РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



$^{(19)}$ RU $^{(11)}$ 2 485 557 $^{(13)}$ C1

(51) МПК *G01W 1/10* (2006.01)

RU 2485557 C1

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Вячеслав Анатольевич (RU), в Юрий Павлович (RU)
2 Topini Hubbiobi I (100)
ообладатель(и):
Вячеслав Анатольевич (RU), в Юрий Павлович (RU)

(54) НАУКАСТИНГ ПОЯВЛЕНИЯ ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ ПРОТОНОВ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

(57) Реферат:

C

N

S

S

S

ω

4

2

R

Использование: для прогноза космической погоды, определяемой вспышечной активностью Солнца. Сущность: заключается в том, что осуществляют непрерывный сбор и анализ информации о потоке рентгеновского излучения Солнца в диапазоне длин волн 0.1-0.8 нм, при этом в процессе формирования прогноза в режиме реального времени осуществляют поиск всплесков рентгеновского излучения с интенсивностью, превосходящей значение 5*10⁻⁵ Вт/м², и для каждого такого всплеска определяют параметр «протонности» всплеска по заданному соотношению и в

зависимости от его значения и гелиодолготы всплеска определяют вероятность наблюдения в околоземном космическом пространстве солнечного протонного события с энергией протонов больше 30 МэВ с интенсивностью в максимуме события выше заданных уровней. Технический результат: обеспечение возможности более высокой заблаговременности прогноза, также а обеспечение возможности лучшего учета временной эволюции всплеска и возможность прогноза появления после всплесков протонных событий разного уровня интенсивностей. 8 ил.



Ľ

RUSSIAN FEDERATION



2 485 557⁽¹³⁾ **C1** (19)(11)

(51) Int. Cl. **G01W 1/10** (2006.01)

FEDERAL SERVICE FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) ABSTRACT OF INVENTION

 (21)(22) Application: 2011145772/28, 11.11.2011 (24) Effective date for property rights: 11.11.2011 	 (72) Inventor(s): Burov Vjacheslav Anatol'evich (RU), Ochelkov Jurij Pavlovich (RU)
 Priority: (22) Date of filing: 11.11.2011 (45) Date of publication: 20.06.2013 Bull. 17 	 (73) Proprietor(s): Burov Vjacheslav Anatol'evich (RU), Ochelkov Jurij Pavlovich (RU)
Mail address: 105187, Moskva, ul. Shcherbakovskaja, 40, kv.200, V.A. Burovu	22

(54) NOWCASTING OF ONSET OF GEOEFFECTIVE PROTON FLUX IN NEAR-EARTH ENVIRONMENT

8 dwg

46

44 42 40

38

36

32

18-

Y=T1r man 24 22

(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: information on X-ray solar radiation is continuously collected and analysed in the wavelength range of 0.1-0.8 nm, wherein during real-time prediction, X-ray bursts with intensity higher than $5*10^{-5}$ W/m² are sought and for each such burst, the "protonness" parameter is determined from a given relationship and depending on its value and the helio-duration of the burst, the probability of observing, in the near-Earth environment, a solar proton event with proton energy greater than 30 MeV with intensity at the peak of the event higher than given levels is determined.

EFFECT: providing earlier forecast and providing better measurement of the burst evolution time and enabling prediction of onset after bursts of past events of different levels of intensity.

21 22 23 24 25 26 27 1.8 1.9 2 =Lg(Jx *10^2 spr/cm^2 c)

G

G

C

C

Фиг. 1

Изобретение относится к области прогноза космической погоды, определяемой вспышечной активностью Солнца, и может быть использовано для прогноза геоэффективных последствий солнечных вспышек, в частности явлений нарушения коротковолновой радиосвязи, ухудшение определения местоположения по данным

- ⁵ ГЛОНАСС/GPS навигации; повышение радиационной опасности для экипажей и пассажиров высотных самолетов с трассами полета в полярных областях, а также сбоям в работе бортовых космических приборов и возрастанию опасности радиационного поражения экипажей пилотируемых космических аппаратов.
- Предлагаемый способ позволяет осуществлять наукастинг (непрерывный мониторинг в реальном времени в сочетании с краткосрочным прогнозом по заранее заданному критерию) появления геоэффективных потоков протонов солнечных космических лучей в околоземном космическом пространстве (ОКП).
- Прогноз осуществляется по данным наблюдения рентгеновского излучения Солнца ¹⁵ в диапазоне длин волн 0.1-0.8 нм на космическом аппарате (KA) GOES с минутным временным разрешением. Используются данные с ежеминутно обновляемого файла по адресу http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/lists/xray/Gp_xr_1m.txt.
- Способ включает в себя решение двух задач: мониторинг всплесков рентгеновского излучения с интенсивностью больше 5*10⁻⁵ Вт/м² (всплески класса больше М5 по общепринятой классификации всплесков) и определение их параметров; прогноз интенсивности в максимуме солнечного протонного события с энергией протонов выше 30 МэВ, сопровождающего всплеск в соответствии с установленным решающим правилом. Под прогнозом понимается определение вероятности наступления после
- ²⁵ всплеска события СПС с энергиями протонов больше 30 МэВ с интенсивностями в максимуме больше чем 0.5 част/см²сср, 10 част/см²сср, 100 част/см²сср и 1000 част/см²сср.

