

## Связь между значениями потоков протонов вне магнитосферы Земли и солнечной активностью

Ю. Б. Трутовская<sup>1\*</sup> С. А. Красоткин<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, кафедра физики космоса  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 20.06.2019; Подписана в печать 17.12.2019)

Потребность в получении долгосрочных прогнозов потоков протонов в околоземном космическом пространстве объясняется необходимостью обеспечения безопасности космических полетов. В статье рассмотрены данные о потоках протонов вне магнитосферы Земли за 1972–2018 гг., полученные на аппаратах серии IMP и GOES. Были выявлены зависимости среднегодовых потоков протонов (для энергий  $> 1$  МэВ,  $> 2$  МэВ,  $> 4$  МэВ,  $> 10$  МэВ,  $> 30$  МэВ,  $> 60$  МэВ) и их среднеквадратичных отклонений от чисел Вольфа, а также был выявлен характер распределения потоков протонов. Построенные функции распределения вероятности среднегодовых потоков протонов указанных энергий позволяют оценить вероятность, с которой среднегодовое значение потоков протонов не будет превышать некоторой величины при определенном значении числа Вольфа.

PACS: 94.20.wq, 96.40.Fg, 94.05.Sd УДК: 53.06

Ключевые слова: околоземное космическое пространство, солнечная активность, числа Вольфа, флюенс протонов, функция распределения вероятности.

### ВВЕДЕНИЕ

Цель настоящей работы состоит в выявлении связи между среднегодовыми значениями потоков протонов вне магнитосферы Земли и солнечной активностью.

Космические лучи оказывают существенное влияние на многие процессы, проходящие на Земле, а также представляют угрозу для здоровья космонавтов и качества работы электронных приборов в космическом пространстве, чем и определяется актуальность проблем радиационного воздействия галактических и солнечных космических лучей, построения моделей и создания прогнозов. Важно отметить, что галактические космические лучи характеризуются относительно жестким спектром в широком диапазоне энергий и мало ослабляются с толщиной защиты, и дозы за год для периода минимума солнечной активности оказываются достаточно высокими: примерно в 2–2.5 раза превышают величины доз для периода ее максимума. Наибольшие потоки частиц галактических космических лучей в межпланетном пространстве наблюдаются в годы минимума солнечной активности. Это явление объясняется влиянием на состояние межпланетной среды солнечной активности (солнечного ветра), которая препятствует проникновению частиц (отклоняет их), приходящих из Галактики в Солнечную систему. По этой причине принято считать, что долгосрочные полеты в космос необходимо проводить именно в период макси-

муму солнечной активности. Таким образом, актуальность данной работы определяется потребностью в получении долгосрочных прогнозов потоков протонов в околоземном космическом пространстве для обеспечения безопасности космических полетов еще на стадии их планирования.

### 1. СВЯЗЬ МЕЖДУ СРЕДНЕГОДОВЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ПОТОКОВ ПРОТОНОВ ВНЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ И СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

В процессе работы были собраны и рассмотрены данные о потоках протонов вне магнитосферы Земли за 1972–2018 годы, полученные на аппаратах серий IMP и GOES.

В работе не проводится различие в отношении заряженных частиц галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечных космических лучей (СКЛ), поскольку вклад ГКЛ можно считать малым по сравнению с СКЛ. Изначальный массив данных (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) для энергий  $> 10$  МэВ,  $> 30$  МэВ,  $> 60$  МэВ был больше (с 1972 по 2018 год), чем для энергий  $> 1$  МэВ,  $> 2$  МэВ,  $> 4$  МэВ (с 1972 по 2005 год). Для чисел Вольфа использовалась т.н. новая («бельгийская») шкала [4].

Анализ достоверности результатов измерений потоков протонов разными приборами (Mottl and Nymmik, 2005) показал, что ошибки измерения потоков СКЛ минимальны для приборов DOME, установленных на спутниках GOES, вследствие чего данные от этих приборов следует принимать как наиболее достоверные.

