

УДК 523.9, 533.9

## МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ – СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И НАБЛЮДЕНИЙ

<sup>1</sup>И.М. Подгорный, <sup>2</sup>Э.В. Вашенюк, <sup>3</sup>А.И. Подгорный

## THE SOLAR FLARE MODEL: COMPARISON BETWEEN NUMERICAL SIMULATION AND OBSERVATION RESULTS

I.M. Podgorny, E.V. Vashenyuk, A.I. Podgorny

Электродинамическая модель вспышки основана на численном трехмерном моделировании с использованием реального магнитного поля активной области. Показано, что в магнитном поле токового слоя в короне происходит накопление энергии  $\sim 1032$  эрг, необходимой для солнечной вспышки. Тепловой рентгеновский источник в короне вызван нагревом плазмы в токовом слое при пересоединении. Источники жесткого рентгеновского излучения располагаются на поверхности Солнца у оснований петли. Они образуются при выпадении пучков электронов, ускоренных в продольных токах. Солнечные космические лучи возникают при ускорении в электрическом поле вдоль магнитной особой линии X-типа. Обсуждается также механизм генерации запаздывающей компоненты космических лучей.

The electrodynamic flare model is based on the numerical 3D simulation with a real magnetic field of an active region. It is shown that energy ( $\sim 1032$  Erg) necessary for a solar flare accumulates in the magnetic field of the current sheet. The heat X-ray source in the corona is produced by the plasma heating in the current sheet on reconnection. Hard X-ray sources are located on the solar surface at bases of the loop. They are derived from precipitation of electron beams accelerated in longitudinal currents. Solar cosmic rays appear in accelerating in the electron field along the singular magnetic X-type line. The mechanism is also discussed of generation of the delayed cosmic-ray component.

### Введение

Солнечная вспышка включает в себя ряд наблюдательных проявлений (жесткое рентгеновское излучение, радиоизлучение, эжекция корональной массы и солнечные космические лучи). Каждая вспышка сугубо индивидуальна. Не все вспышечные явления всегда проявляются одинаково. Некоторые из них в отдельных вспышках отсутствуют. Солнечная вспышка возникает в короне над активной областью в результате взрывного выделения энергии из-за диссипации энергии, запасенной в магнитном поле [1]. Однако не вся энергия магнитного поля может быть реализована при вспышке. Распределение поля на фотосфере в момент вспышки практически не меняется. Это значит, что энергия потенциального поля, т. е. поля источников Солнца, не реализуется при вспышке. Реализуется при вспышке только магнитная энергия токов в короне, которая успела накопиться в предвспышечном состоянии. Первым, кто обратил внимание на возможность образования токового слоя (ТС) в короне в окрестности особой линии магнитного поля за счет возмущений, идущих от фотосферы, был С.И. Сыроватский. Позже в численном МГД-эксперименте было показано, что всплывание нового магнитного потока вблизи уже существующего потока образует в короне токовый слой, если потоки имеют противоположное направление [2]. В этих расчетах магнитное поле пятен активной области аппроксимировалось магнитными диполями. В ряде работ использовалась и аппроксимация магнитными зарядами. Такой упрощенный подход позволил построить модель солнечной вспышки, объясняющую наиболее типичные наблюдения генерации жесткого рентгеновского излучения, радиоизлучения, эжекции корональной массы и возникновения солнечных космических лучей [1, 3]. Альтернативное объяснение вспышки состоит в выбросе магнитного жгута за счет его отгаливки собственным магнитным полем от поверхности Солнца. Ускоренный жгут может вытянуть линии магнитной арки с образованием токового слоя, а распад слоя вызовет вспышку.

Однако до сих пор никто не наблюдал возникновения магнитного жгута перед вспышкой. Для выяснения, какой из этих механизмов может произвести вспышку, необходим трехмерный численный МГД-эксперимент, где в качестве начального поля используется потенциальное поле над активной областью, вычисленное за несколько дней до вспышки, когда активность области практически не проявляется. Граничные условия на фотосфере необходимо задавать с использованием карт магнитного поля, включающих большую площадь, чтобы использовать магнитный поток не только ярко выраженных пятен, но поток относительно слабого поля на большой поверхности. Такой метод в настоящее время разработан и внедрен в программу «ПЕРЕСВЕТ». На примере конкретных вспышек показано, что токовые слои действительно возникают перед серией вспышек, но никаких признаков создания ТС выбросом жгута не обнаружено. Сам ТС при распаде ускоряет плазму за счет магнитного натяжения, создавая корональный выброс.