В настоящее время известны методы прогноза появления солнечных протонных событий по данным рентгеновского излучения Солнца, опубликованные в работах:

1. A.Belov "Properties of Solar X-ray flares and proton event forecasting". Advances in Space Research, Vol.43, Issue 4, 2009, p.467-473 [1].

2. M.Laurenza, E.W.Cliver, J.Hewitt, M.Storini, A.G.Ling, C.C.Balch, M.L.Kaiser "A technique for short-term warning of solar energetic particle events based on flare location, flare size, and evidence of particle escape". Space Weather, Vol.7, S04008, doi:

10.1029/2007SW000379, 2009 [2].

.30

3.5

Способ прогноза, изложенный в работе [1], в настоящее время реализован в Институте земного магнетизма и распространения радиоволн РАН (ИЗМИРАН).

- ⁴⁰ Существенное отличие предлагаемого способа прогноза использование (дополнительно к таким параметрам, как величина потока рентгеновского излучения в максимуме всплеска (J_{x,m}) и гелиодолгота всплеска) нового параметра - T_{r,1} -средней ширины временного профиля рентгеновского всплеска в логарифмических
- ⁴⁵ координатах по интенсивности на фазе роста потока рентгеновского излучения от значения в 0.1 J_{x,m} до J_{x,m}. Использование этого параметра существенно улучшает оправдываемость прогноза. Кроме того, предлагаемый метод позволяет обеспечить непрерывный круглосуточный прогноз в реальном времени, т.е. в режиме наукастинга. Способ прогноза, изложенный в работе [2], предполагается использовать в США в
- ⁵⁰ Центре прогноза космической погоды (SWPC NOAA). Существенное отличие предлагаемого здесь способа использование других параметров всплеска для прогноза и, соответственно, другого решающего правила. В [2] в качестве основного параметра, характеризующего «протонную опасность» (вероятность наблюдения

геоэффективного солнечного протонного события после всплеска), предлагается использовать интегральный поток рентгеновского излучения на фазе развития всплеска от 1/3 $J_{x,m}$ на фазе роста до 1/3 $J_{x,m}$ на фазе спада. Нами предлагается

- ⁵ использование других параметров поток рентгеновского излучения в максимуме, который характеризует масштаб события, и параметра, характеризующий временную эволюцию всплеска на фазе роста - среднюю ширину временного профиля рентгеновского всплеска в логарифмических координатах по интенсивности на фазе роста потока рентгеновского излучения от значения в 0.1 J_{x,m} до J_{x,m}. Впервые
- 10 предлагается такой параметр всплеска, характеризующий его «протонную опасность» как: $P=T_{r,l}+0.35Lg(J_{x,m}*10^3)$.

Преимущества предлагаемого способа следующие: более высокая заблаговременность прогноза (используются данные только для фазы роста всплеска

- до максимума), лучший учет временной эволюции всплеска (предлагаемый временной параметр описывает также форму всплеска), возможность прогноза появления после всплесков протонных событий разного уровня интенсивностей: больше чем 0.5 част/см²сср, 10 част/см²сср, 100 част/см²сср и 1000 част/см²сср (в [2] предлагается только способ прогноза появления после всплесков протонных событий с энергией
- ²⁰ протонов больше 10 МэВ с интенсивностью выше, чем 10 част/см²сср). Реализация предлагаемого способа

Предлагаемый метод реализован, во-первых, установлением решающего правила прогноза, во-вторых разработкой алгоритма непрерывного поиска всплесков

- 25 рентгеновского излучения с интенсивностью больше 5*10⁻⁵ Вт/м² (всплески класса М5 и больше по общепринятой классификации всплесков) и определения их параметров, используемых в решающем правиле. Решение этих задач позволило разработать программу непрерывного краткосрочного прогноза (наукастинга) появления в околоземном космическом пространстве геоэффективных потоков протонов.
 - 1. Определение решающего правила прогноза
 - Метод и проблемы

Поскольку в настоящее время использование теоретических моделей солнечных вспышек, моделей ускорения, выхода и распространения ускоренных во вспышках

- 35 протонов и их взаимосвязи с электромагнитным излучением вспышек для прогноза послевспышечных явлений не представляется возможным, то основной метод исследования, используемый при разработке решающего правила прогноза статистические исследования с учетом ранее установленных физических закономерностей. При этом корреляционный анализ при установке решающего
- ⁴⁰ правила неприменим из-за большой величины дисперсии рассматриваемой величины при фиксированном значении величины, с которой устанавливается взаимозависимость. Для определения решающего правила мы использовали изучение распределений точек на двумерных диаграммах взаимных зависимостей параметров при с ларика.
- 45 друг от друга.

Следует отметить, что решение проблемы диагностики протонных событий по электромагнитному излучению солнечных вспышек встречается с целым рядом трудностей.

