

УДК 551.510.536

## АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ 06.09.2017 ПО ЕЁ ГЕОМАГНИТНЫМ ПРЕДВЕСТНИКАМ

*Н. А. Бархатов<sup>1</sup>, С. Е. Ревунов<sup>1\*</sup>, О. М. Бархатова<sup>2</sup>, Е. А. Ревунова<sup>2</sup>, Н. В. Косолатова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина;

<sup>2</sup> Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород, Россия

Эффективность разработанного ранее алгоритма прогноза экстремальных солнечных вспышек по их геомагнитным предвестникам проверена на примере серии вспышек класса X, зарегистрированных 06.09.2017. В последние несколько лет эти события солнечной вспышечной активности рассматриваются как наиболее интенсивные. Алгоритм заключается в сопоставлении суммарных гистограмм нормированного количества моментов синхронизации колебаний длиннопериодных пульсаций горизонтальной составляющей геомагнитного поля с событиями экстремальных солнечных вспышек в предшествующие им интервалы. Результатом работы алгоритма являются обнаруживаемые за несколько суток до развития интенсивных вспышек на Солнце экстремумы гистограмм, которые можно рассматривать как маркеры ожидаемой экстремальной вспышечной активности. Выполненное исследование подтверждает возможность использования ранее предложенного алгоритма для краткосрочного прогноза солнечной вспышечной активности.

### ВВЕДЕНИЕ

Разработка алгоритма прогноза экстремальных солнечных вспышек по их геомагнитным предвестникам [1], который оказался успешным для краткосрочного прогноза солнечной вспышечной активности, была стимулирована исследованиями [2, 3], продемонстрировавшими связь длиннопериодных геомагнитных пульсаций с возникновением солнечных вспышек за несколько дней до этих пульсаций. В последующих работах [4, 5] подтверждены результаты ранее проведенных исследований по установлению эффекта возрастания длиннопериодных пульсаций Н-компоненты магнитного поля Земли на временном интервале за 1÷2 суток до мощных солнечных вспышек. Анализ работ, посвященных изучению длиннопериодных флуктуаций геомагнитного поля, предшествующих крупным солнечным вспышкам, позволил сделать вывод о реальности создания метода краткосрочного прогноза солнечной вспышечной активности [6]. В 2013 году авторы работы [6] получили патент [7].

Наше исследование [1] выполнено на материале, включающем экспериментальные данные по 20 экстремальным рентгеновским вспышкам мощности X ( $W > 10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup>) с помощью отличного от [7] оригинального метода, основанного на постобработке результатов вейвлет-анализа геомагнитных пульсаций разных масштабов в течение пятидневного интервала, предшествующего каждой вспышке. Основными критериями отбора анализируемых событий были: 1) все анализируемые вспышки относились к экстремальному классу; 2) в течение пятидневного интервала наблюдений отсутствовали геомагнитные возмущения типа бурь ( $|D_{st}| < 100$  нТл), удовлетворяющих на этом интервале причинно-следственным связям с такими вспышками. Особенностью нашей работы с экспериментальными данными является постобработка получаемых вейвлет-спектров с применением базового вейвлета Добеши 4-го порядка с целью расчёта вейвлет-скелетонов [9]. Как известно, вейвлет-скелетоны отражают локальные максимумы спектра. После такой обработки спектральные картины в виде набора скелетонов содержат уже только ключевые особенности

\* revunov@inbox.ru

изучаемых возмущений. Подобный подход позволяет устранить неопределённость при интерпретации получаемых результатов и перейти от качественных к количественным выводам [9–15]. Эти выводы позволяют использовать факты синхронизации вычисленных вейвлет-скелетонов в качестве предвестников возникновения мощных солнечных вспышек.