\*E-mail: [kikulia@list.ru](mailto:kikulia@list.ru)

†E-mail: [sergekras@rambler.ru](mailto:sergekras@rambler.ru)

Особый интерес также представляет тот факт, что, обращаясь к результатам работы (Гецелев и др, 2009) и сравнивая их с научно-техническим отчетом (Панасюк и др., 2009), можно заметить, что в своих выводах авторы пришли к противоположным заключениям. В своей работе Гецелев и др. склоняются к тому, что данные IMP-8 о потоках протонов после середины 1989 г. являются достаточно «верными», в сравнении с предшествующим периодом, тогда как Панасюк и др. придерживаются мнения о том, что данные о потоках протонов, измеренных на спутнике IMP 8 за все года его работы, при энергиях несколько сот МэВ искажены (завышены до 10 раз).

Существует много различных мнений о качестве данных космических аппаратов (КА) IMP и GOES, но единой признанной оценки в отношении этих данных пока дано не было. Тем не менее многие авторы апеллируют к информации, полученной с указанных выше КА. Так, например, предоставленные NASA данные

подтверждают, что сравнения значений потоков протонов IMP 8, GOES 10 и GOES 11, полученных между 1999 и 2005 годами, показывают достаточно хорошее согласие во время солнечных протонных событий (СПС) [5].

Для исследования корреляции между десятичными логарифмами ежегодных флюенсов протонов вне магнитосферы Земли и числами Вольфа сначала было необходимо усреднить значения потоков протонов по годам, затем были получены ежегодные флюенсы протонов, от которых в дальнейшем были рассчитаны десятичные логарифмы. Стандартное отклонение было решено вычислить для расширенной базы (с помощью скользящего среднего) значений логарифмов флюенсов протонов, причиной такого решения являлось стремление увеличить статистику.

Были получены уравнения связи между значениями десятичных логарифмов флюенсов протонов вне магнитосферы Земли ( $LgF$ ) и числами Вольфа ( $Mean[R]$ ):

$$\begin{aligned} Mean[LgF(> 1 \text{ MeV})] &= 8.4334 + 0.0073 \cdot Mean[R]; \\ Mean[LgF(> 2 \text{ MeV})] &= 8.086 + 0.007 \cdot Mean[R]; \\ Mean[LgF(> 4 \text{ MeV})] &= 7.7582 + 0.0063 \cdot Mean[R]; \\ Mean[LgF(> 10 \text{ MeV})] &= 7.3349 + 0.0061 \cdot Mean[R]; \\ Mean[LgF(> 30 \text{ MeV})] &= 7.0204 + 0.0044 \cdot Mean[R]; \\ Mean[LgF(> 60 \text{ MeV})] &= 6.8532 + 0.0039 \cdot Mean[R]. \end{aligned}$$

Также были получены уравнения связи между усредненными по интервалам значениями стандартного отклонения десятичных логарифмов флюенсов протонов

( $StDev[LgF]$ ) и усредненных на тех же интервалах чисел Вольфа ( $Mean[R]$ ):

$$\begin{aligned} StDev[LgF(> 1 \text{ MeV})] &= 0.618 - 0.002 \cdot Mean[R]; \\ StDev[LgF(> 2 \text{ MeV})] &= 0.6677 - 0.0024 \cdot Mean[R]; \\ StDev[LgF(> 4 \text{ MeV})] &= 0.5946 - 0.002 \cdot Mean[R]; \\ StDev[LgF(> 10 \text{ MeV})] &= 0.4954 + 0.0004 \cdot Mean[R]; \\ StDev[LgF(> 30 \text{ MeV})] &= 0.3649 + 0.0006 \cdot Mean[R]; \\ StDev[LgF(> 60 \text{ MeV})] &= 0.2946 + 0.0003 \cdot Mean[R]. \end{aligned}$$

Коэффициент корреляции между десятичными логарифмами потоков протонов и числами Вольфа, а также коэффициент корреляции между стандартным отклонением десятичных логарифмов потоков протонов и числами Вольфа представлены в табл. I.