Во первых, в настоящее время неясно, где происходит ускорение протонов,

⁵⁰ наблюдающихся в СПС. Существует две точки зрения, которые находят свои подтверждения: ускорение во вспышечной области и ускорение в ударной волне, образованной движущимся корональным транзиентом. Возможно, реализуются оба механизма. Не ясен вопрос о "протонности" вспышек, то есть: во всех ли случаях во

вспышках ускоряются протоны (отсутствие протонных событий после значительных вспышек может быть связано как с невозможностью ускорения в них протонов по каким-либо причинам, так и с невозможностью выхода ускоренных протонов из области ускорения).

- ⁵ Во-вторых, не ясен вопрос о моменте времени ускорения протонов во вспышке и длительности процесса ускорения. В настоящее время принято считать, что ускорение протонов, происходит на импульсной фазе солнечных вспышек, когда наблюдаются максимумы нетепловых рентгеновского и микроволнового излучения (которые, как
- 10 правило, хорошо совпадают по времени друг с другом). Именно этот момент времени принимается за момент инжекции протонов в область распространения. Время максимума мягкого рентгеновского излучения, имеющего тепловую природу, в большинстве случаев совпадает со временем максимума нетепловых излучений, и также может быть принято за момент инжекции протонов.
- ¹⁵ Другим важным вопросом, который требует изучения, является вопрос о значительном разбросе (дисперсии) интенсивностей СПС от вспышек с одинаковыми значениями интенсивности электромагнитного излучения. Этот вопрос имеет отношение к взаимосвязи между количеством ускоренных электронов, ответственных
- 20 за генерацию излучений, и протонов. Особенно большая дисперсия имеет место для тепловых излучений, например, таких как мягкое рентгеновское излучение (наблюдаемая дисперсия достигает 4-х порядков величины).

Существование большой дисперсии значительно затрудняет изучение взаимосвязи интенсивности СПС и мягких рентгеновских всплесков. Причины такой дисперсии в

- ²⁵ настоящее время не ясны. Одним из важных факторов является тепловая природа мягких рентгеновских всплесков, в то время как генерация протонов - нетепловой процесс. Интенсивность мягкого рентгеновского излучения определяется температурой, до которой нагревается область излучения, и масштабами этой
- 30 области. Связь интенсивности СПС с нетепловыми излучениями солнечных вспышек, такими как микроволновое излучение (механизм - магнитотормозное излучение нетепловых электронов, ускоренных во вспышках) и жесткое рентгеновское излучение (механизм - тормозное излучение нетепловых электронов) значительно лучше, то есть дисперсия интенсивности СПС значительно меньше (хотя также
- ³⁵ велика). Однако для практических целей прогноза интенсивности СПС использование мягкого рентгеновского излучения обладает рядом преимуществ. Во-первых, данные о мягком рентгеновском излучении в настоящее время доступны в реальном времени со спутника GOES с минутным временным разрешением (и круглосуточно), во-
- вторых, имеется достаточно большой объем однородных данных наблюдений мягкого рентгеновского излучения за несколько циклов солнечной активности. Жесткое рентгеновское излучение наблюдалось к настоящему времени только в отдельных научных экспериментах. Данные по нему в оперативном режиме недоступны. Данные по микроволновому излучению основываются на наземных
- ⁴⁵ наблюдениях сети станций. Сбор и получение данных в оперативном режиме в этом случае затруднен.

Выбор параметров для прогноза

В качестве основного параметра, используемого для прогноза СПС по излучению вспышек, естественно выбрать поток рентгеновского излучения в максимуме события, так как эта величина определяет масштаб солнечного события («синдром большой вспышки» по Kahler S.W. The role of the big flare syndrome in correlations of solar energetic proton fluxes and associated microwave burst parameters, J.Geophys.Res., 1982, 87,

3439-3448). Эта величина изменяется в диапазоне от 10^{-7} Вт/м² до 10^{-3} Вт/м².

Однако использование только этого параметра делает качество прогноза очень низким.

- ⁵ В ряде работ отмечалась зависимость вероятности наблюдения СПС после всплеска электромагниного излучения вспышек от временных параметров всплеска (см., например: Croom, D.L Solar Phys.1971, 19, 171-185; E.T.Sarris, S.D., S.D.Shawhan. Solar Physics.1973, v.28, p.519-532; Cane et al. Astrophys.J., 1986, 301, 448-459). Однако количественных результатов для такой зависимости получено не было. В данном
- 10 методе впервые предлагается в качестве временного параметра использовать параметр T_{r,1}, характеризующий временное развитие всплеска на фазе роста среднюю ширину логарифмического временного профиля рентгеновского всплеска на фазе роста для интервала времени (t₁, t_m), в течение которого поток рентгеновского излучения изменяется от значения 0.1 J_m до значения J_m, где J_m - поток рентгеновского
- излучения изменяется от значения 0.1 J_m до значения J_m, 1 де J_m поток рент излучения в максимуме всплеска:

$$T_{r,1} = S = \int_{t1}^{tm} lg(J(t)10 / J_m) dt = \int_{0}^{1} td(lg(J(t)10 / J_m)) = \langle t \rangle$$