В данном исследовании демонстрируются применение и проверка адекватности разработанного нами алгоритма [1] на примере самой крупной за последние несколько лет солнечной вспышки в сентябре 2017 года. Всего в период с 04.09.2017 до 06.09.2017 было зарегистрировано 19 вспышек класса С (слабые) и М (средние). По данным лаборатории рентгеновской астрономии Солнца Физического института им. Лебедева РАН вспышке 06.09.2017 был присвоен балл X9.3. Этой вспышке приблизительно за 3 ч до неё предшествовала более слабая вспышка класса X2.2. Считается, что к наблюдаемому мощному радиоизлучению привело взаимодействие двух крупнейших групп пятен, которые наблюдались на Солнце в течение нескольких дней до анализируемой вспышки. Кроме того, особенностью данной мощной вспышки является то, что она произошла на фоне минимальной солнечной активности и были выполнены условия отсутствия геомагнитных возмущений типа бурь [16]. Исследуемое в работе событие, ввиду его уникальности, продолжают изучать международные научные группы ещё и потому, что с ним связывают рекордный выброс коронального вещества. Одна из последних работ [17] выполнена с применением новой гелиосферной модели «European heliospheric forecasting information asset» (EUFORIA) [17].

## 1. ДЕМОСТРАЦИЯ РАБОТЫ АЛГОРИТМА НА ПРИМЕРЕ СОБЫТИЯ 06.09.2017

Подробное описание разработанного нами алгоритма прогноза экстремальных солнечных вспышек по их геомагнитным предвестникам содержится в работе [1]. В ней показано, что в конкретные моменты времени имеет место согласованность получаемых наборов вейвлет-скелетонов для горизонтальной составляющей геомагнитного поля на значительном географическом пространстве. Это свидетельствует об установлении общего магнитосферно-ионосферного гармонического режима на разных магнитных обсерваториях, заключающегося в синхронизации геомагнитных колебаний. Установление такого согласованного колебательного режима возможно при усилении геомагнитных колебаний, связанном с изменением ионосферной проводимости под действием внешних факторов в виде ультрафиолетового или рентгеновского солнечного излучения.

Реализация разработанного алгоритма для изучаемого в данной работе случая начата с сопоставления геомагнитных данных на выбранных станциях. Для этого выполнена постобработка вейвлет-спектров горизонтальной компоненты геомагнитного поля, получаемых с применением базового вейвлета Добеши 4-го порядка, с целью расчёта вейвлет-скелетонов. На рис. 1 и 2 представлен набор скелетонов как зависимость периодов колебаний  $T$  от времени  $t$  для периодов колебаний  $15 \div 30$  и  $50 \div 60$  мин для анализируемых станций в интервале 00:00 UT 02.09.2017–23:59 UT 06.09.2017 с демонстрацией моментов синхронизации колебательных режимов для рассматриваемой серии вспышек класса X для геомагнитных станций Leirvogur (LRV,  $64,21^\circ$  с. ш.,  $65,45^\circ$  в. д.), Memambetsu (MMB,  $37,24^\circ$  с. ш.,  $216,91^\circ$  в. д.), Kakioka (KAK,  $29,43^\circ$  с. ш.,  $213,17^\circ$  в. д.), Hatisyo (HTY,  $26,18^\circ$  с. ш.,  $212,71^\circ$  в. д.), Kanoya (KNY,  $24,95^\circ$  с. ш.,  $204,18^\circ$  в. д.).

Представленные на рис. 1 и 2 матричные данные с единичными (точки скелетонов) и нулевыми (пустое пространство) элементами показывают результат работы первого этапа алгоритма сравнительного анализа вейвлет-скелетонов, в процессе которого обрабатываются минутные записи горизонтальной компоненты геомагнитного поля в обсерваториях за интервал около 5 суток до первой вспышки класса X. Далее, на втором этапе алгоритма, выполняется операция постолбцового вычитания всех матриц друг из друга с записью значений разности по модулю, а на вре-