## 2. ХАРАКТЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Проверка гипотез с помощью критерия  $\chi^2$  основана на сравнении наблюдаемых (эмпирических) частот с

предполагаемыми теоретическими. Практически всегда эмпирические  $n_i$  и теоретические  $n'_i$  частоты не совпадают. Если это несовпадение вызвано случайными причинами (неудачная выборка, малое число измерений), то несовпадение не является значимым. Если же теоретические частоты вычислены, исходя из неверной гипотезы о виде распределения генеральной совокупности, то несовпадение частот является неслучайным (значимым).

Чтобы при выбранном уровне значимости  $\alpha$ , проверить нулевую гипотезу  $H_0$ , что генеральная

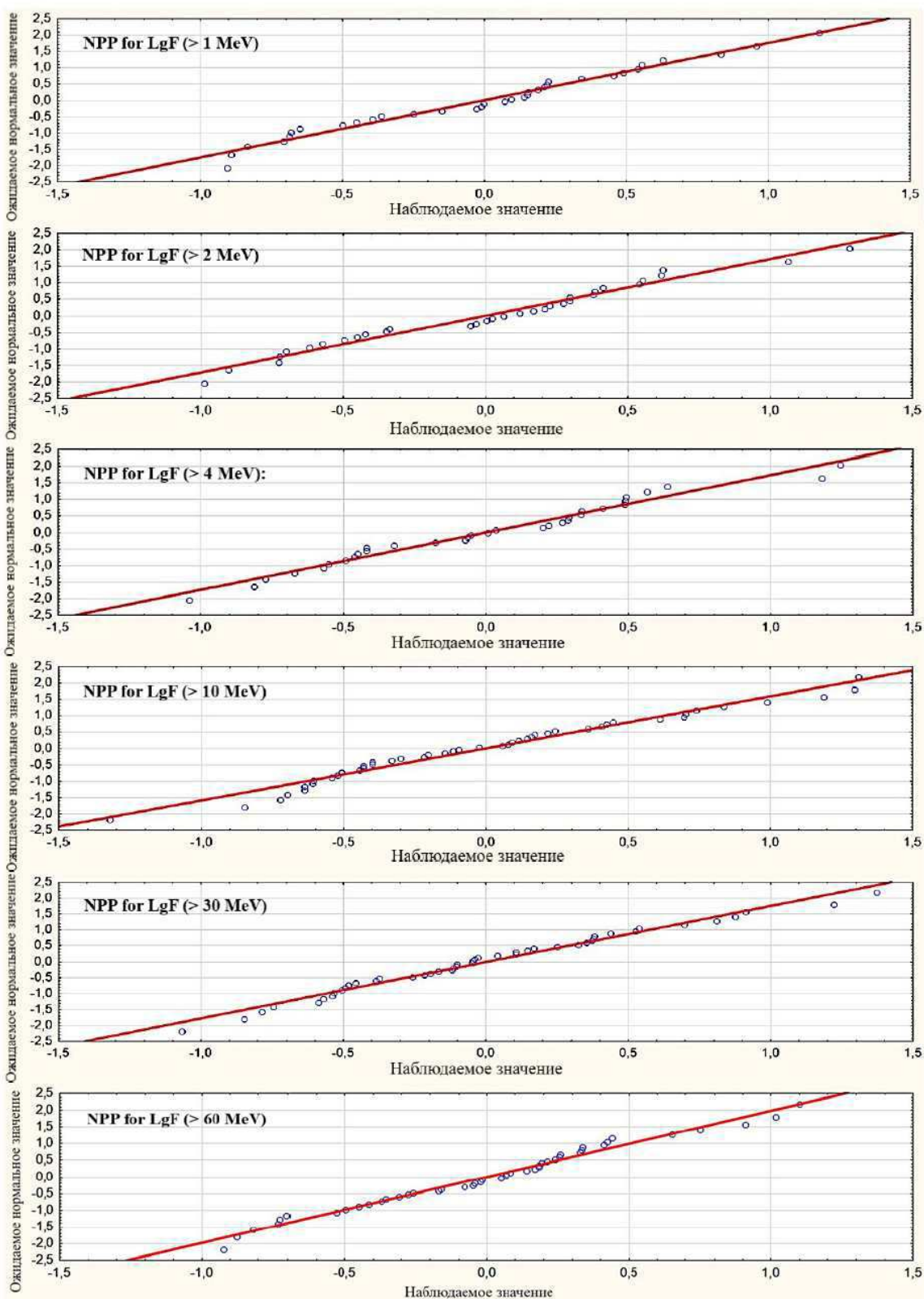


Рис. 1: Проверка на нормальность при помощи нормальной вероятностной бумаги (Normal Probability Plot) для LgF(>1 МэВ), LgF(>2 МэВ), LgF(>4 МэВ), LgF(>10 МэВ), LgF(>30 МэВ), LgF(>60 МэВ)