- Эта величина имеет ряд преимуществ перед временными параметрами, используемыми в других работах (обычно время роста и спада всплеска). Во-первых, она не является локальной, взятой в одной точке временного профиля, а характеризует весь профиль, в том числе его форму, а не только ширину, взятую в одной точке профиля; во-вторых, она описывает временное развитие всплеска на фазе
- ²⁵ роста. Использование только временного параметра фазы роста всплеска для прогноза СПС предлагается впервые. В этом существенное отличие от прогноза, предлагаемого в других работах, например в [2]. Такой прогноз обладает преимуществом, по сравнению с прогнозом по фазе спада, так как имеет более
- 30 высокую заблаговременность. Прогноз по фазе спада в достаточно большом количестве случаев лишен смысла из-за нулевой и даже отрицательной заблаговременности. В [2] для увеличения заблаговременности при прогнозе по фазе спада предлагается экстраполировать временной ход на фазе спада по наблюдению фазы спада на начальной стадии. Для целого ряда событий прогноз следует проводить
- ³⁵ только по фазе роста потока рентгеновского излучения, так как на фазе спада прогноз уже не имеет смысла из-за близкой к нулю заблаговременности.

Исследование зависимости «протонности» всплесков (т.е. вероятности наблюдения СПС после всплеска) от основных параметров проводилось для всплесков,

- 40 произошедших на гелиодолготах, для которых гелиодолготное ослабление мало и им можно пренебречь, то есть в области гелиодолгот 30-90°W. Были использованы данные по СПС с энергиями протонов больше 30 МэВ, так как потоки протонов с такими энергиями значительно меньше возмущены межпланетными ударными волнами (МУВ), и в большинстве случаев инжекцию протонов можно считать
- ⁴⁵ мгновенной. Для увеличения статистической обеспеченности в рассмотрение были включены события, вплоть до значений потоков в максимуме 5.0*10⁻¹ част/см² с ср. В предлагаемом методе прогноза рассматривается прогноз СПС от всплесков класса М5 и выше. Оценки, сделанные для всплесков от западной половины диска,
- 50 показывают, что после всплесков класса М5 и выше наблюдается 83% СПС с интенсивностью в максимуме больше 10⁰част/см²сср и 94% СПС с интенсивностью больше 10¹част/см²сср.

Диаграммы для нахождения решающего правила

Для исследования зависимости вероятности СПС от выбранных параметров нами были впервые построены диаграммы зависимости $T_{r,1}$ от lgJ_x для всех всплесков класса больше M5 (поток рентгеновского излучения в максимуме превышает 5*10⁻⁵

⁵ Вт/м²) для сектора гелиодолгот 30-90°W отдельно для событий 22 и 23 циклов солнечной активности и для событий 22 и 23 циклов совместно. Эти диаграммы представлены на фигурах 1-3.

Как следует из фигур 1-3, существует зависимость вероятности протонного

- всплеска от времени $T_{r,1}$. Поскольку существует также зависимость вероятности от ¹⁰ интенсивности всплеска, то вероятность растет наиболее быстро при росте параметра, возрастающего как с ростом $T_{r,1}$, так и с ростом $J_{x,m}$. Предлагается использовать в качестве такого параметра величину $P=T_{r,1}/60+0.35Lg(J_{x,m}*10^3)$, где $T_{r,1}$ в минутах, а $J_{x,m}$ в Вт/м², которую мы будем называть параметром «протонности» всплеска.
- ¹⁵ Пространство ($T_{r,1}$;LgJ_{x,m}), как следует из фиг.3 (а также из фигур 1-2), можно разбить на 4 области, которые на фигурах разделяются наклонными пунктирными линиями: область D₁, ограниченная осями координат и прямой: $T_{r,1}$ (мин)=-21.2*lg(10⁵*J_{x,m}(BT/M²))+27.6; область D₂, ограниченная прямыми: $T_{r,1}$ (мин)=-
- ²⁰ 21.2*lg(10⁵*J_{x,m}(Вт/м²))+27.6 и T_{r,1}(мин)=-21.2*lg(10⁵*J_{x,m}(Вт/м²))+36.4; область D₃, ограниченная прямыми: T_{r,1}(мин)=-21.2*lg(10⁵*J_{x,m}(Вт/м²))+36.4 и T_{r,1}(мин)=-21.2*lg(10⁵*J_{x,m}(Вт/м²))+48; область D₄, выше прямой: T_{r,1}(мин)=21.2*lg(10⁵*J_{x,m}(Вт/м²)+48. Значения параметра Р являются постоянными, если
- ²⁵ параметры всплеска удовлетворяют приведенным уравнениям прямых. В каждой из областей D вероятность наблюдения протонного события разная. Диаграммы, построенные отдельно для событий 22 и 23 циклов, обладают такими же особенностями в распределении двумерных точек событий (T_{r.1}, LgJ_{x.m}).
- 30 Данные, приведенные на диаграмме фиг.3, позволяют рассчитать условные вероятности протонного события при условии наблюдения всплеска рентгеновского излучения с заданными параметрами W(A_i/B_k).

В нашем случае события B1, B2, B3, B4 - наблюдение рентгеновского всплеска с параметрами $T_{r,1}$ и $lgJ_{x,m}$ такими, что точки с координатами $T_{r,1}$, $lgJ_{x,m}$ принадлежат областям D1, D2, D3, D4, соответственно. Принадлежность параметров события к

области D определяется значением параметра «протонности» Р. Если P<-0.24, то точка соответствующая всплеску, попадает в область D₁, если -0.24 \leq P<-0.09 - то в область D₂, если -0.09 \leq P<0.10 - то в область D₃, если 0.10 \leq P - то в область D₄.

