

СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР И МАГНИТНЫЕ БУРИ
24 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Solar Wind and Magnetic Storms in the 24th Solar Activity Cycle

Abstract. The slow growth of the 24 solar cycle allows us to classify it as a low cycle. Geomagnetic activity is neither extensive: strong geomagnetic storms were absent in the beginning of the growth branch of this cycle. The very prolonged minimum was lasting about 4 years. We may remember that the secular solar-activity minimum was proposed after XX century high strong cycles. It may be; we see this situation now in 2012. Our work is connected with sporadic phenomena in the 24th cycle. These more or less intensive variations of solar activity are not predicted, they are caused by emergence of new magnetic fields of sunspots, excitation of flares, intensive plasma flows, coronal mass ejections (CME) and filament eruptions. Now the last two (CME and filaments) are primary. Geomagnetic activity on the descending phase of solar cycle depends on the quality of coronal holes providing the recurrent geomagnetic storms.

Sporadic phenomena that generated geomagnetic storms in the Earth's magnetosphere if flare flows reached the magnetosphere and transferred energy to it are more interesting for us: they are valuable characteristics of the 24th cycle. The disturbed period of several geomagnetic storms was generated by solar active region N11429. This is but one sample; this case is difficult and indicative. Replacing each other scenarios describe geomagnetic variations at the beginning of March 2012. Detailed consideration of this interval revealed its communication with sporadic events on the Sun. The structural configuration of plasma in flare flows was defined by means fractal dimension calculations of solar plasma parameters: velocity V_x and density N in flare streams.

Введение

Геомагнитная возмущённость в переменном магнитном поле Земли целиком и полностью зависит от воздействия солнечных источников. Плазменные потоки и излучения Солнца генерируются светилом непрерывно и заполняют гелиосферу, но Земля в основном принимает потоки из центральной части диска, куда проецируется гелиопроекция Земли. История вопроса обширная, но, вообще говоря, всегда открытое взору специалистов полушарие Солнца является источником энергии, возмущающей магнитосферу. Изложим основные тенденции в ходе текущего 24 цикла.

Развитие 24 цикла солнечной активности (СА) пока подтверждает предположения о невысоком уровне чисел Вольфа в максимуме этого цикла в традиционной системе оценки одиннадцатилетней цикличности, что подтверждено прогнозом максимума 24 цикла по данным центра в Боулдере (<http://www.ngdc.noaa.gov/>). Необычность текущего цикла предопределил исключительно затяжной период фазы минимума 23 цикла (рис. 1), длившийся практически 4 года.

