Анализ изменения частоты появления геомагнитных возмущений с 1869 по 2021 гг.

В.А. Солдатов, С.Н. Соколов, СПбФ ИЗМИРАН, Vadim.A.Soldatov@gmail.com

Были выявлены и ранжированы геомагнитные возмущения за период 1869-2021 гг. по данным трехчасовых геомагнитных индексов aa. Возмущениями считались события с максимальными значениями индекса aa > 30 (Kpa > 3) и продолжительностью не менее шести часов.

Информация о внезапном начале бурь позволила разбить все выявленные события на возмущения с внезапным (S) и постепенным (G) началом. Полученные выборки этих событий использовались для анализа того, как частоты S- и G-бурь разных рангов менялись с изменением солнечной активности.

Мы проанализировали временные ряды годового числа как S-, так и G-бурь с помощью анализа сингулярного спектра (SSA). Метод основан на преобразовании одномерного временного ряда в многомерный с последующим применением к нему анализа главных компонент. Был выделен медленный тренд, описывающий общую тенденцию, и периодическая составляющая. При анализе методом SSA оказалось, что периодическая составляющая имеет период, примерно совпадающий с продолжительностью солнечного цикла; минимумы числа бурь наблюдаются на начале солнечных циклов, максимумы приходятся на соответствующие максимумы. Метод также позволяет прогнозировать временной ряд. Мы сделали формальный прогноз на следующие 20 лет для обоих типов бурь. В соответствии с прогнозом мы ожидаем, что максимумы S-бурь будут значительно меньше, чем в предыдущих циклах на протяжении многих лет. По мере поступления данных за 2022-23 год и далее прогноз может быть уточнен.

Введение

Наблюдения за вариациями геомагнитного поля в обсерваториях ведутся с середины XIX века и содержат косвенную информацию о космической погоде. Одним из ее проявлений являются геомагнитные бури — нерегулярные и большие по амплитуде изменения по сравнению с регулярными суточными вариациями поля. Такие возмущения длятся от нескольких часов до нескольких суток на записях средне- и низкоширотных обсерваторий.

Уровень возмущенности поля оценивается локальными индексами K (по шкале от 0 до 9), которые используются для расчета так называемых глобальных индексов: среднеширотных (Kp, ap, Kpa, aa) и низкоширотных (Dst) [http://isgi.unistra.fr/about_indices.php]. Индексы Kp и ap рассчитываются с 1932 г., Dst с 1957 г., Kpa и aa с 1868 г.

В некоторых обсерваториях имеются специально составленные каталоги бурь. Как правило, в эти локальные каталоги включались только достаточно заметные события со значениями K > ~5. Более мелкие возмущения, визуально трудно различимые на аналоговых магнитограммах, бурями не считались и в каталогах не учитывались. Соответственно, «глобальные» возмущения с Kp < ≈ 4÷5 также не считались бурями; этот уровень теперь определяется буквально как «возмущенное состояние», а уровень с Kp < 3+ — как «слабовозмущенное» или «спокойное». Так, по шкале NOAA уровень с Kp < 5 не считается возмущенным [http://www.geomag.bgs.ac.uk/education/ activitylevels.html; http://www.wdcb.ru/stp/data/storms/ Magnetic_storms/storms_3_obs_Introduction.pdf].

Для изучения связи между бурями и солнечной активностью используются как локальные каталоги бурь, так и каталоги, созданные по данным индексов ap, aa и Dst [Yermolaev et al., 2009; Echer et al., 2011; Обридко и др., 2013; Куражковская, 2020; Veretenenko et al., 2020; Hajra et al., 2021; Reyes et al., 2021; Qiu et al., 2022].

Выборка возмущений, созданная по данным индексов aa, использовалась в [Sokolov et al., 2020] для изучения повторяемости бурь 1869-1954 гг. Здесь мы продолжаем эту работу, продлевая временной ряд до конца 2021 года. Использование индекса aa позволяет получить самый длинный временной ряд и однородную выборку событий на основе одного и того же индекса.