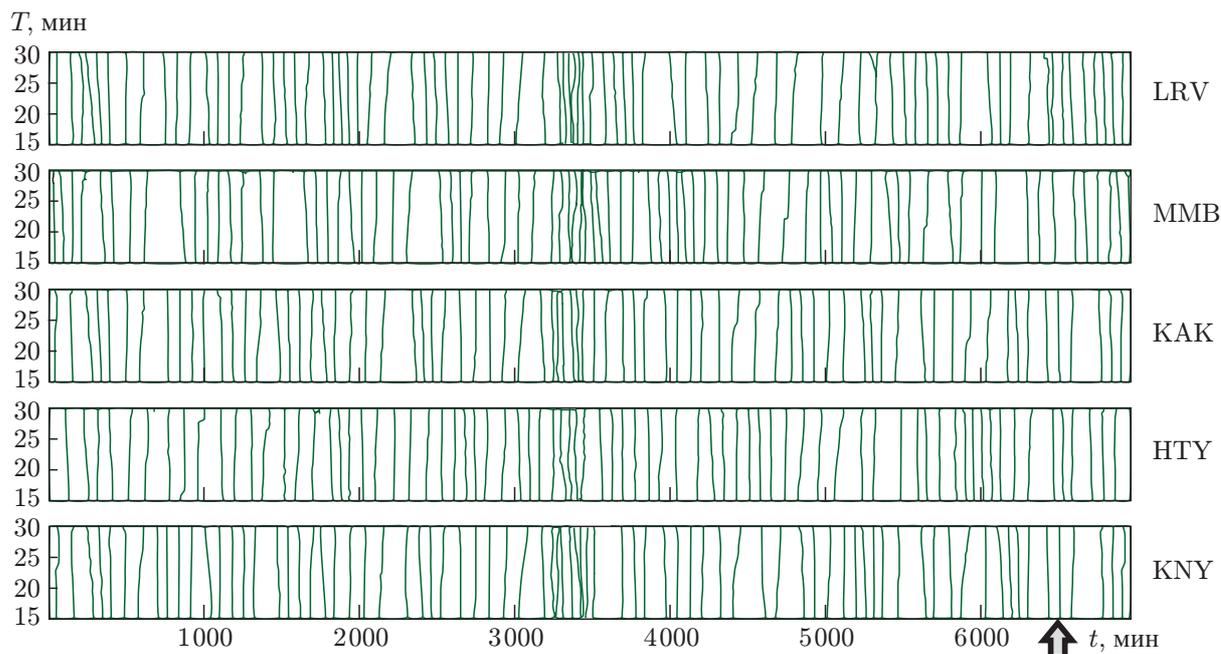


Рис. 1. Демонстрация набора скелетов для периодов колебаний 15÷30 мин для анализируемых станций за интервал времени 00:00 UT 02.09.2017–23:59 UT 06.09.2017. Момент регистрации экстремальной всплещечной активности отмечен стрелкой и соответствует 09:10 UT 06.09.2017