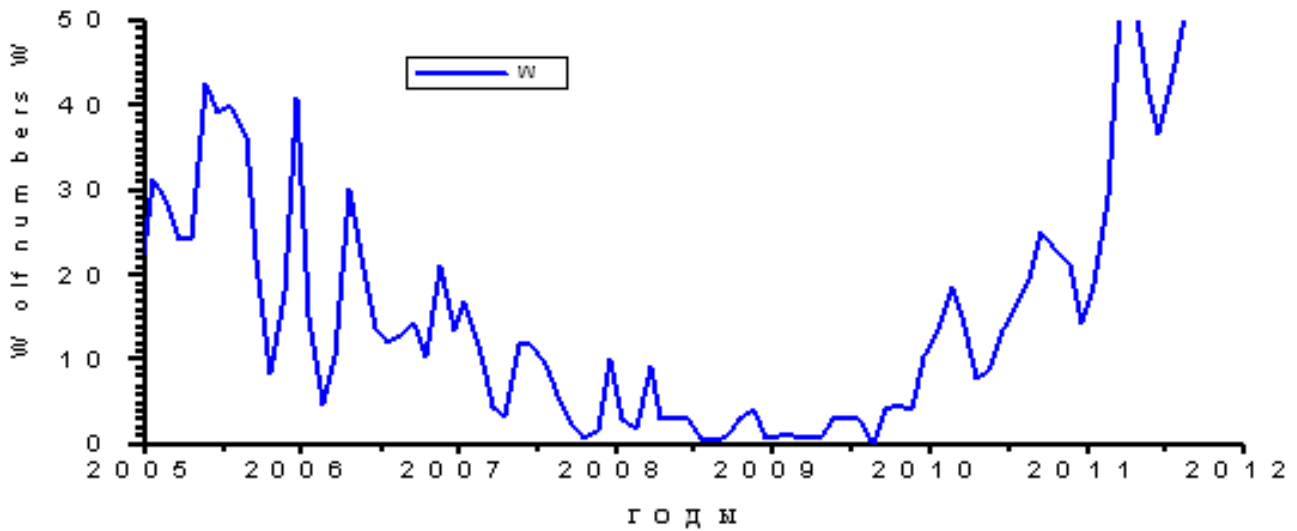


Рис. 1: Числа Вольфа в минимуме 23 цикла.

Это радикальное отличие от продолжительности минимумов 17–22 циклов говорит о необычности наступившего 24 цикла, который ещё не проявился во всей полноте максимального развития.

Наращение солнечной активности в новом цикле прежде всего оценивают по росту спорадических событий вспышечной активности, которые сопровождаются протонными событиями, выбросами корональной массы и волокон.

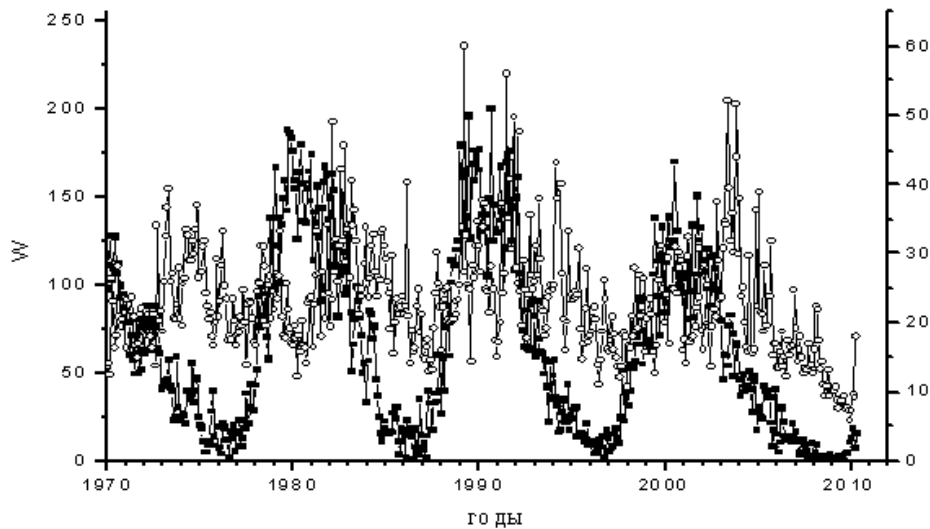


Рис. 2: Числа Вольфа W (квадраты) и aa-индекс (кружки) за 1970–2011 гг.

Геомагнитная возмущённость имеет тенденцию отставать от генерации пятен на Солнце (рис. 2), но это отдельная интересная тема, имеющая богатую историю, см. Гневышев М.Н., Оль А.И., АЖ 1948, **25**, № 1, 18–20. О 22-летнем цикле солнечной

активности: Витинский Ю.И., Оль А.И., Сазонов Б.И., Солнце и атмосфера Земли, Гидрометеиздат, Ленинград, 351 с., 1976; Обридко В.Н., Солнечные пятна и комплексы активности. Москва, Наука, 255 с., 1985 и др.