40 События В1, В2, В3, В4 образуют полную группу несовместимых событий:

$$\sum_{k=1}^{4} W(B_{k}) = 1$$

35

50

События А1, А2, А3, А4, А5 - наблюдение после рентгеновского всплеска

45 протонного события с энергиями протонов больше 30 МэВ с потоком в максимуме в интервалах:

lgJp(част/см²сср)<-0.3, -0.3≤lgJp(част/см²сср)<1, 1≤lgJp(част/см²сср)<2, 2≤lgJp(част/см²сср)<3, lgJp(част/см²сср)≥3. События А1, А2, А3, А4, А5 также образуют полную группу несовместимых событий: $\sum_{i=1}^{5} W(A_i) = 1$

Вероятность - наблюдение события Ai при условии события Bk - W(Ai/Bk) в нашем

случае означает условную вероятность наблюдения протонного события с потоком в максимуме в одном из пяти интервалов после всплеска со значениями параметров, принадлежащих заданным областям Dk. Эту вероятность можно обозначить также как:

5

w ($n_i \le lgJ_p < n_{i+1}/(T_{r,1}; lgJ_x) ⊂ D_k$), где $n_1 = -0.3$, $n_2 = 1$, $n_3 = 2$, $n_4 = 3$, $n_5 = \infty$.

Для краткости изложения введем следующие обозначения: w(i/k)- условная вероятность наблюдения СПС с уровнем потока протонов с энергией больше 30 МэВ балла і при условии k. Значение индекса і=-1 соответствует уровню потока протонов

- ¹⁰ меньше фона (lgJ_p<-0.3), значение индекса i=-0.3 соответствует значениям потока протонов в пределах $-0.3 \le \text{lgJ}_p < 1$, значение индекса i=1 соответствует значениям потока протонов в пределах $1 \le \text{lgJ}_p < 2$, значение индекса i=2 соответствует значениям потока протонов в пределах $2 \le \text{lgJ}_p < 3$, значение индекса i=3 соответствует значениям
- ¹⁵ потока протонов, удовлетворяющим условию lgJ_p≥3. Индекс k обозначает условие принадлежности точки с параметрами всплеска $T_{r,1}$ и $J_{x,m}$ к области D_1 (к=1), к области D_2 (к=2), к области D_3 (к=3), к области D_4 (к=4). Например, w(2/3) означает условную вероятность: w(2≤lgJ_p<3/($T_{r,1}$;lgJ_x)⊂ D_3).

Для вычисления вероятностей событий СПС с интенсивностью выше заданного 20 уровня следует проводить суммирование вероятностей w(i/k) по индексу i. Например, вероятность w(>1/k)=w(1/k)+w(2/k)+w(3/k).

При расчете вероятностей были использованы всплески с гелиодолготами 30-90°W, а также всплески за западным лимбом, происшедшие в 22 и 23 циклах СА: Таких всплесков класса ≥М5 произошло 179 (из них 78 событий класса ≥Х1).

Из них:

25

1.Число «протонных» всплесков (с наблюдением последующего СПС с энергий протонов больше 30 МэВ и потоком в максимуме больше чем 0.5 част/см²сср) - 54;

2. Число всплесков с неопределенной «протонностью» (из-за повышенного фона от ³⁰ предшествующих СПС) - 20

3. Число условно «непротонных» всплесков (поток протонов от которых не превышал значение 0.5 част/см²сср) - 105.

При расчете вероятностей наблюдения событий СПС события с неопределенной *«протонностью» также учитывались.* Это делалось следующим образом:

Пусть

$$w_{r}(n_{i} \leq lg J_{p} < n_{i+1} / (T_{r,l}; lg J_{x}) \subset D_{i}) = \frac{N_{p,r}}{N_{p+} + N_{p-} + N_{p?}} \xrightarrow{-\text{ реальная}}$$

условная вероятность (в случае, если «протоность» всех всплесков известна), N_{p,r} - число «протонных» всплесков в области (реальное), N_{p+} - число наблюдаемых «протонных» всплесков, N_{p-} число «непротонных» всплесков, N_{p?} - число всплесков, «протонность» которых неопределена.

$$_{_{45}} \quad w_{_{0}}(n_{_{i}} \leq lg \, J_{_{p}} < n_{_{i+1}} \, / (T_{_{r,1}}; lg \, J_{_{x}}) \subset D_{_{i}}) = \frac{N_{_{p+}}}{N_{_{p+}} + N_{_{p-}} + N_{_{p7}}} \, - \, \text{наблюдаемая условная}$$

вероятность «протонного» всплеска;

$$w(?/(T_{r,1}; \lg J_x) \subset D_i) = \frac{N_{p?}}{N_{p+} + N_{p-} + N_{p?}} - условная вероятность наблюдения$$

50

всплеска с неопределенной «протонностью».