Таблица I: Коэффициент корреляции между десятичными логарифмами флюенсов протонов и числами Вольфа, коэффициент корреляции между стандартным отклонением десятичных логарифмов флюенсов протонов и числами Вольфа

Энергия	Коэф.корр. между $LgF$ и $R$	Коэф.корр. между $StDev[LgF]$ и $R$
>1 МэВ	0.68	-0.87
>2 МэВ	0.67	-0.70
>4 МэВ	0.63	-0.67
>10 МэВ	0.56	0.19
>30 МэВ	0.48	0,26
>60 МэВ	0.47	0,17

совокупность распределена нормально, нужно вычислить наблюдаемое значение критерия Пирсона  $\chi^2$ :

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$$

по таблице критических точек распределения  $\chi^2$ , а также по выбранному уровню значимости  $\alpha$  и числу степеней свободы  $k = s - 3$  найти критическую точку  $\chi^2_{cr}$ .

Если  $\chi^2 < \chi^2_{cr}$ , то нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу.

Если  $\chi^2 > \chi^2_{cr}$ , то нулевая гипотеза отвергается.

В табл. II представлены результаты, демонстрирующие согласие с гипотезой о нормальности распределения генеральной совокупности. Различие наблюдаемых и теоретических частот не является значимым и не противоречит утверждению, что распределение генеральной совокупности является нормальным.

Для исследования нормальности распределения также были построены графики на нормальной вероятностной бумаге [6].

Суть используемого метода следующая: если наблюдаемые значения (откладываемые по оси абсцисс) распределены нормально, то все значения на графике должны попасть на прямую линию. Если значения не являются нормально распределенными, они будут отклоняться от этой линии. Таким образом, данный метод представляет собой метод визуальной оценки, который был применен к флюенсам протонов (следующих энергий: >1 МэВ, >2 МэВ, >4 МэВ, >10 МэВ, >30 МэВ, >60 МэВ), а также к соответствующим им стандартным отклонениям. В качестве примера на рис. 1 и рис. 2 представлены графики на нормальной вероятностной бумаге (Normal Probability Plot) для флюенсов протонов и стандартных отклонений для энергий >1 МэВ, >2 МэВ, >4 МэВ, >10 МэВ, >30 МэВ, >60 МэВ соответственно.

На основании написанного выше, был сделан следующий вывод: так как  $\chi^2 < \chi^2_{cr}$ , то данные измерений, представленные в табл. II, согласуются с гипотезой о

нормальности распределения генеральной совокупности потоков протонов. Различие наблюдаемых и теоретических частот является незначительным. Построение тестов на нормальной вероятностной бумаге также подтверждает нормальный характер распределения.

### 3. НОРМАЛЬНАЯ ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ

Величины среднего значения и среднеквадратичного отклонения являются параметрами нормального распределения, таким образом, можно легко вычислить нормальную функцию распределения вероятности для любого заданного числа Вольфа. В качестве примера на рис. 3 представлена функция распределения вероятности для значения числа Вольфа  $R = 100$ .