Период глубокого минимума, наступившего во второй половине 2008 и первой половине 2009 года, завершился ощутимым ростом солнечной активности в 2010 году. Спорадические проявления солнечной активности имеют отражение в геомагнитных возмущениях. Однако прямой связи этих явлений нет, поскольку геомагнитное возмущение осуществляется наиболее полно при наступлении спорадического события на Солнце в геоэффективной зоне центральной части солнечного диска. Начало 24 цикла характерно небольшим количеством таких событий, поэтому каждое из них привлекает большое внимание и подвергается тщательному анализу.

Рассмотрены все спорадические события, которые сведены в каталог и классифицированы по уровню глобальных геомагнитных и авроральных проявлений. Мощных событий геомагнитной возмущённости пока не отмечено, максимальный уровень геомагнитной активности в бурях не превосходил G3.

Каскад магнитных бурь в начале марта 2012 года

Для конкретного тщательного исследования был выбран возмущённый период начала марта 2012 года, связанный с прохождением по диску активной области (АО) 11429. АО 11429 входила в комплекс, обеспечивший последовательность рентгеновских вспышек и высокоскоростных вспышечных потоков (ВСП) солнечного ветра, нашедших проявление в каскаде магнитных бурь (МБ) с 7 марта по 15 марта 2012 года. Этот возмущённый период был разделён условно на три сценария в зависимости от качества спорадических событий. Однозначная связь геомагнитных возмущений с источниками на Солнце является основой трактовки магнитосферных проявлений, в данном случае это совершенно оправдано.

Начало активизации ярко обозначено первыми МБ 7 и 8 марта 2012 г., которые обусловлены рентгеновскими вспышками на Солнце 5–6 марта. Индекс $Dst = -78, -44, -139$ и -79 нТл соответственно с 7 по 10 марта. Авроральная возмущённость нарастает в 4.30 и длится до конца суток, регистрация прихода вспышечного потока на Wind отмечена в 3.30 UT. Начало суток до полудня 8 марта отмечено сильным понижением AE до фоновых величин единиц нТл, только после полудня UT появляются интенсивные авроральные высыпания, несколько слабеющие в начале суток 9 марта и образующие максимум авроральных вторжений с 4 по 16 часы UT. Конец суток спокоен, высыпания слабые. Следующий день 10 марта – со значительными, постепенно уменьшающимися высыпаниями.

Первый сценарий сугубо вспышечный: магнитная буря ведома вариациями вспышечных потоков СВ и завершается по окончанию их проявлений. Экстремальные величины индексов в МБ: индекс Dst достигает -139 нТл, индекс $Ap=71$ нТл.

Во второй половине суток 11 марта приходит поток СВ с выраженными отличиями параметров плазмы и ММП: модуль растёт, компоненты его флуктуируют; скорость СВ и плотность плазмы возрастают. С 18 UT V_z становится отрицательным, авроральная активность синхронно и устойчиво повышается до конца суток.

12, 13 и 14 и первая половина суток 15 марта объединены во **втором сценарии**: приходе и прохождении высокоскоростного потока (ВСП) СВ, порождённого всплеском СА на рис. 3. Внезапный выброс распространяется серповидным изгибом, скорость

распространения которого достаточно велика. В параметрах СВ отчётливо видны двух-ступенчатый приход ВСП, его передний фронт с плотностью N_p до 40 ед.; последующие изменения – уменьшение модуля ММП и $V_{св}$ при сохранении очень низкой плотности СВ, которая создана в этом случае «выметанием» материи при прохождении вспышечного ВСП. (Такая плотность была бы типичной для СВ из КД, если бы сохранялась высокая скорость СВ, порядка 600–700 км/с, а этого не наблюдается.) Вспышечные события, которые могли быть ассоциированы с этим периодом – только M8.4, начало в 17.15 UT 10 марта 2012 г. в координатах диска N17W24, вспышечный поток от которой виден на рис. 3.

Всплеск авроральной активности виден в полдень 12 марта: приход ВСП, три мощные суббури в одном 4-часовом импульсе, ~ 1700 нТл в максимальном развитии. Далее суббуревая активность умеренная и слабая.