Информация о внезапных началах бурь позволяет разделить возмущения на события с внезапным и постепенным началом. Это давно известное (например, [Maunder, 1904]) эмпирическое деление теперь можно считать вполне оправданным. Оказалось, что большинство бурь возникает в основном под влиянием двух типов возмущенного солнечного ветра на магнитосферу, распространяющегося из разных областей на Солнце. Считается, что бури первого типа являются результатом выбросов солнечной корональной массы из активных областей, локализованных в фотосфере вблизи солнечных пятен, а бури второго типа — результатом высокоскоростных потоков солнечного ветра из областей корональных дыр [Gonzales et al., 1994, 1999; Tsurutani et al., 2006; Yermolaev et al., 2009; Richardson & Cane, 2012]. Важно, что бури первого типа в большинстве случаев имеют внезапное начало, а бури второго типа — постепенное [Borovsky & Denton, 2006]. Этот факт был использован в [Sokolov et al., 2020] и в данной работе: выборки бурь с внезапным и постепенным началом рассматриваются отдельно.

Источники данных. Выделение возмущенных периодов

Мы использовали данные о годовом количестве солнечных пятен SSN (версия V2.0) [https://wwwbis.sidc.be/silso/], индексах aa [http://isgi.unistra.fr/indices_aa.php, http://www.geomag.bgs.ac.uk] и внезапных началах бурь [http://www.obsebre.es/en/rapid#ssc, https://kp.gfz-potsdam.de/en/figures/bartels-music]. Периоды возмущений определялись визуально по таблицам индексов aa по методике, использованной в [Sokolov et al., 2020]. Каждому событию с амплитудой aa > 30 и длительностью, превышающей трехчасовой интервал, присваивался ранг от 1 до 6.

В зависимости от типа начала (внезапное или постепенное), каждое возмущение учитывалось как буря с внезапным (S-буря) или постепенным началом (G-буря). Время начала каждой бури S считалось временем внезапного начала, а временем начала каждой бури G - первый трехчасовой интервал, в течение которого индекс aa начинал превышать значение aa = 30. За время окончания бури принимался трехчасовой интервал, в течение которого показатель aa становился меньше этого значения. Учитывалось, что возмущенные периоды могут иметь

внутри себя более спокойные (aa < 30) интервалы продолжительностью до ≈ 18 часов [Шевнин, 2004]. Следующие друг за другом бури считались отдельными, если время между окончанием первой и началом второй составляло не менее суток, а также в случаях, когда S-бури начинались поверх предыдущих, еще не завершившихся. Также мы постарались учесть возможность наложения возмущений во времени, хотя в ряде случаев бывает сложно отделить их друг от друга и определить время их начала и/или окончания, как и в случае визуального анализа аналоговых магнитограмм. [Шевнин, 2004; Sokolov et al., 2020]. Однако для анализа некоторых из этих «сложных» событий визуальный анализ магнитограмм [http://db.izmiran.nw.ru/magnetograms/; http://www.bgs.ac.uk/data/Magnetograms/home.html; https://www.kakioka-jma.go.jp/en/index.html] был полезен. Рассмотрим некоторые результаты, полученные в данной работе.

Статистика распределения количества бурь по рангам

Для выборок 1869-2021 и 1955-2021 гг. показаны распределения годового числа S- и G-бурь в зависимости от их ранга (рис. 1).

В 1869-2021 гг. на S-бури приходился 31 %, а на G-бури — 69 % всех возмущений. Из общего числа S-бурь слабые возмущения рангов S1 и S2 составили 50 %, бури рангов S3 и S4 — 29 % и 10 % соответственно, а сильнейшие бури рангов S5 и S6 — 6 % от числа всех бурь S. Из общего числа бурь G слабые события G1 и G2 составили 86 %, бури ранга G3 — 12 %, бури ранга G4 — 1,5 %, G5 и G6 — 0,2 %. В 1955-2021 гг. количество всех событий составляло 32 % S-бурь и 68 % G-бурь. Возмущения рангов S1 и S2 составили 48%, S3 и S4 — 33% и 13%, S5 и S6 — 5% от числа всех S-бурь. Из общего числа G-бурь возмущения G1 и G2 составили 84 %, G3 — 14 %, G4 — 2 %, G5 и G6 — 0,01 %.

Таким образом, отношения числа всех S-бурь и всех G-бурь, а также относительных чисел бурь разного ранга в 1955-2021 и 1869-2021 гг., так же как и за период 1869-1954 гг. [Sokolov et al., 2020] близки друг к другу.

Анализ временных рядов

Мы проанализировали временные ряды годового количества бурь как S, так и G с помощью анализа сингулярного спектра (SSA) [Ghil et al., 2002; Голяндина, 2004]. Метод основан на преобразовании одномерного временного ряда в многомерный с последующим применением анализа главных компонент.