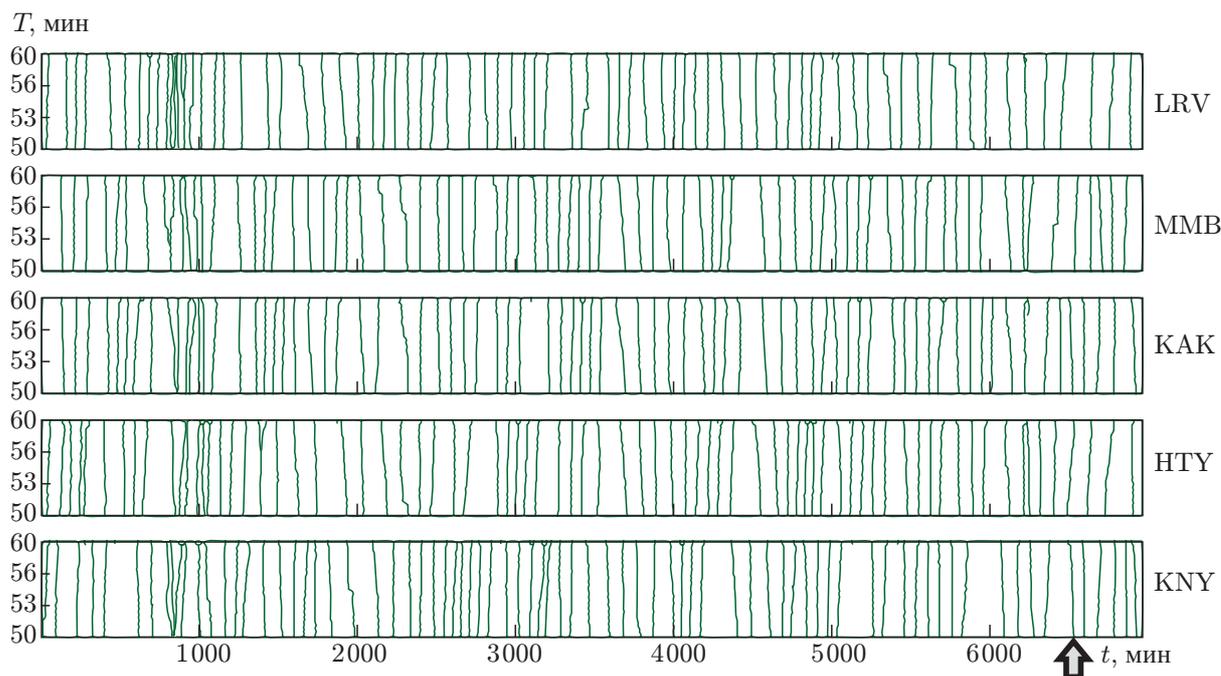


Рис. 2. Демонстрация набора скелетов для периодов колебаний 50÷60 мин для анализируемых станций за интервал времени 00:00 UT 02.09.2017–23:59 UT 06.09.2017. Момент регистрации экстремальной всплещечной активности отмечен стрелкой и соответствует 09:10 UT 06.09.2017

менной шкале с точностью до минуты маркируются моменты, соответствующие синхронизации колебаний горизонтальной компоненты геомагнитного поля во всех анализируемых обсерваториях. Обработка гауссовым фильтром с высокой контрастностью полученной на предыдущем этапе

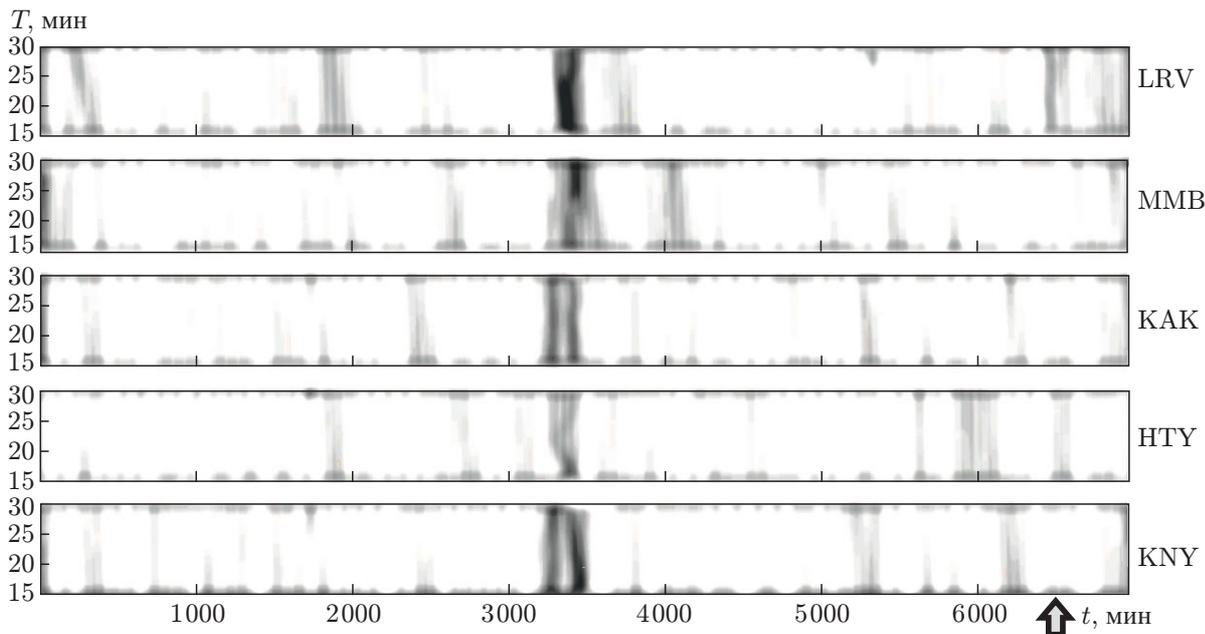


Рис. 3. Демонстрация результата обработки набора скелетонов гауссовым фильтром с высокой контрастностью для периодов колебаний 15÷30 мин для анализируемых станций за интервал времени 00:00 UT 02.09.2017–23:59 UT 06.09.2017. Момент регистрации экстремальной вспыхивающей активности отмечен стрелкой и соответствует 09:10 UT 06.09.2017