Тогда получим уравнение:

RU 2 485 557 C1

$$\begin{split} & w_r (n_i \leq \lg J_p < n_{i+1} / (T_{r,1}; \lg J_x) \subset D_i) = w_o (n_i \leq \lg J_p < n_{i+1} / (T_{r,1}; \lg J_x) \subset D_i) + \\ & + w_r (n_i \leq \lg J_p < n_{i+1} / (T_{r,1}; \lg J_x) \subset D_i) * w (? / (T_{r,1}; \lg J_x) \subset D_i) \\ & \text{Отсюда следует:} \end{split}$$

5

10

$$w_{r}(n_{i} \leq lg | J_{p} < n_{i+1} / (T_{r,l}; lg | J_{x}) \subset D_{i}) = \frac{w_{o}(n_{i} \leq lg | J_{p} < n_{i+1} / (T_{r,l}; lg | J_{x}) \subset D_{i})}{1 - w(? / (T_{r,l}; lg | J_{x}) \subset D_{i})}$$

Решающее правило прогноза

Решающее правило прогноза представлено таблицами 1-3

Таблица 1.

Значения условных вероятностей, наблюдения СПС с потоком в максимуме выше заданного уровня в зависимости от значений параметров всплеска рентгеновского излучения для сектора гелиодолгот: 0°≤φ≤90°W

15

15	k	1	2	3	4
	w(>-0.3/k)	0.09	0.29	0.82	0.91
	w(>1/k)	0.00	0.11	0.50	0.82
	w(>2/k)	0.00	0.00	0.18	0.55
	w(>3/k)	0.00	0.00	0.14	0.18

20

Таблица 2.

Значения условных вероятностей, наблюдения СПС с потоком в максимуме выше заданного уровня в зависимости от значений параметров всплеска рентгеновского излучения для сектора гелиодолгот: -30°Е≤φπ0°

25

.30

35

k	1	2	3	4
w(>-0.3/k)	0.00	0.12	0.60	0.86
w(>1/k)	0.00	0.00	0.20	0.36
w(>2/k)	0.00	0.00	0.04	0.00
w(>3/k)	0.00	0.00	0.00	0.00

Таблица 3.

Значения условных вероятностей, наблюдения СПС с потоком в максимуме выше заданного уровня в зависимости от значений параметров всплеска рентгеновского излучения для сектора гелиодолгот: -90°Е≤φπ-30°Е

	k	1	2	3	4
	w(>-0.3/k)	0.00	0.00	0.18	0.54
	w(>1/k)	0.00	0.00	0.14	0.17
40	w(>2/k)	0.00	0.00	0.00	0.00
	w(>3/k)	0.00	0.00	0.00	0.00

Отметим здесь, что вероятности для сектора $-30^{\circ}E \le \varphi \pi 0^{\circ}$ соответствуют вероятностям для сектора $0^{\circ} \le \varphi \le 90^{\circ}W$ при увеличении интенсивности

- 45 прогнозируемого потока протонов в 25 раз, а вероятности для сектора 90°Е≤φπ-30°Е соответствуют вероятностям для сектора 0°≤φ≤90°W при увеличении интенсивности прогнозируемого потока протонов в 100 раз, что соответствует гелиодолготному ослаблению потоков протонов в СПС в 25 и 100 раз, соответственно (см.также М.Н.Беловский, Ю.П.Очелков. Солнечные данные, 1976. т.12, с. 73).
- ⁵⁰ Эти результаты получены нами при исследовании диаграмм $lgJ_p LgJ_{x,m}$ для секторов гелиодолгот: 0° $\leq \phi \leq 30^{\circ}$ W, 30° $\leq \phi \leq 90^{\circ}$ W, -30°E $\leq \phi \pi 0^{\circ}$, -90°E $\leq \phi \pi 30^{\circ}$ E.

Проверка решающего правила

Нами была проведена проверка решающего правила по данным событий 23 цикла из сектора гелиодолгот 0°-30° W, которые не были использованы для нахождения решающего правила. Всего было рассмотрено 37 событий. Результаты проверки представлены на диаграмме T_{r.1}-lgJ_{x.m}, приведенной на фиг.4.

⁵ Диаграмма полностью соответствует диаграммам фиг.1, фиг.2, фиг.3, по которым было установлено решающее правило прогноза. Результаты расчета вероятностей по этой диаграмме примерно совпадают с результатами, приведенными в табл. 1.

2. Алгоритм мониторинга всплесков рентгеновского излучения класса М5 и выше и *10* определения их параметров.

Алгоритм мониторинга всплесков, потенциально опасных с точки зрения появления после них геоэффективных потоков протонов в ОКП, предполагает несколько режимов работы: режим контроля уровня рентгеновского излучения, режим фазы спада, режим

¹⁵ расчета параметров всплесков, необходимых для прогноза. На фиг.5 изображены режимы работы на разных фазах временной эволюции потока рентгеновского излучения. Общая блок-схема алгортма изображена на фиг.6. Блок схема режима фазы роста представлена на фиг.7. Блок схема режима прогноза представлена на 20 фиг.8.