### Электродинамическая модель вспышки

Численное МГД-моделирование предвспышечного состояния показало, что ТС образуется в короне в окрестности особой линии магнитного поля при фокусировке возмущений, приходящих от фотосферы, в частности при всплывании нового магнитного потока, противоположно направленного старому потоку активной области [1, 2]. Простейшей особой линией является нулевая линия X-типа. ТС устойчиво существует длительное время, и в его магнитном поле запасается энергия  $\sim 10^{32}$  эрг, быстро выделяющаяся при солнечной вспышке, когда ТС переходит в неустойчивое состояние. В зависимости от конфигурации начального магнитного поля и нового всплывающего потока ТС может иметь различный наклон к поверхности Солнца. Распад вертикального слоя сопровождается выбросом корональной массы.

Высокая устойчивость ТС при его образовании обусловлена присутствием в ТС нормальной составля-

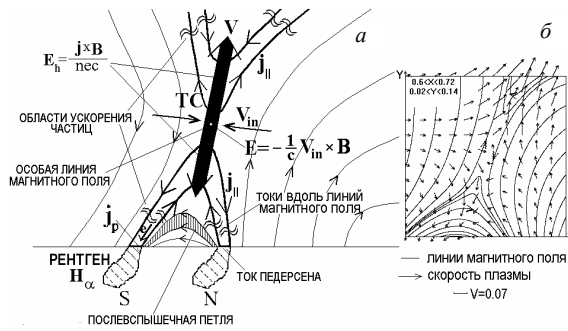


Рис. 1. Электродинамическая модель вспышки (а). Тонкими линиями и стрелками показаны линии магнитного поля, жирными линиями и стрелками – продольные токи. Линии магнитного поля и вектора скорости в токовом слое по данным численного МГД-эксперимента (б).

ющей магнитного поля (ТС не является нейтральным) и течением плазмы вдоль слоя. Затем наступает квазистационарная эволюция ТС, в ходе которой полная масса плазмы в ТС медленно падает со временем вследствие эжекции из ТС потока плазмы, ускоренной силой магнитного натяжения. Происходит перераспределение плотности плазмы по толщине слоя, так что плотность плазмы в центре слоя практически не меняется, а вблизи его границы падает. В результате такой эволюции ТС переходит в неустойчивое состояние, и происходит быстрая диссипация магнитной энергии, запасенной в поле ТС [4].

Главным механизмом диссипации при взрывном распаде слоя является магнитное пересоединение, вызывающее нагревание плазмы в окрестности особой линии. Модель солнечной вспышки для вертикального токового слоя показана на рис. 1, а, а на рис. 1, б представлен результат численного МГД-моделирования ТС, возникшего при всплывании нового магнитного потока рядом со старой биполярной областью. Стрелками показаны векторы скорости плазмы. Плазма со скоростью  $V_{in}$  втекает в ТС с обеих его сторон вместе с вмороженными линиями магнитного поля и после пересоединения линий поля растекается вдоль ТС вверх и вниз (рис. 1, б). Сила  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}/c$  ускоряет плазму, и поток плазмы вверх приводит к эжекции солнечного вещества в межпланетное пространство – возникает корональный выброс. Плазма, ускоренная вниз, образует вместе с сокращающимися линиями магнитного поля послевспышечные петли. Нагревание плазмы за счет быстрого магнитного пересоединения при распаде ТС обеспечивает высокую температуру над петлями, а следовательно, возникновение там рентгеновского излучения, впервые зарегистрированного на аппаратах Yohkoh и RHESSI [5].

Важной особенностью корональных ТС является генерация в слое электрического поля Холла  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}/nc$ , направленного вдоль слоя. Вследствие высокой анизотропии проводимости плазмы в магнитном поле короны, поле Холла генерирует электрические токи вдоль линий магнитного поля, пересекающих ТС. Продольные токи и их направление показаны на рис. 1, а жирными линиями. Эти токи замыкаются в хромосфере токами Педерсена благодаря присутствию там нейтральных атомов.

Электроны, ускоренные в направленном вверх продольном токе, высыпаются в хромосферу и вызывают свечение вспышечных лент и жесткое рентгеновское излучение на поверхности Солнца. Процесс генерации свечения здесь аналогичен механизму, вызывающему полярные сияния. В типичном случае энергия при вспышке может достигать сотни кэВ.

Условия для генерации релятивистских частиц солнечных космических лучей создаются в окрестности особой линии магнитного поля. В частном случае это линия нулевого магнитного поля. На рис. 1 особая линия перпендикулярна плоскости рисунка. Электрическое поле  $-\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c$  возникает при втекании плазмы в ТС. Оно направлено перпендикулярно плоскости рисунка. Здесь  $V$  – скорость втекания плазмы в слой, т. е. скорость пересоединения;  $B$  – магнитное поле ТС. Частицы (ионы и электроны) могут ускоряться вдоль особой линии в ее окрестности в электрическом поле  $-\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c$ . При максимальной скорости втекания, близкой к альфвеновской скорости, энергия протонов, в принципе, может превышать сотни ГэВ. Частицы, находящиеся дальше от особой линии, дрейфуют в скрещенных электрическом и магнитном полях. Частица, отклонившаяся от X-линии и попавшая в область дрейфа, выходит из режима ускорения.