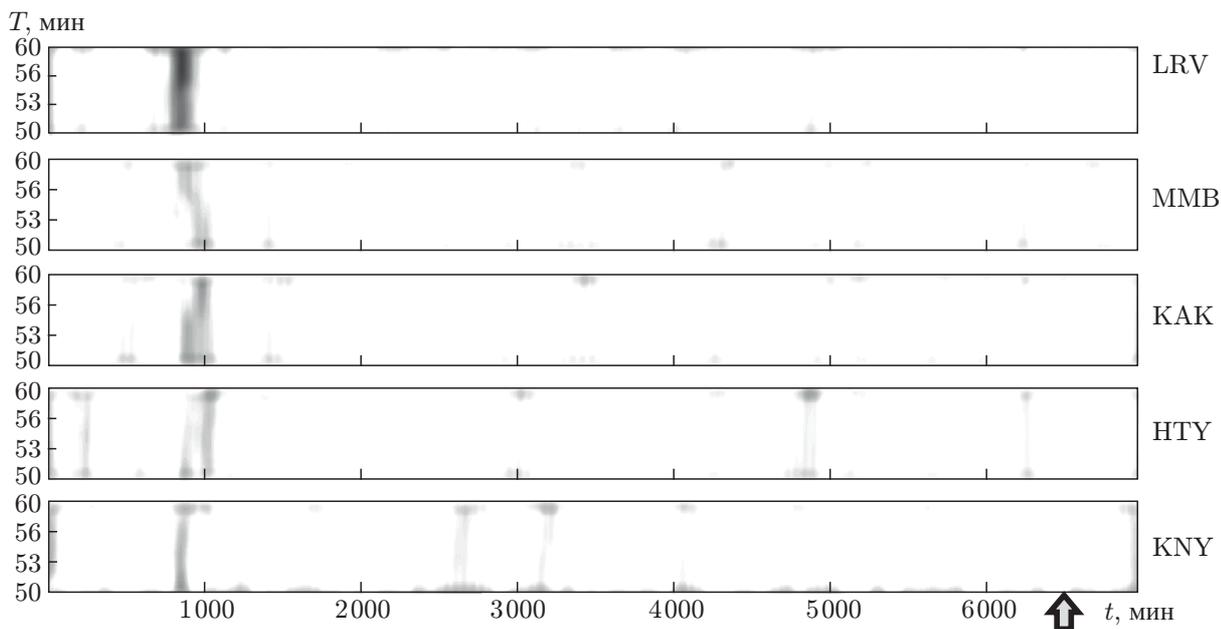


Рис. 4. Демонстрация результата обработки набора скелетонов гауссовым фильтром с высокой контрастностью для периодов колебаний 50÷60 мин для анализируемых станций за интервал времени 00:00 UT 02.09.2017–23:59 UT 06.09.2017. Момент регистрации экстремальной вспыхивающей активности отмечен стрелкой и соответствует 09:10 UT 06.09.2017

картины позволяет выделить значимые моменты согласования колебаний на временной шкале. Результат последней операции для изучаемого в данном исследовании интервала демонстрируется на рис. 3 и 4.

