

МАГНИТНЫЙ ЦИКЛ ХЕЙЛА В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ И ТРАЕКТОРИЯХ ВНЕТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

Веретененко С.В., Дмитриев П.Б.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

MAGNETIC HALE CYCLE IN GEOPHYSICAL CHARACTERISTICS AND EXTRATROPICAL CYCLONE TRAJECTORIES IN THE NORTH ATLANTIC

Veretenenko S.V., Dmitriev P.B.

Ioffe Institute RAS, St. Petersburg, Russia

Manifestations of the solar magnetic Hale cycle in geophysical and climatic characteristics were studied. It was found that there are noticeable differences between temporal variations in geomagnetic activity, galactic cosmic ray (GCR) fluxes and latitudes of North Atlantic cyclone trajectories in even and odd solar cycles (according to the Zurich numbering). The differences are observed during the declining phase of the solar cycle (usually from the second to the fifth year after the sunspot maximum). Geomagnetic activity was found to be higher in odd cycles, which can be most distinctly seen in annual occurrence frequencies of magnetic storms with gradual commencements and geomagnetic aa-indices. GCR fluxes entering the Earth's atmosphere are higher during the declining phase of even cycles compared to odd ones. A statistically significant northward shift of North Atlantic cyclone trajectories is also observed during the declining phase of even cycles. The obtained results allow suggesting that bidecadal variations in climatic characteristics are associated with the solar Hale cycle, which influences the input of energetic charged particles in the Earth's atmosphere (galactic cosmic rays and auroral electrons).

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-65-68>

Магнитный цикл Хейла (~22 года) проявляется в колебаниях полярности магнитных полей на Солнце [1]. Он состоит из 2-х последовательных 11-летних циклов (циклов Швабе-Вольфа), при этом при переходе к новому 11-летнему циклу распределение полярности в группах солнечных пятен меняется на противоположное. Вблизи максимума 11-летнего цикла происходит обращение общего магнитного поля (ОМП) Солнца. Согласно правилу Гневышева-Оля, наблюдается тесная связь между суммарными (за цикл) числами Вольфа для пар четный–нечетный цикл, тогда как для пар нечетный–четный цикл эта связь существенно слабее (напр., [2]). Это позволяет считать, что ~22-летний магнитный цикл Хейла начинается с четного цикла. Бидекадные колебания, близкие к циклу Хейла, наблюдаются во многих климатических характеристиках, при этом их амплитуда может существенно превышать амплитуду 11-летних колебаний [3]. В настоящей работе ис-

следует проявление цикла Хейла в геофизических и атмосферных характеристиках.

На рис. 1 представлены средние изменения годовой повторяемости бурь с внезапным (SC) и постепенным (GC) началом в четных и нечетных циклах, построенные методом наложения эпох (МНЭ) по данным обсерваторий ИЗМИРАН (1934–2015 гг.) [4] и Слущк/Павловск (1878–1940 гг.) [5]. Источниками SC и GC бурь являются, как правило, выбросы корональной массы и высокоскоростные потоки солнечного ветра из корональных дыр, соответственно [6]. Данные на рис. 1 показывают, что повторяемость SC бурь в четных и нечетных циклах имеет подобный временной ход, но выше в нечетных циклах. Временной ход повторяемости GC бурь в четных и нечетных циклах существенно различается. В нечетных циклах повторяемость быстро растет и достигает максимума на +3-й год, в четных повторяемость растет медленно и достигает максимума на +5-й год. Наибольшие различия наблюдаются на фазе спада цикла (+1...+3-й гг. после максимума).