Построение функции распределения вероятности позволяет оценить вероятность, с которой среднегодовое значение флюенсов протонов не превышает некоторой величины при заданном значении числа Вольфа. Отсюда следует важный вывод: выявленные связи между значениями десятичных логарифмов флюенсов протонов вне магнитосферы Земли ( $LgF$ ) и числами Вольфа ( $Mean[R]$ ), а также между значениями стандартного отклонения десятичных логарифмов флюенсов протонов ( $StDev[LgF]$ ) и числами Вольфа ( $Mean[R]$ ), позволяют получать долгосрочные и сверхдолгосрочные прогнозы потоков протонов в ОКП на основе соответствующих прогнозов чисел Вольфа.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отношении характера распределения флюенсов протонов было выдвинуто предположение о нормальности распределения из-за достаточно больших объёмов выборки. Воспользовавшись критерием Пирсона  $\chi^2$  для значений десятичных логарифмов флюенсов протонов вне магнитосферы Земли следующих энергий: >1 МэВ, >2 МэВ, >4 МэВ, >10 МэВ, >30 МэВ, >60 МэВ, было проверено выполнение условия  $\chi^2 < \chi^2_{cr}$ . Оно подтвердилось для флюенсов всех указанных выше энергий, и был сделан вывод о том, что данные измерений согласуются с гипотезой о нормальности распределения генеральной совокупности.

Данное предположение также было подтверждено построением графиков на нормальной вероятностной бумаге (Normal Probability Plot) [6].

Наблюдаемые значения, откладываемые по оси абсцисс, преимущественно ложатся на прямую линию или близки к ней, а значит, имеют распределение близкое к нормальному.

В данной работе были выявлены зависимости, на основании которых была построена функция распределения вероятности для заданных чисел Вольфа, демонстрирующая, с какой вероятностью среднегодовое значение потоков протонов не будет превышать



Таблица II: Критерий Пирсона для значений десятичных логарифмов потоков протонов вне магнитосферы Земли (>1 МэВ, >2 МэВ, >4 МэВ, >10 МэВ, >30 МэВ, >60 МэВ)

Энергия	$\chi^2$	$\chi^2_{cr}$	Число групп выборки $s$	Число степеней свободы $k$	Уровень значимости $\alpha$
>1 МэВ	4.5	11.3	6	3	0.01
>2 МэВ	3.5	11.3	6	3	0.01
>4 МэВ	1.5	11.3	6	3	0.01
>10 МэВ	6.8	13.3	7	4	0.01
>30 МэВ	7.5	13.3	7	4	0.01
>60 МэВ	12.3	13.3	7	4	0.01