#### Рентгеновское излучение вспышки

Рентгеновские исследования на аппарате Yohkoh, а затем на RHESSI показали появление центров рентгеновского излучения, возникающего при вспышке [5]. На рентгеновских фотографиях вспышек, происшедших на краю солнечного диска, наблюдаются три источника излучения (рис. 2, б). Два источника расположены на поверхности Солнца в подножьях вспышечной петли, излучающей кванты с энергией  $\sim 1$  кэВ. Эти поверхностные источники обладают степенным спектром  $\sim (h\nu)^{-2.5}$ . Они вызваны высыпанием вдоль линий поля электронными пучками с энергией большей 100 кэВ в соответствии с предсказаниями электродинамической модели. Ускорение происходит в продольных токах, генерируемых полем Холла. Третий источник расположен над вспышечной петлей в короне, именно там, согласно электродинамической модели, должен располагаться источник излучения, возникший из-за нагревания плазмы при пересоединении в ТС. Корональный источник расположен в окрестности особой линии X-типа. В отличие от поверхностных источников, корональный источник имеет тепловой характер, его спектр отвечает температуре  $\sim 3$  кэВ и концентрации  $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Магнитное поле  $B = (8\pi nkT)^{1/2}$ , удерживающее облако этой горячей плазмы, равно  $\sim 100$  Гс – типичное значение для поля ТС, вычисленного в численном МГД-эксперименте. Полная масса плазмы в источнике  $\sim 10^{15}$  г равна массе типичного коронального выброса.

#### Спектр солнечных космических лучей

1. Широкий диапазон энергий (до  $\sim 20$  ГэВ), измеряемый нейтронными мониторами, позволяет с высокой точностью измерять спектры солнечных космических лучей, сопровождающих вспышку. Мировая сеть станций нейтронных мониторов может рассматривать-

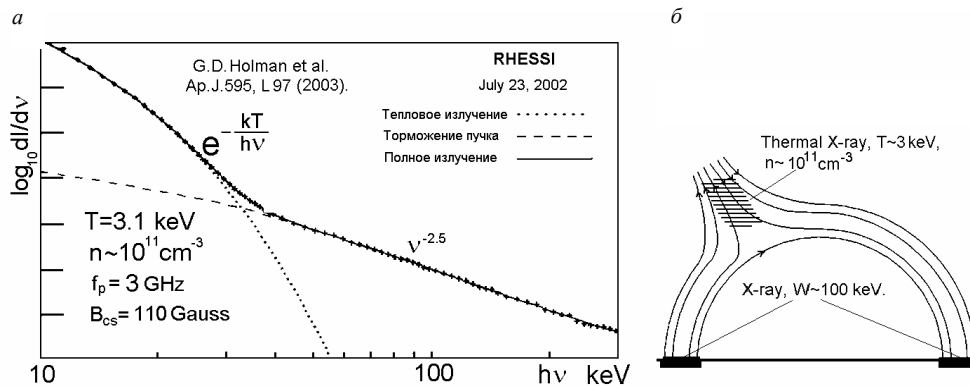


Рис. 2. Рентгеновский спектр вспышки (а) и схема положения источников в магнитном поле по данным RHESSI (б).

ся как единый многонаправленный спектрометр космических лучей. Методика определения характеристик релятивистских солнечных протонов состоит из нескольких этапов:

2. Определение асимптотических направлений прихода к границе магнитосферы протонов разных энергий, образующих нейтроны в атмосфере над данной станцией, путем расчета траекторий частиц, движущихся в обратном направлении, с массой протона, но отрицательным зарядом в модельной магнитосфере. Вычисление откликов нейтронных мониторов мировой сети при различных параметрах потока релятивистских солнечных протонов на границе магнитосферы.

3. Определение методом решения обратной задачи (оптимизация) параметров потока протонов из сравнения рассчитанных откликов нейтронных мониторов с наблюдаемыми.