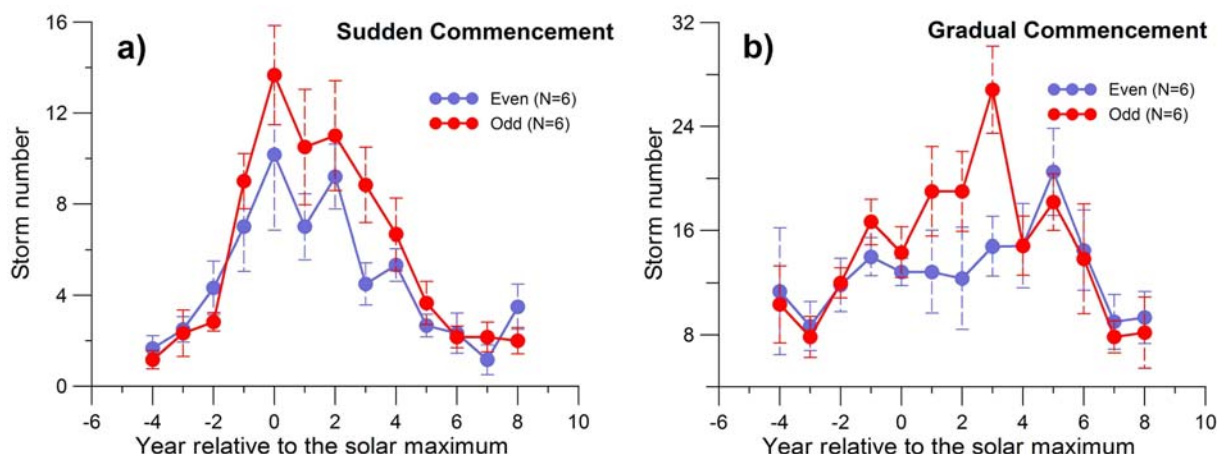


Рис. 1. Средняя (МНЭ) годовая повторяемость магнитных бурь (суммарное число умеренных, больших и очень больших бурь за год) с внезапным SC (а) и постепенным GC (б) началом в четных ($N = 6$) и нечетных ($N = 6$) солнечных циклах за период 1878–2015 гг. За нулевой год принят год максимума цикла. Вертикальными линиями показаны две стандартные ошибки среднего.

На рис. 2 приведены средние (МНЭ) значения для четных ($N = 6$) и нечетных ($N = 6$) циклов за период 1878–2015 гг. (циклы с 12–23-й), суммарного за год числа магнитных бурь (SC+GC), среднегодовых значений геомагнитного aa -индекса (после вычета тренда) и числа солнечных пятен SSN [7]. Видно, что все исследуемые характеристики, как правило, выше в нечетных циклах. Наиболее заметные различия повторяемости магнитных бурь и aa -индекса в четных и нечетных циклах наблюдаются на фазе спада, при этом максимальные и наиболее статистически значимые различия – на третий год после максимума цикла. Наибольшие различия числа солнечных пятен в четных и нечетных циклах наблюдаются в год максимума цикла и на следующий год.

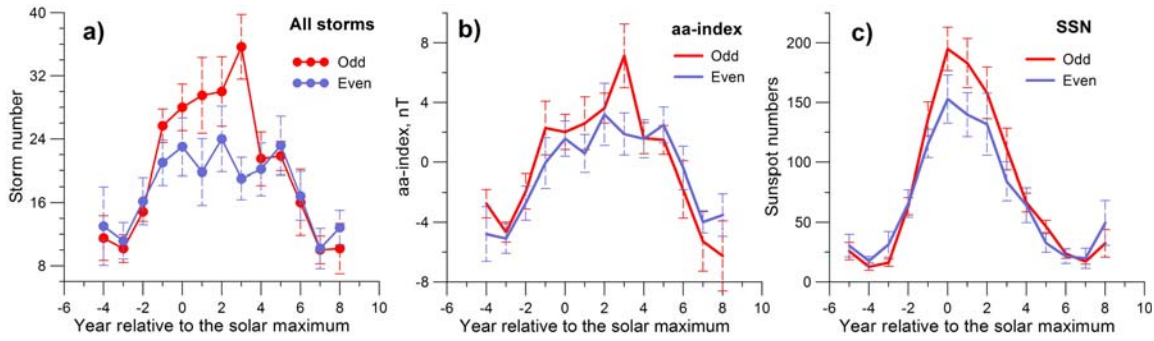


Рис. 2. Среднее (МНЭ) значения в четных и нечетных циклах: а) годовой повторяемости магнитных бурь (суммарное число умеренных, больших и очень больших SC и GC бурь); б) геомагнитного aa -индекса (после вычета тренда). в) чисел солнечных пятен SSN (v.2). Вертикальными линиями показаны две стандартные ошибки среднего.