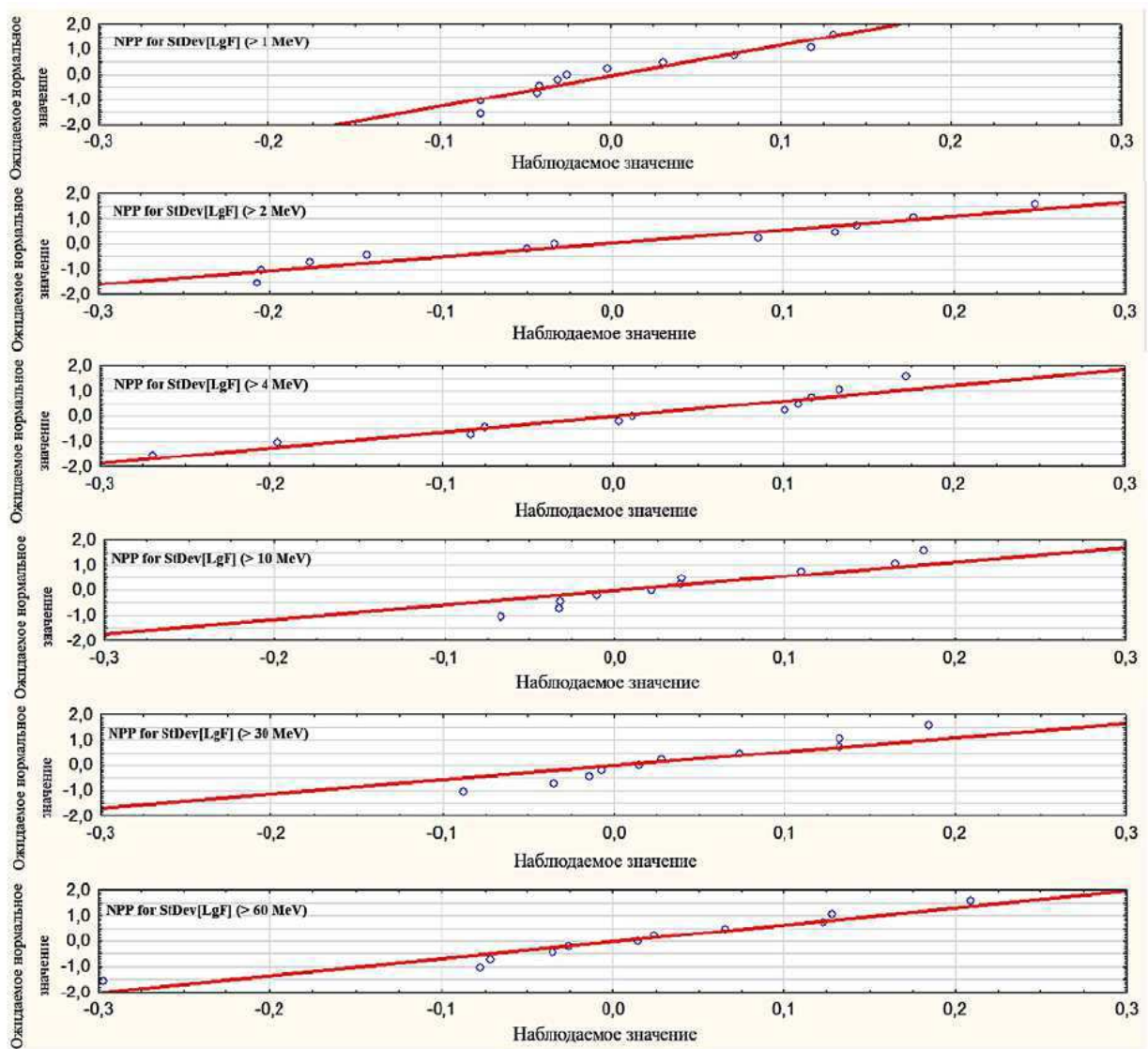


Рис. 2: Проверка на нормальность при помощи нормальной вероятностной бумаги (Normal Probability Plot) для StDev[LgF](>1 МэВ), StDev[LgF](>2 МэВ), StDev[LgF](>4 МэВ), StDev[LgF](>10 МэВ), StDev[LgF](>30 МэВ), StDev[LgF](>60 МэВ)