Мы выделили медленный тренд, характеризующий общую тенденцию, и периодическую составляющую (рис. 2-3). Оказалось, что периодическая составляющая имеет период, примерно совпадающий с продолжительностью 11-летних циклов пятен Швабе. Минимумы числа бурь наблюдаются в минимумах этих циклов, максимумы — в соответствующих максимумах числа солнечных пятен.

Метод SSA также позволяет прогнозировать временной ряд количества бурь. Мы сделали формальный прогноз общего количества бурь обоих типов на ближайшие 20 лет. Из рис. 4-5 видно, что по прогнозу максимумы числа всех S-бурь ожидаются значительно меньшими по своей величине, чем в предыдущих циклах. Прогноз может быть обновлен по мере поступления новых данных о бурях за 2022 год и далее.

References

1. Куражковская Н.А. Глобальная возмущенность магнитосферы Земли и ее связь с космической погодой // Солнечно-земная физика. Т. 6. № 1. С. 51-62. doi: 10.12737/szf-61202005. 2020
2. Обридко В.Н., Канониди Х.Д., Митрофанова Т.А., Шельтинг Б.Д. Солнечная активность и геомагнитные возмущения // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 2. С. 157-166. doi: 10.7868/S0016794013010148. 2013
3. Шевнин А.Д. Анализ сводных каталогов магнитных бурь (1938-1958 гг.) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 5. С. 597-600. 2004
4. Borovsky J.E., Denton M.H. Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms // J. Geophys. Res. V.111. A07S08. doi: 10.1029/2005JA011447. 2006
5. Echer E., Gonzalez W.D., Tsurutani B.T. Statistical studies of geomagnetic storms with peak Dst ≤ -50 nT from 1957 to 2008 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V.78. 11-12. 1454-1459. doi: 10.10916/j.jastp.2011.04.021. 2011
6. Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., Kroehl H.W., Rostoker G., Tsurutani B.T.,Vasyliunas V. M. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res. V. 99. No. A4. P. 577-5792. doi: 10.1029/93JA02867. 1994
7. Gonzalez W.D., Tsurutani B.T. Clúa de Gonzalez A.L. Interplanetary origin of geomagnetic storms // Space Science Reviews. V. 88. P. 529--562. doi: 10.1023/A:1005160129098. 1999
8. Hajra R., Souza A., Echer E., Bolzan M. Long-term variations of the geomagnetic activity: a comparison between the strong and weak solar activity cycles and implications for the space climate // J. Geophys. Res. Space Physics. V.126. e2020JA028695. doi: 10.1029/2020JA028695. 2021
9. Maunder E.W. Magnetic Disturbances, 1882 to 1903, as recorded at the Royal Observatory, Greenwich, and their Association with Sun-spots // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. V. 65. Issue 1. P. 2-18. doi: 10.1093/mnras/65.1.2. 1904
10. Qiu S., Zhang Z., Yousof H., Soon W., Jia M., Tang W., Dou X. The interplanetary origins of geomagnetic storm with Dst min ≤ -50 nT during solar cycle 24 (2009-2019) // Advances in Space Research. V.70. Issue 7. P. 2047-2057. doi: 10.1016/j.asr.2022.06.025. 2022
11. Reyes P.I., Pinto V.A., Moya P.S. Geomagnetic storm occurrence and their relation with solar cycle phases // Space Weather. V. 19. Issue 9. doi: 10.1029/2021sw002766. 2021
12. Richardson I.G., Cane H.V. Solar wind drivers of geomagnetic storms during more than four solar cycles // J. Space Weather and Space Climate. V. 2. A001. doi: 10.1051/swsc/2012001. 2012
13. Sokolov S., Soldatov V., Koshelevsky V. Geomagnetic Disturbances with Sudden and Gradual Commencements in 1869-1954 According to Observatory Data and Catalogs of Storms. In: Yanovskaya T., Kosterov A., Bobrov N., Divin A., Saraev A., Zolotova N. (eds) Problems of Geocosmos-2018. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-030-21788-4_29. 2020
14. Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C., et al. Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review // J. Geophys. Res. V. 111. A07S01. doi: 10.1029/2005JA011273. 2006
15. Veretenenko S., Ogurtsov M., Obridko V. Long-term variability in occurrence frequencies of magnetic storms with sudden and gradual commencements // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 60. No. 10. P. 1047-1056. V. 205(7): 105295. doi: 10.1016/j.jastp.2020.105295. 2020
16. Yermolaev Yu.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Yu. Catalog of Large Scale

Solar Wind Phenomena during 1976-2000 // Cosmic Research. V. 47. No. 2. P. 99-113. doi: 10.1134/S0010952509020014. 2009

17. Ghil, M., R. M. Allen, M. D. Dettinger, K. Ide, D. Kondrashov, et al. (2002) ``Advanced spectral methods for climatic time series'', Rev. Geophys. 40(1), 3.1-3.41.
18. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов: Учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. 76 с.