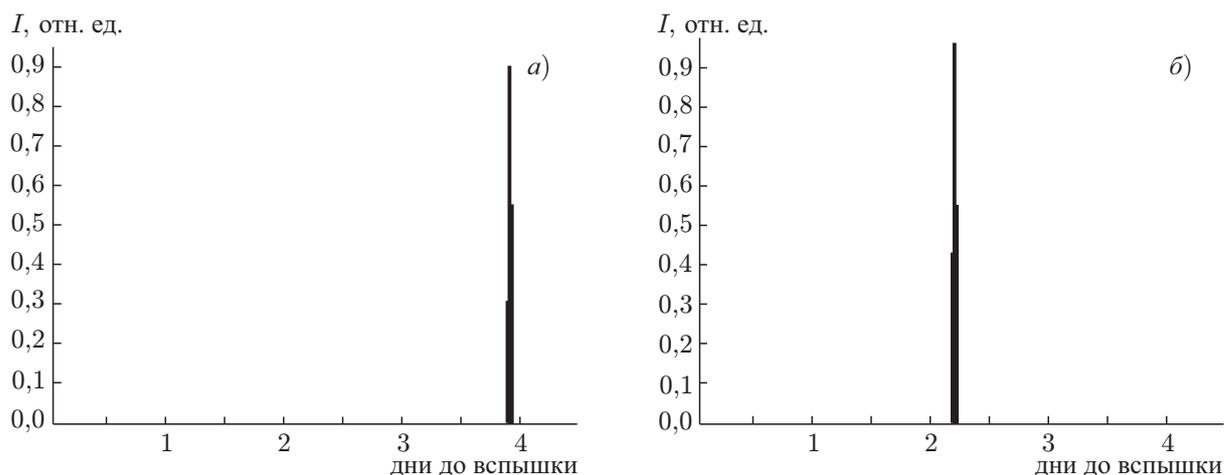


Рис. 5. Суммарные гистограммы нормированного количества моментов синхронизации колебаний на всех анализируемых геомагнитных станциях для вспышек класса X, зарегистрированных 06.09.2017. Обнаружен предвестник события примерно за 4 дня (колебания с периодами  $50 \div 60$  мин, *а*) и за 2 дня (колебания с периодами  $15 \div 30$  мин, *б*)

Нетрудно видеть, что на рис. 3 и 4 появились затенённые области, демонстрирующие синхронизацию колебательных режимов для всех обсерваторий на соответствующих периодах. Видно, что для колебаний с периодами  $15 \div 30$  мин моменты синхронизации наиболее часто имеют место в интервале  $3\,300 \div 3\,400$  мин, что соответствует  $08:00\text{--}09:00$  UT 04.09.2017. Для колебаний с периодами  $50 \div 60$  мин основной вклад наблюдается в интервале  $900 \div 1\,000$  мин, что соответствует  $15:00\text{--}16:00$  UT 02.09.2017.

## 2. ОБНАРУЖЕНИЕ ПРЕДВЕСТНИКОВ ВСПЫШЕК 06.09.2017

Использование разработанного алгоритма для изучаемой вспышки для получения количественного результата завершим построением суммарных гистограмм нормированного количества моментов синхронизации колебаний на всех анализируемых геомагнитных станциях. При этом для оценки времени появления предвестника вспышечной активности выполняется усреднение минутных данных и демонстрация экстремумов гистограмм с суточным разрешением. Результаты этой обработки приведены на рис. 5, где показано распределение интенсивности  $I$  группировок моментов 100-процентной синхронизации колебаний.

Экстремумы суммарных гистограмм нормированного количества моментов синхронизации колебаний горизонтальной компоненты геомагнитного поля, представленные на рис. 5, демонстрируют связь с опережающими явлениями рентгеновских вспышек. Ранее, в исследовании [1], было отмечено, что суммарные гистограммы низкочастотных геомагнитных колебаний для периодов  $28 \div 38$  и  $68 \div 88$  мин имеют заметные экстремумы приблизительно за 2 и 4 дня до вспышки. Для последовательности экстремальных солнечных вспышек 06.09.2017 полученный ранее вывод подтвердился. Показано, что алгоритм обнаружил предвестники экстремального вспышечного события примерно за 4 дня ( $15:00\text{--}16:00$  UT 02.09.2017) для колебаний с периодами  $50 \div 60$  мин и за 2 дня ( $08:00\text{--}09:00$  UT 04.09.2017) для колебаний с периодами  $15 \div 30$  мин. При этом попадающие в исследуемый интервал предвестники вспышек классов C и M не обнаруживаются. Заметим, что обнаруженные в гистограммах уединённые экстремумы соответствуют предвестникам двух последовательных вспышек X2.2 и X9.3, разделённых 3-часовым интервалом. Действительно, разрешающая способность предлагаемого алгоритма, ограниченная суточным усреднением,