Режим контроля осуществляется при значении потока рентгеновского излучения меньше чем 4*10⁻⁶ Вт/м². В этом режиме осуществляется сравнение значения потока с этой величиной и переход к режиму фазы роста в случае превышения этого значения. В режиме фазы роста учитывается возможность двух ситуаций: рост до

- ²⁵ максимального значения потока, не превышающего значения 5*10⁻⁵ Вт/м², и рост до значения потока превышающего значение 5*10⁻⁵ Вт/м². Поскольку заранее неизвестно, какая ситуация реализуется, то в режиме фазы роста всегда происходит запоминание данных по потоку рентгеновского излучения для каждой минуты фазы
- ³⁰ роста. Если реализуется первая ситуация, то массив данных стирается, если вторая, то он используется для нахождения параметров прогноза. В первом случае реализуется режим фазы спада. В этом режиме последующее значение потока сравнивается с предыдущим. После достижения минимального значения, в зависимости от его
 35 значения реализуется либо режим фазы роста, либо режим контроля.

Если максимальное значение для фазы роста превышает значение 5*10⁻⁵ Вт/м², то определяются параметры всплеска, используемые в решающем правиле прогноза. Вычисляется величина J⁻_{max} максимального значения потока во всплеске, значение

 $J_{max}/10$ сравнивается с полученным ранее значением J_{min} .

Затем вычисляется средняя ширина временного профиля в логарифмических координатах для потока рентгеновского излучения. В случае если предыдущее максимуму минимальное значение потока, после которого начинается рост до максимума J_{min} , удовлетворяет неравенству: $J_{min} < J_{max}/10$, для вычислений используется формула:

$$S = 1/2 \sum_{i_0}^{i_{max}-1} (lg(\frac{J_r(i)*10}{J_{max}} + lg(\frac{J_r(i+1)*10}{J_{max}})), \quad T_{r,1} = S,$$

45

в которой целочисленный параметр i_0 (номер отсчета), такой, что $J_r(i_0)$, значение ⁵⁰ потока, наиболее близкое к $J_{max}/10$, а $J_r(imax)=J_{max}$ (индекс г означает, что значения потока берутся на фазе роста); $T_{r,1}$ в минутах.

В случае если предыдущее максимуму минимальное значение потока, после

которого начинается рост до максимума J_{min} , удовлетворяет неравенству: J_{min} >Jmax/10 (это означает, что всплеск является сложным), для вычислений используется формула:

$$S = 1/2 \sum_{i_0=1}^{i_{\max}-1} (lg(\frac{Jr(i)*10^{\kappa}}{J\max} + lg(\frac{Jr(i+1)10^{\kappa}}{J\max})), \quad k \le lg^{J\max} J_{\min} \pi k + 0.2,$$

в которой целочисленный параметр i_0 , такой, что $J_r(i_0)$ для найденного k, значение наиболее близкое к $J_{max}/10^k$. При этом параметр $T_{r,1}$ вычисляется по формуле: $T_{r,1} = S * f(k)$,

10

где к=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0,9 f(0.1)=25, f(0.3)=5.5, f(0.5)=2.7, f(0.7)=1.65, f(0.9)=1 Значения функций f получены нами на основе изучения временной эволюции всплесков на фазе роста и равны отношению средней ширины логарифмического временного профиля всплеска на фазе роста от 10⁻¹ Jm до Jm, к средней ширине

15 логарифмического временного профиля на фазах роста от 10^{-k}Jm до Jm.

После вычисления $T_{r,\,l}$ по приведенным формулам вычисляется параметр «протонности» Р.

Если параметр «протонности» лежит в интервале P<-0.24, то для расчета вероятностей используются данные первого столбца таблиц вероятностей 1, 2, 3. Если значение параметра лежит в интервале - -0.24<P<-0.09, то - данные второго столбца, если значение параметра лежит в интервале:-0.09<P< 0.10, то - данные третьего столбца, если P>0.1, то- данные четвертого столбца.

В зависимости от гелиодолготы всплеска выбираются данные таблиц 1, 2, 3 для заданного уровня потока протонов в максимуме СПС: первая строка для $lgJ_p \ge -0.3$, вторая строка для $lgJ_p \ge 1$, третья строка для $lgJ_p \ge 2$, четвертая строка для $lgJ_p \ge 3$ (J_p в част/см²сср).

Пример применения способа прогноза.

³⁰ Рассмотрим работу предлагаемого способа прогноза на примере рентгеновского всплеска, произошедшего 13 декабря 2006 года на гелиодолготе W24. Расчеты параметров всплеска дают следующие значения:

 $T_{r,1}$ =12.762 мин. $J_{x,m}$ =3.76*10⁻⁴ Вт/м², Р=0.064 (что соответствует сектору D₃ и высокому уровню протонной опасности). В соответствии с результатами расчета прогноз вероятности события СПС с интенсивностью в максимуме больше 10^1 част/см²с - 82%, с интенсивностью в максимуме больше 10^2 част/см²с - 50%. Наблюдалось протонное событие с потоком в максимуме 4*10²част/см²сср. В настоящее время способ реализован в виде программы и может быть

40 использован на любом персональном компьютере, имеющем выход в Интернет.
 3. Краткое описание чертежей