Периодичности, близкие к циклу Хейла, хорошо видны в вариациях интенсивности потока космических лучей в стратосфере умеренных и высоких широт (рис. 3а) (по данным баллонных измерений ФИАН за 1957–2021 гг. [8]) и связаны с полярностью ОМП. Максимумы потока ГКЛ имеют куполообразную форму в четных циклах (при положительной полярности $A > 0$) и пикообразную форму – в нечетных циклах (при отрицательной полярности $A < 0$). Обращение ОМП происходит вблизи максимума цикла, в результате средние значения потоков ГКЛ на фазе спада четных циклов оказывается выше, чем в нечетных циклах (рис. 3б).

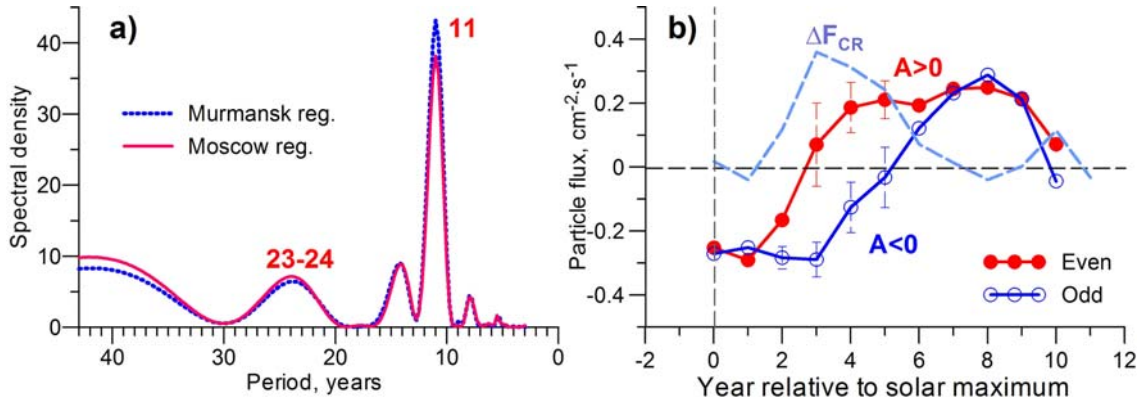


Рис. 3. а) Выборочные оценки нормированной спектральной плотности среднегодовых значений потока космических лучей в стратосфере Мурманской области (жесткость геомагнитного обрезания $R_c = 0.6$ ГВ) и Московской области (ст. Долгопрудный, $R_c = 2.4$ ГВ); б) средние (МНЭ) изменения потоков КЛ на ст. Долгопрудный в четных (20–24-й) и нечетных (19–23-й) циклах (после вычета линейного тренда) по данным [8]. Вертикальные линии показывают две стандартные ошибки среднего. Штриховая линия показывает разность между потоками КЛ в четных и нечетных циклах ΔF_{CR} .

Бидекадные колебания наблюдаются во многих климатических характеристиках, таких как повторяемость засух, ураганов над Атлантическим и Тихим океанами, изменения приземного давления и др. В частности, бидекадная вариация отчетливо видна в колебаниях широты основных траекто-

рий циклонов (шторм-треков) в Северной Атлантике (рис. 4а). Данные на рис. 4б показывают, что траектории циклонов заметно смещаются к северу (относительно вековой вариации) в четных циклах, при этом наибольшие отклонения наблюдаются на фазе спада цикла, также как и в исследуемых геофизических характеристиках.