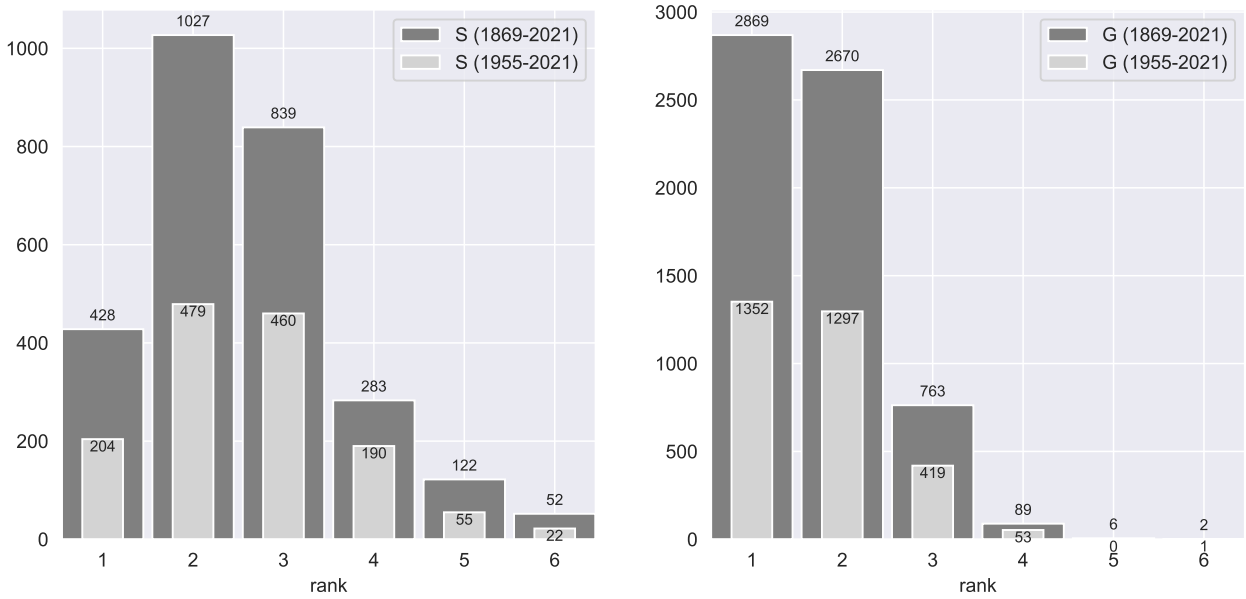

Рис. 1: Распределения годового числа S- и G-бурь в зависимости от ранга

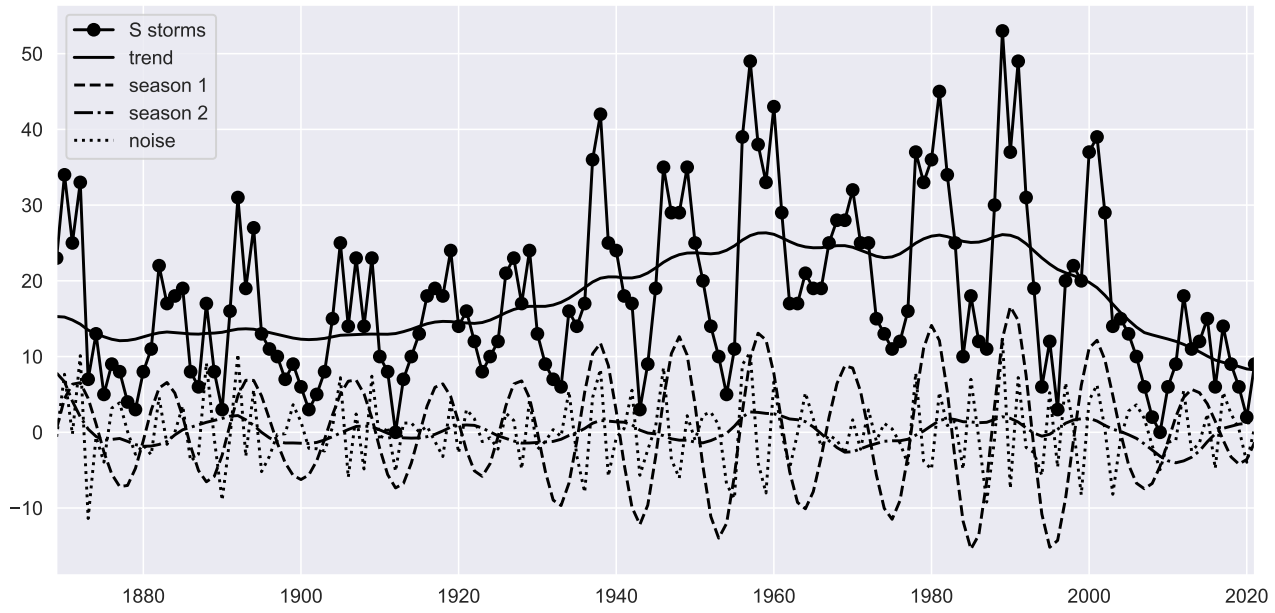