Фиг.1

45

Диаграмма зависимости $T_{r,1}$ от lgJ_x . для всплесков сектора 30-90° W класса \geq M5 для 23 цикла CA. Темные кружки - «протонные» всплески (Jp>0.5 част/см²сср), светлые - условно «непротонные» всплески (Jp<0.5 част/см²сср), большие светлые кружки - события с «неопределенной протонностью» из-за фона СПС от предыдущих вспышек. Фиг.2

Диаграмма зависимости T_{r,1} от lgJ_x. для всплесков сектора 30°-90° W класса ≥M5 ⁵⁰ для 22 цикла CA. Темные кружки - «протонные» всплески (Jp>0.5 част/см²сср), светлые - условно «непротонные» всплески (Jp<0.5 част/см²сср), большие светлые кружки - события с «неопределенной протонностью» из-за фона СПС от предыдущих вспышек.

5

Фиг.3

Диаграмма зависимости $T_{r,1}$ от lgJ_x для всплесков из сектора гелиодолгот 30-90° W класса \geq M5 для 22 и 23 циклов CA. Светлые малые кружки - события, в которых поток протонов в максимуме $J_p < 0.5$ част/см²сср, большие светлые кружки - события, в которых уровень потока протонов меньше фона от СПС, малые черные кружки - события, в которых поток протонов в максимуме $0.5 \leq J_p < 10$ част/см²сср, средние черные кружки - события, в которых поток протонов в максимуме $0.5 \leq J_p < 10$ част/см²сср, средние черные кружки - события, в которых поток протонов в максимуме $0.5 \leq J_p < 10$ част/см²сср, средние черные кружки - события, в которых поток протонов в максимуме в пределах

¹⁰ 10≤J_p<100 част/см²сср, большие черные кружки - события с потоком протонов в максимуме в пределах 100≤J_p<1000 част/см²сср, самые большие черные кружки - события, в которых поток протонов в максимуме J_p≥1000 част/см²сср. Фиг.4

- ¹⁵ Диаграмма зависимости $T_{r,1}$ от lgJ_x для всплесков из сектора гелиодолгот 0°-30° W класса \geq M5 для 23 цикла CA. Светлые малые кружки события, в которых поток протонов в максимуме J_p <0.5 част/см²сср, большие светлые кружки события, в которых уровень потока протонов меньше фона от СПС, малые черные кружки -
- 20 события, в которых поток протонов в максимуме 0.5≤J_p<10 част/см²сср, средние черные кружки события, в которых поток протонов в максимуме в пределах 10≤J_p<100 част/см²сср, большие черные кружки события, с потоком протонов в максимуме в пределах 100≤J_p<1000 част/см²сср, самые большие черные кружки -

25 события, в которых поток протонов в максимуме J_p≥1000 част/см²сср. Фиг. 5

Режимы алгоритма мониторинга всплесков и прогноза появления потоков протонов на разных фазах временной эволюции потока рентгеновского излучения.

- ³⁰ Нижняя кривая временной ход потока рентгеновского излучения для диапазона длин волн 0.05-0.3 нм, верхняя кривая - для диапазона 0.1-0.8 нм. Сплошные горизонтальные линии - уровни потока рентгеновского излучения для диапазона длин волн 0.1-0.8 нм 4*10⁻⁶ Вт/м² и 5*10⁻⁵ Вт/м², соответствующие режимам фазы роста и прогноза.
- 35 Фиг.6

Общая блок-схема алгоритма наукастинга появления геоэффективных потоков протонов, которая включает в себя режимы контроля, фазы роста, фазы спада, фазы прогноза.

40 Фиг.7

Блок-схема алгоритма наукастинга для режима фазы роста. Фиг.8

Блок-схема алгоритма наукастинга для режима прогноза.

45

Формула изобретения

Способ прогнозирования появления геоэффективных потоков протонов в околоземном космическом пространстве, заключающийся в непрерывном сборе и анализе информации о потоке рентгеновского излучения Солнца в диапазоне длин

⁵⁰ волн 0,1-0,8 нм, отличающийся тем, что в процессе формирования прогноза в режиме реального времени осуществляют поиск всплесков рентгеновского излучения с интенсивностью превосходящей значение 5.10⁻⁵ Вт/м² и для каждого такого всплеска определяют параметр «протонности» всплеска по соотношению: $P=T_{r,1}+0,35Lg(J_{x,m}\cdot 10^3),$

где $J_{x,m}$ - поток рентгеновского излучения в максимуме всплеска, Bt/m^2 ;

 $T_{r,1}$ - средняя ширина временного профиля рентгеновского всплеска в логарифмических координатах по интенсивности на фазе роста потока рентгеновского излучения от значения в $0,1 \cdot J_{x,m}$ до $J_{x,m}$, ч;

и в зависимости от его значения и гелиодолготы всплеска определяют вероятность наблюдения в околоземном космическом пространстве солнечного протонного события с энергией протонов больше 30 МэВ с интенсивностью в максимуме события

¹⁰ выше заданных уровней: 0,5 част./см²сср, 10 част./см²сср, 100 част./см²сср, 1000 част./см²сср.

15			
20			
25			
30			
35			
40			
45			
50			







RU 2485557 C1







Фиг.6



Фиг.7



Фиг.8