Третий сценарий – завершение мартовского периода активизации геомагнитной возмущённости. Он достаточно сложен по трактовке. Мощная активизация авроральных высыпаний говорит о возможном вмешательстве вспышки балла M7.9 от 13 марта, но она уже была существенно на западе N17W66, АО 11429. Вспышка, следующая по времени, была уже 14 марта в 15.08 UT, АО 11432, она могла сказаться позже. Вариации скорости СВ, достаточно высокой 15, 16 и 17 марта, от 700 до 620 км/с 16 марта, когда возникает всплеск до 740 км/с с последующим возрастанием плотности до 5 ед., и до конца интервала плотность сохраняется порядка 3 ед. (не столь малая, как в предыдущем сценарии), и возмущённость по АЕ индексу остаётся умеренной.

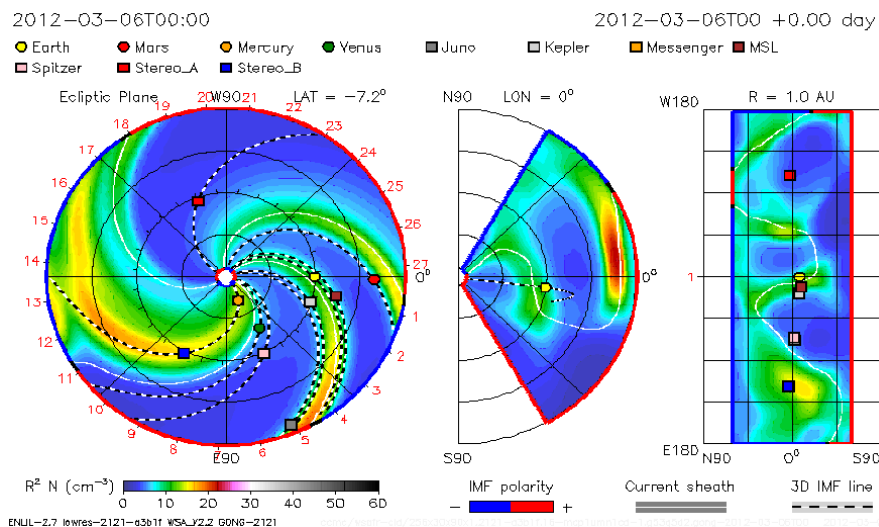


Рис. 3: Композитное изображение потоков в гелиосфере по данным указанных КА, меридиональный разрез в середине показывает внезапный вспышечный выброс.

Фрактальный анализ плазменных данных КА Wind, осуществлённый по ранее разработанной и опробованной методике, см. (Вальчук Т.Е., Могилевский Э.И., Геомагнетизм и аэронавигация, 2009, 44, № 5, 54–62; Вальчук Т.Е., Труды, Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2008», СПб, с.33–36). Особенности гелиосферного плазменного слоя при зарождении активности нового 24 цикла: Val'chuk T.E. The beginning of the new 24th cycle in solar

and geomagnetic activity generation. Proceedings of the 32nd Annual Seminar on Physics of Auroral Phenomena, Print Kola Science Centre RAS, 2009, p. 140–143) с использованием метода Хигучи (Higuchi T., Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory, Physica, 1988, **D31**, 277–283), с вариациями расчётных параметров для этого конкретного периода марта 2012 года, подтвердил ранее высказанные в работе Вальчук Т.Е. (Valchuk T.E. Fractal characteristics of heliosphere plasma layer transitions in 2006. Proceedings of the 30th Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», February 27 – March 3, 2007, Apatity, Print Kola Science Centre RAS, p. 145–148) предположения, что для фазы минимума фрактальный анализ даёт легко интерпретируемые результаты в виде оценки фрактальной размерности параметров плазмы в силу более крупномасштабных потоков коронально-дырового генезиса, а также чёткой смены секторной структуры. В отличие от этого, возмущения спорадического характера выявляются в резких изменениях фрактальной размерности, стремительных экскурсах, что говорит о стохастичности вспышечных потоков. Их структуризация несёт отпечаток вспышечных событий, которые обеспечивают магнитосферную возмущённость. Тем не менее, фрактальность среды сохраняется, поскольку величина фрактальной размерности $D < 2$. Однако выявленная для периода минимума СА закономерность в структуризации плазменных потоков при изменении секторной структуры межпланетного магнитного поля сохраняется также в расчётах для периода прохождения АО 11429. Тем самым подтверждается существенное отличие потока плазменного слоя, облегающего тонкий токовый слой, расположенный внутри него, от турбулизованных спорадических потоков.