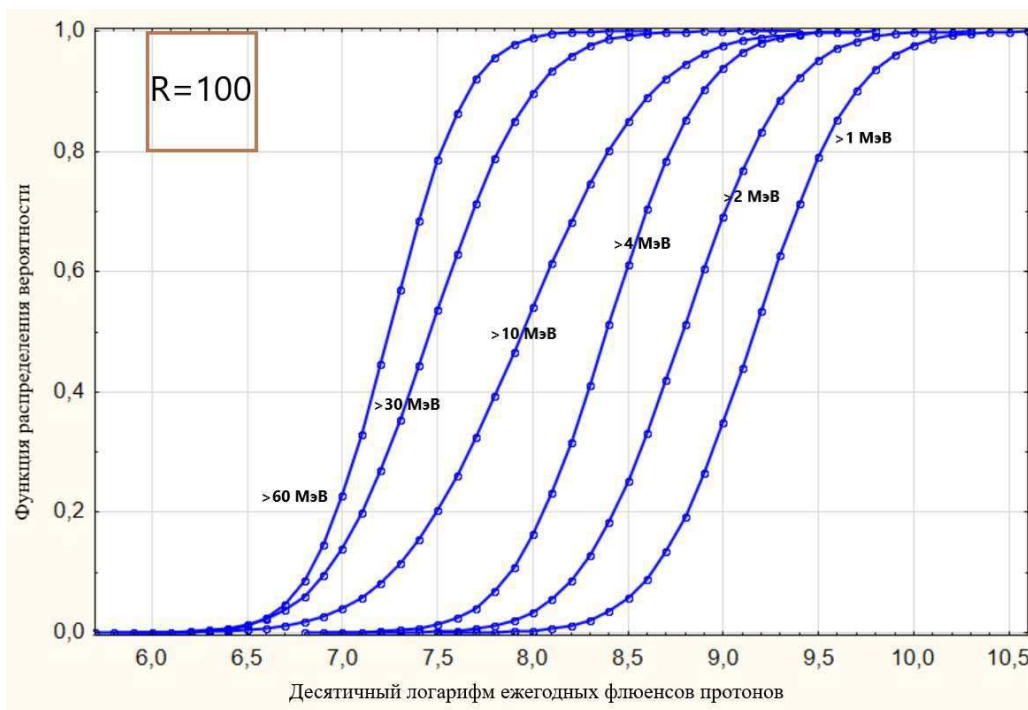


Рис. 3: Пример нормальной функции распределения вероятности для десятичного логарифма годового флюенса протонов  $LgF$  ( $>1$  МэВ;  $>2$  МэВ;  $>4$  МэВ;  $>10$  МэВ;  $>30$  МэВ;  $>60$  МэВ) при  $R = 100$

некоторой величины при определенном значении числа Вольфа. Необходимо подчеркнуть, что обычно вычисляется лишь наиболее вероятное значение, тогда как в данном случае проделана работа существенно иного

уровня: используя среднее значение и стандартное отклонение десятичных логарифмов флюенсов протонов, была рассчитана интегральная функция распределения вероятности.

[1] Mottl D., Nymmik R. The issues of reliability of solar energetic proton flux data bases and models, CD: 35th COSPAR Scientific Assembly 2004. (Paris, France, 18-25 July 2004), Accepted for publication in Adv. Space Res., 2005.  
 [2] Гецелев И. В., Подзолко М. В., Веселовский И. С. Астрономический вестник. 2009. **43**, № 2. С. 145.  
 [3] Панасюк М. И., Сигаева Е. А., Ныммик Р. А. и др. Проведение углубленного анализа имеющихся экспериментальных данных о радиационных нагрузках, которые будет испытывать космическая техника и экипажи при межпланетных полетах. Формирование рациональных ва-

риантов радиационной защиты для случаев полетов на Луну (в том числе – для долговременного пребывания на окололунной орбите и на поверхности луны), на Марс, на астероиды, в системы планет-гигантов. Научно-технический отчет. НИИЯФ МГУ. Москва, 2009.  
 [4] <http://sidc.oma.be/silso/datafiles>.  
 [5] [https://omniweb.sci.gsfc.nasa.gov/ftpbrowser/flux\\_ogg.html](https://omniweb.sci.gsfc.nasa.gov/ftpbrowser/flux_ogg.html).  
 [6] Normal Probability Plot: <https://documentation.statsoft.com/STATISTICAHelp.aspx?path=Graphs/Graph/UnderstandingGraphs/Concepts/ConceptualOverviewsNormalProbabilityPlots>

## Relationship between the values of proton fluxes outside the Earth’s magnetosphere and solar activity

Y. B. Trutovskaya<sup>1,a</sup>, S. A. Krasotkin<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>Chair of Space Physics, Physics Department, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

<sup>2</sup>Chair of Space Physics, Physics Department, and Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

E-mail: <sup>a</sup>kikulia@list.ru, <sup>b</sup>sergekras@rambler.ru

The necessity for long-term forecast of proton fluxes in near-Earth space is explained by the need to ensure the safety of space missions. In the article the data on proton fluxes outside the Earth’s magnetosphere for 1972-2018, obtained on board IMP and

GOES series is analyzed. The dependences of the average annual proton fluxes (for energies  $>1$  MeV,  $>2$  MeV,  $>4$  MeV,  $>10$  MeV,  $>30$  MeV,  $>60$  MeV) and their standard deviations from the Wolf numbers were revealed, and the pattern of distribution of proton fluxes was derived. The constructed probability distribution functions of the average annual proton fluxes for given values of the Wolf numbers allow us to estimate the probability that the average annual value of proton fluxes will not exceed a certain value for integer Wolf number.

PACS: 94.20.wq, 96.40.Fg, 94.05.Sd

*Keywords:* Near-Earth space, Solar activity, Wolf numbers, proton fluence, probability distribution function.

*Received 20 June 2019.*

#### **Сведения об авторах**

1. Трутовская Юлия Борисовна — студентка; e-mail: kikulia@list.ru.
  2. Красоткин Сергей Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, ассистент; e-mail: sergekras@rambler.ru.
-