Рис. 2: Анализ временного ряда годового количества S-бурь

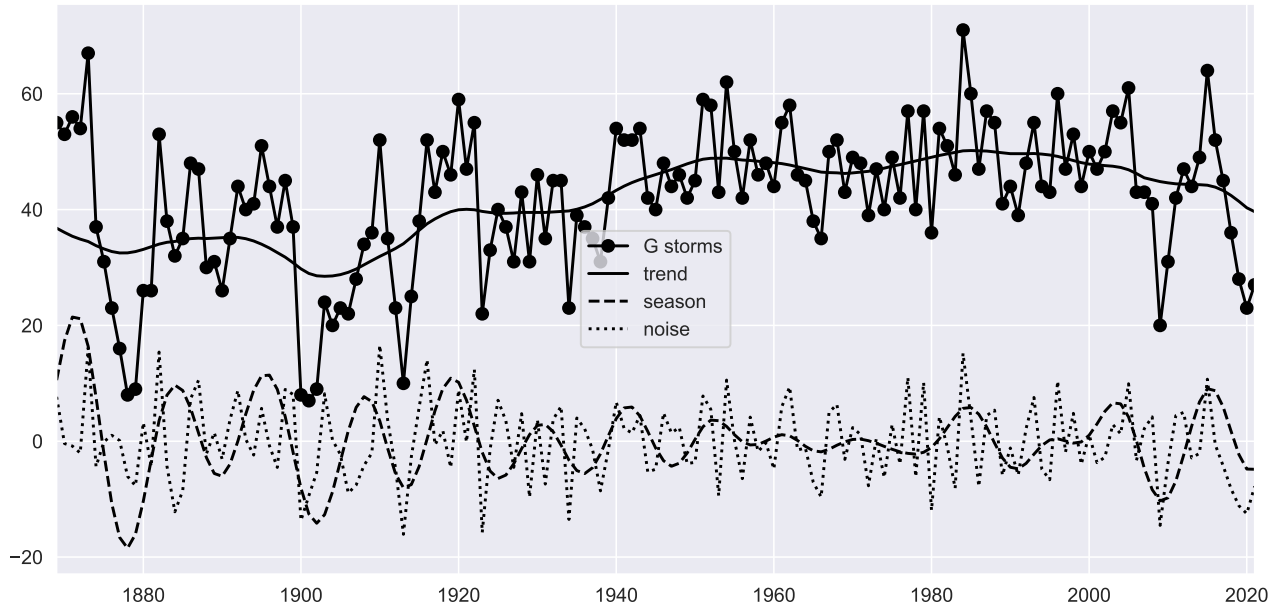

Рис. 3: Анализ временного ряда годового количества G-бурь