не позволяет однозначно ответить на вопрос, какой конкретно вспышке соответствуют найденные экстремумы.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрирована эффективность созданного нами ранее в [1] алгоритма для обнаружения экстремальных солнечных вспышек по их геомагнитным предвестникам на примере события солнечной вспышечной активности, зарегистрированного 06.09.2017. Согласно предложенной методике, для каждого анализируемого масштаба колебаний были построены гистограммы распределения интенсивности группировок моментов 100-процентной синхронизации регистрируемых колебаний на магнитных обсерваториях, расположенных в широких географических пределах. В процессе работы алгоритма обнаружены экстремумы в полученных гистограммах для синхронизации колебаний с периодами  $50 \div 60$  мин примерно за 4 дня до вспышечной активности и за 2 дня для синхронизации колебаний с периодами  $15 \div 30$  мин. Таким образом, возможность использования предложенного нами ранее алгоритма для краткосрочного прогноза солнечной вспышечной активности подтверждена на конкретном примере. Вычисляемые по данной методике экстремумы гистограмм можно рассматривать как маркеры назревающего вспышечного процесса на Солнце.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта 18-35-00430 (Бархатова О. М., Ревунова Е. А., Косолапова Н. В.).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бархатов Н. А., Обридко В. Н., Ревунов С. Е. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 2. С. 265.
2. Быстров М. В., Кобрин М. М., Снегирев С. Д. // Письма в астрономический журнал. 1978. № 4. С. 143.
3. Обридко В. Н., Шельтинг Б. Д. // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т. 25, № 6. С. 881.
4. Снегирев С. Д., Фридман В. М., Шейнер О. А. // Солнечно-земная физика. 2005. № 8. С. 27.
5. Снегирев С. Д., Смирнова А. С., Шейнер О. А. // Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Год астрономии: Солнечная и солнечно-земная физика – 2009». Санкт-Петербург, Пулковское, 5–11 июля 2009 года. ГАО РАН. С. 401.
6. Снегирев С. Д., Смирнова А. С., Шейнер О. А. // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Сер. Радиофизика. 2011. № 5–3. С. 152.
7. Пат. 2491583, МПК G01W1/10. Способ прогноза геоэффективных солнечных вспышек / С. Д. Снегирев, О. А. Шейнер, А. С. Смирнова. Заявл. 17.02.2012; опубл. 27.08.2013. Бюл. № 24. 10 с.
8. <http://vso.nso.edu/cgi/catalogui>.
9. Бархатов Н. А., Ревунов С. Е., Виноградов А. Б. // Вестник Мининского университета. 2014. № 3 (7). С. 25.
10. Бархатов Н. А., Ревунов С. Е., Воробьев В. Г., Ягодкина О. И. // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. Т. 58, № 2. С. 155.
11. Бархатова О. М., Косолапова Н. В., Бархатов Н. А., Ревунов С. Е. // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 4. С. 63.
12. Nagovitsyn Yu. A., Nagovitsyna E. Yu. // Geomagnetism and Aeronomy. 2017. V. 57, No. 8. P. 921.

13. Gelfreikh G., Nagovitsyn Yu., Nagovitsyna E. // Publ. Astron. Soc. Japan. 2006. V. 58, No. 1. P. 29.
14. Wawrzaszek A., Macek W. M. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. Art. no. A07104.
15. Tessein J. A., Smith C. W., Vasquez B. J., Skoug R. M. // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. Art. no. A10104.
16. [https://tesis.lebedev.ru/sun\\_flares.html?m=9&d=6&y=2017](https://tesis.lebedev.ru/sun_flares.html?m=9&d=6&y=2017).
17. <https://arxiv.org/abs/1911.10817>.
18. Jens Pomoell, Poedts S. // J. Space Weather Space Clim. 2018. V. 8, Art. no. A35.

Поступила в редакцию 2 июля 2019 г.; принята в печать 30 октября 2019 г.

### ALGORITHM FOR DETECTING AN EXTREME SOLAR FLARE OF SEPTEMBER 6, 2017 FROM ITS GEOMAGNETIC PRECURSORS

*N. A. Barkhatov, S. E. Revunov, O. M. Barkhatova, E. A. Revunova, and N. V. Kosolapova*

The efficiency of the previously developed algorithm for predicting extreme solar flares from their geomagnetic precursors has been tested on the example of a series of class X flares recorded on September 6, 2017. Over the past few years, these events of the solar flare activity are seen as the most intense. The algorithm consists in comparing the total histograms of the normalized number of synchronization moments for oscillations of long-period pulsations in the horizontal component of the geomagnetic field with extreme solar flare events in the intervals preceding them. The result of the algorithm is that extrema of histograms were detected a few days before the development of intense solar flares and can be considered as markers of the expected extreme flare activity. The study confirms the possibility of using the previously proposed algorithm for a short-term forecast of solar flare activity.