Обсуждение и выводы: что характеризуют индексы геомагнитной активности?

В настоящее время понятна недостаточность и субъективность почти всех индексов, которые используются как мера оценки. Прежде всего, даже в индексах заложена локальность оценочных величин. (То же самое мы говорим и о солнечных рядах – числах Вольфа и площадях пятен).

Геомагнитные бури: индекс Dst вычисляется по четырём обсерваториям экватора, характеристика кольцевого тока бури. Но на самом деле трансформируется вся магнитосфера, и плазмосодержащие регионы преобразуются во время бури!

Среднеширотный, наиболее популярный в использовании aa-индекс считается самым достоверным, его ряд длинный и однородный, но он получен просто по магнитограммам всего двух обсерваторий: Гринвич (Великобритания) и Мельбурн (Австралия).

Кр и Ар индексы сходны, корреляция между всеми индексами хорошая, но это все можно подытожить как свойственную им грубую оценку вариаций. Понятно, что сеть геомагнитных обсерваторий очень важна как отражение безусловно сложной динамики магнитосферы, которую индексы не отображают. И вся подробная запись геомагнитных вариаций очень важна для того, чтобы

- 1) выделить периоды, когда есть негативные проявления при целом ряде заболеваний; это возможно, но требует большой статистики, тщательности и подробного анализа медицинских данных;
- 2) продолжить попытки разобраться в тропосферной динамике, которую осуществляют циркуляционные механизмы в нижней атмосфере;

3) развивать представления о магнитосферно-ионосферных взаимодействиях как единой системе, рабочем пространстве высокотехнологичных приборов и космических аппаратов, которые стали необходимы не только науке, но и человечеству в целом: связь, передача информации, GPS, мониторинг среды обитания и отдалённого космоса, метеорология и т.д.

Солнечный ветер является основным агентом, определяющим уровень геомагнитной активности. Необычность текущего 24 цикла СА, находящего отображение в геомагнитной возмущённости, говорит о том, что характеристики солнечного ветра текущего цикла № 24 и предыдущих циклов сильно отличаются. Однако все используемые индексы обладают целым рядом недостатков, частично уже указанных, а энергетика Солнца как основной фактор его трансформаций пока не поддаётся численной оценке. Причём в геомагнитной активности отображается вариабельность СА в регионе гелиопроекции Земли на диск Солнца, т.е. в довольно ограниченном регионе, как принято считать. В реальности всё происходит ещё сложнее: магнитосфера как сложный принимающий агент сканирует неоднородный набегающий солнечный ветер, конкретно взаимодействующий с ней в области прохождения Земли по орбите, пройдя 150 000 000 км в гелиосфере, плюс электромагнитные излучения и солнечные космические лучи, приходящие гораздо быстрее, за время ~ 8 минут. Поэтому краткосрочный прогноз геомагнитной активности гораздо более продуктивен. Однако обилие данных о солнечной активности, расширенное уже до наблюдений обратной стороны Солнца, безусловно, со временем трансформируется в новые ряды солнечных характеристик, которые в гораздо большей мере будут характеризовать геомагнитную возмущённость.

ИЗМИРАН имени Н.В. Пушкина
Москва, Троицк
valchuk@izmiran.ru
Получена 18 января 2013 г.

Т.Е. Вальчук
Т.Е. Val'chuk