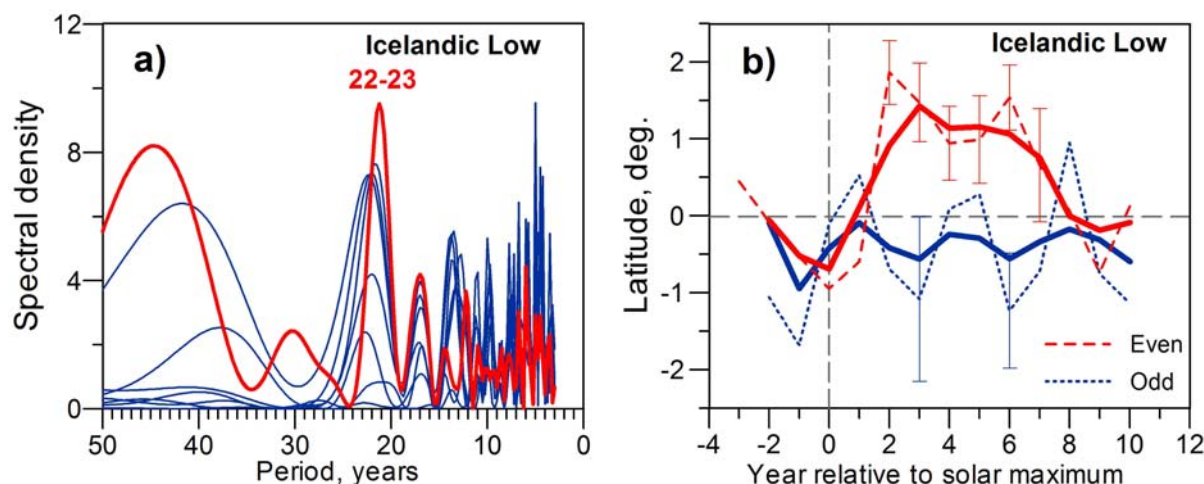


Рис. 4. а) Выборочные оценки нормированной спектральной плотности средней широты шторм-треков (холодное полугодие) в области Исландского минимума для исходного ряда (толстая красная линия) и его высокочастотных составляющих с параметрами “среза” $T_{\text{cut-off}} = 7, 11, 17, 23, 29, 37$ и 43 г. (тонкие линии); б) средние (МНЭ) отклонения широты шторм-треков от векового хода в области Исландского минимума в четных (штриховая линия, $N = 7$) и нечетных (точечная линия, $N = 6$) циклах за период 1873–2021 гг. Толстыми линиями показаны скользящие средние по 3-м годам. Вертикальные штриховые линии показывают две стандартные ошибки среднего.

В настоящее время вариации потоков заряженных космических частиц, вызывающих ионизацию атмосферы, рассматриваются как важный фактор влияния солнечной активности на атмосферные процессы. Таким образом, полученные результаты позволяют предположить, что бидекадные вариации, наблюдаемые в климатических характеристиках, обусловлены солнечным магнитным циклом Хейла, который способствует формированию бидекадных вариаций в потоках энергичных заряженных частиц, поступающих в атмосферу (галактических космических лучей и авроральных электронов, высыпающихся в ходе геомагнитных возмущений).

Литература

1. Hathaway D.H. // Living Rev. Sol. Phys., 2015, **12**, 4.
2. Nagovitsyn Yu.A., Nagovitsyna E.Yu., Makarova V.V. // Astron. Lett., 2009, **35**, 564-571.
3. Raspopov O.M., Dergachev V.A., Kolström T. // Sol. Phys., 2004, **224**, 455-463.
4. <http://www.izmiran.ru/magnetism/magobs/MagneticStormCatalog.html>
5. Канониди Х.Д. (ред.) Каталог геомагнитных бурь. Троицк: ИЗМИРАН, 2012.
6. Obridko V.N. et al. // Геомагн. аэрон., 2013, **53(2)**, 157-166.
7. Clette F., Lefevre L. // Solar Phys., 2016, **291**, 2629-2651.
8. Stozhkov Y.I. et al. // Adv. Space Res., 2009, **44**, 1124-1137.