродным изменениям, продолжительность которых охватывает уже тысячелетия. Однако имеется ряд трудностей, из-за которых простые регрессии между восстанавливаемыми и восстанавливающими данными оказываются неточными. Основная из них – регрессии между индексами оказываются различными для разных временных шкал, создаваемых циклическими разного временного масштаба.

1. Метод мультимасштабных регрессий. Ранее [4] нами предложен метод MSR (Multi-Scale Regressions method или метод мультимасштабных ре-

грессий), позволяющий учитывать при реконструкциях различный характер связи между сравниваемыми величинами в зависимости от временного масштаба τ . Кратко, его суть в следующем. Имеется короткий ряд восстанавливаемого индекса $y(t), t \in [t_1, t_2]$, и более длинный – его *proxu* $x(t), t \in [t_1, t_3], t_3 > t_2$. На интервале $[t_1, t_2]$ производим вейвлет-преобразование $x(t)$ и $y(t)$, в пространстве вейвлет-коэффициентов получаем регрессии для разных временных масштабов (квазипериодов) τ . После этого применяем полученные соотношения для вейвлет-коэффициентов $x(t)$ на интервале $[t_1, t_3]$. Наконец, делаем обратное вейвлет-преобразование и получаем длительную реконструкцию $y(t)$ по *proxu* $x(t)$.

2. Реконструкция B на 150-летней шкале. Свальгаард и Клайвер [1], а также другие авторы для реконструкции напряженности ММП на этой шкале использовали ряды геомагнитного IDV -индекса. Нами его различные ряды были приведены в единую шкалу (остаточный коэффициент корреляции $k = 0.963$). Затем был вычислен прямой (т.е. без применения MSR-метода) коэффициент корреляции: $k = 0.931$. Применяя метод MSR, мы получили реконструкцию B , с 1845 года по наши дни.

Коэффициент корреляции между реконструкцией и наблюдаемыми значениями составил $k = 0.948$. Хотя он не намного больше, чем при прямой корреляции, показано, что он описывает более адекватно как более короткие,

так и более длительные вариации, чем 11-летний цикл.

Рис. 1. MSR-реконструкция изменений напряженности ММП (сплошная линия) в сравнении с наблюдаемыми его значениями (кружки).

3. Реконструкция B на 400-летней шкале. С наиболее общей точки зрения ММП является порождением солнечной активности. Поэтому в качестве *proxu* для напряженности ММП на 400-летней шкале могут быть использованы ряды версии 2.0 числа пятен SN [2] и числа групп пятен GN [3]. Ряд [3] был переведен в шкалу [2]: $SN = 18.3 GN$ ($k = 0.94$). Обозначим полученный 400-летний ряд W . Будем считать $B = f(W^S)$. Вначале по-

смотрим, какому S лучше всего удовлетворяет линейная форма $B = a + bW^S$ в версии 2.0 – см. рис. 2а).

Рис. 2. а) поиск наилучших значений S ; б) поиск наилучших значений Δ

Без потери точности будем считать $S = 2/3$. Обозначим $R \equiv W^{2/3}$. Корреляция B и R составляет 0.811. Далее, очевидно, что и IDV , и B связаны не только с пятенным, но и с крупномасштабным магнитным полем Солнца. Имея в виду, что вариации крупномасштабного поля предваряют вариации пятенного [5], найдем, какому сдвигу лучше всего удовлетворяет регрессия $B(t) = a + bR(t) + cR(t - \Delta)$ – см. рис.2 б). Получается $\Delta = 4$ года. Коэффициент корреляции становится уже 0.886. Теперь строим MSR-модель: $B(t) = \sum_{\tau} a(\tau) + b(\tau)R(\tau, t) + c(\tau)R(\tau, t - \Delta)$, $\tau = 2^n$. Коэффициент корреляции стал еще больше: 0.918. А если исключить первые 9 лет (ненадежные измерения), то он становится $k = 0.940$. Можно также использовать другую MSR-модель: $B(t) = \sum_{\tau} a(\tau) + b(\tau)R(\tau, t) + c(\tau)\dot{R}(\tau, t)$. Модели коррелируют между собой с $k = 0.993$. На их основе строим реконструкцию B на 400-летней шкале – рис. 3.

Рис. 3. Реконструкция B на 400-летней временной шкале

3. Реконструкция B на тысячелетней и сверхтысячелетней шкалах.

Модель выберем в виде $B(t) = \sum_{\tau} a(\tau) + b(\tau)R(\tau, t) + c(\tau)\dot{R}(\tau, t)$, используем реконструкцию Усоскина [6], полученную по радиоуглероду, и вначале построим реконструкцию B для 1000-летней, используя как опорный ряд B из предыдущего раздела, а потом – для более длительной шкалы – опорным сделаем полученный ряд, усредненный с 400-летним на интервале пересечения. Результат приведен на рис.4.

Рис. 4. Реконструкция B на 3200-летней временной шкале.

4. Результаты и выводы. Выше мы получили реконструкции изменений напряженности ММП на различных временных шкалах. Это основной результат. Рассмотрим реконструкцию на рис. 4. Рассчитаем средние B за 200 лет (избавившись т.о. от цикла Зюсса) и посмотрим 3000-летнюю тенденцию. Оказывается, в последние 3200 лет напряженность ММП испытывает тренд на убывание $-0.45 \text{ nT}/1000 \text{ лет}$ – рис. 5. Это примечательное обстоятельство, и оно должно быть в дальнейшем осмыслено.

Рис. 5. Длительные изменения B для последних 3200 лет.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 19-02-00088, 18-32-00555 и Программы ПРАН.

Литература

1. Svalgaard, L. & Cliver, E.W., JGRA, 2005, 110, Issue A12, CiteID A12103.
2. Clette, F., Svalgaard, L., Vaquero, J.M., & Cliver, E.W. 2014, Sp. Sci. Rev., 186, 35.
3. Svalgaard, L. & Schatten, K.H., 2016, SPh, 291, 2653.
4. Nagovitsyn, Y., Ivanov, V.G.; Miletsky, E.V., Volobuev, D.M., 2004, SPh, 224, 103.
5. Makarov V.I., Tlatov A.G., Callebaut D.K., et al., 2001, SPh, 198, 409.
6. Usoskin, I.G., Hulot, G., Gallet, Y., et al., 2014, Astron. Astrophys., 562, L10.