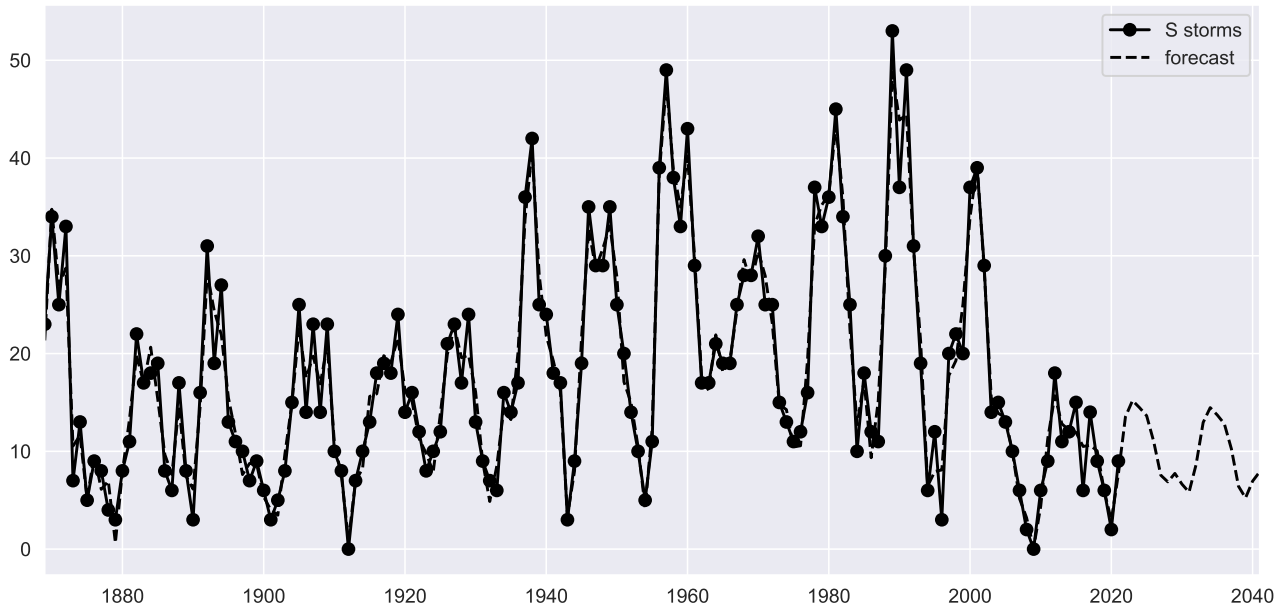

Рис. 4: Прогноз годового количества S-бурь

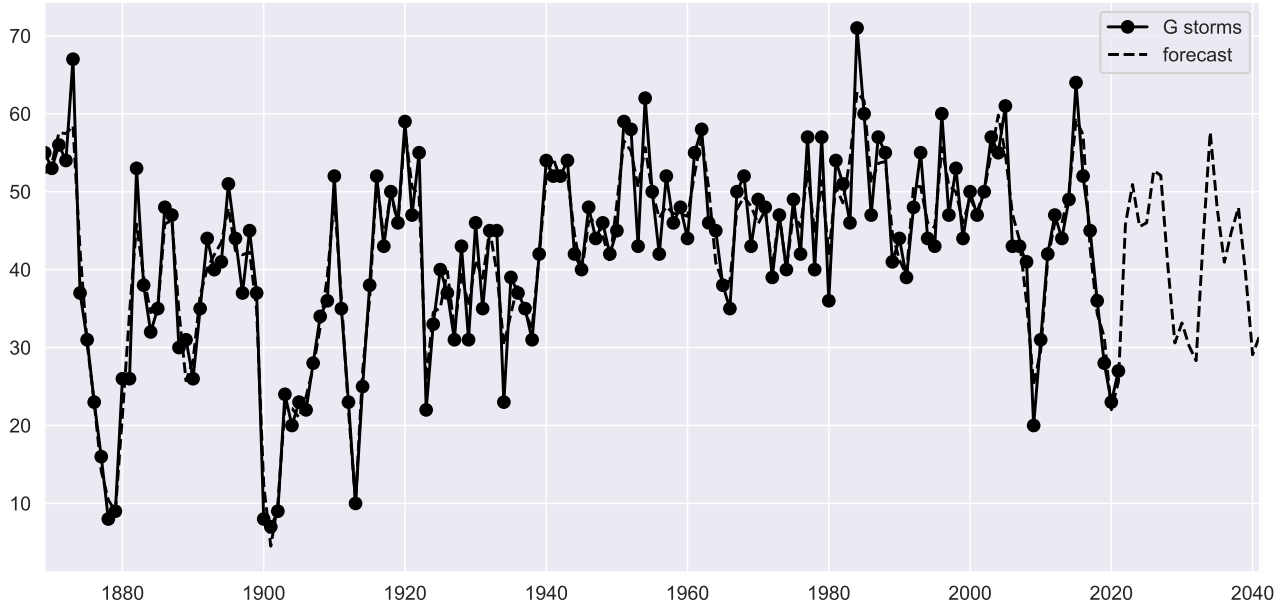

Рис. 5: Прогноз годового количества G-бурь