Поток протонов возникает от вспышек, происшедших на западной части солнечного диска. Фронт импульса (так называемая «быстрая» компонента) начинает регистрироваться через время  $\Delta t \sim 11$  мин, определяемое временем пролета частицы вдоль спирали Архимеда. Поскольку импульс  $\gamma$ -излучения, вызванного ядерными реакциями на Солнце, не превышает нескольких минут, можно утверждать, что длительность генерации релятивистских частиц не превышает десяти минут. Однако нейтронные мониторы демонстрируют длительность потока релятивистских протонов, измеряемую часами. Такие запаздывающие протоны не могут принадлежать к прямому потоку от области вспышки. Они или генерируются с запаздыванием вдали от Солнца (например, в ударной волне), или приходят к Земле в результате диффузии поперек магнитного поля. Возникает вопрос: как согласуются измеренные спектры протонов с современным представлением о вспышке? Главным результатом, обобщенным в работе [6], является принципиальное различие спектров быстрой и запаздывающей компонент.

Для демонстрации спектра быстрой компоненты, т. е. частиц, приходящих с пролетным временем вдоль линий межпланетного магнитного поля, и спектра запаздывающей на десятки минут компоненты в данной работе приведен анализ частиц одной из самых мощных протонных вспышек, которая позволила получить спектры для нескольких моментов времени.

Показания нейтронных мониторов, расположенных в различных местах, могут существенно отличаться (рис. 3). Расположение станций таково, что одна из них (Лидс, Англия) регистрирует главным образом поток частиц, приходящий от вспышки непосредственно вдоль линии межпланетного поля, а другая (Оттава, Канада) – в основном запаздывающий поток.

Изотропный запаздывающий поток регистрируется, как правило, на значительно большем числе станций. Цифрами обозначены моменты времени, для которых были получены спектры с использованием международной сети нейтронных мониторов.

Все спектры представлены в двойном логарифмическом и полулогарифмическом масштабах.

Спектр 1, полученный для начальной фазы события, хорошо описывается линейной зависимостью в полулогарифмическом масштабе (рис. 2, б), т. е. является экспоненциальным  $\sim \exp(-E/E_0)$ , где  $E_0 = 1.3$  ГэВ. Частицы спектра 1 приходят к орбите Земли с малыми питч-углами и регистрируются мониторами через  $\sim 15$  мин после начала вспышки, что указывает на движение протонов вдоль линий межпланетного поля непосредственно из места ускорения. Спектры 2, 3 и 4, снятые через 0.5, 1 и 2 ч после начала регистрации события, хорошо описываются линейной зависимостью в двойном логарифмическом масштабе, т. е. уверенно демонстрируют степенную зависимость  $\sim E^{-\gamma}$ , где  $\gamma = 5$ .

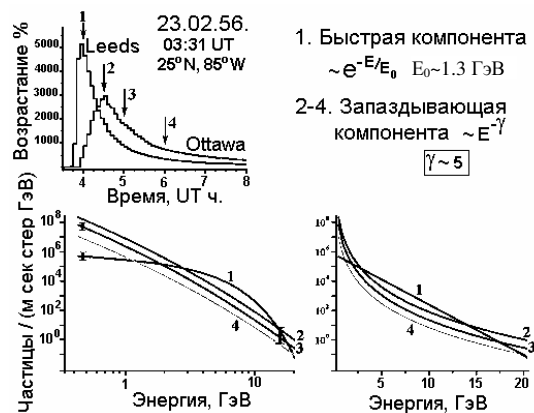


Рис. 3. Потоки релятивистских протонов от вспышки 23.02.1956 г. для двух мониторов и спектры в двойном логарифмическом и полулогарифмическом масштабах для моментов времени, отмеченных цифрами.

Наличие двух компонент однозначно продемонстрировано к настоящему времени в ряде событий, при этом значения  $E_0$  и  $\gamma$  не сильно отличаются для различных событий.  $E_0$  чаще всего лежит в пределах 0.5–1 ГэВ,  $\gamma$  находится в пределах 4–6 [6–8].

#### Механизм ускорения заряженных частиц вдоль особых линий магнитного поля

Эффективность ускорения частиц электрическим полем  $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c$ , направленным вдоль особой линии магнитного поля, следует из лабораторных экспериментов с мощным импульсным разрядом, которые ставились в связи с проблемой управляемого термоядерного синтеза. Здесь  $V$  – скорость плазмы в магнитном поле  $B$ . Было показано [9], что газовый разряд в цилиндрической разрядной камере при скорости возрастания тока порядка  $10^{11}$  А/с становится источником жесткого рентгеновского излучения. Максимальная энергия квантов превосходила 300 кэВ, в случае когда приложенное между электродами напряжение не превышает 10–13 кВ. При разряде в дейтерии регистрируется и нейтронное излучение, вызванное ядерными реакциями при появлении ускоренных ядер дейтерия [10].

Механизм появления быстрых частиц в мощном импульсном разряде основан на генерации электрического поля вдоль особой линии магнитного поля. В магнитном поле прямого тока особая линия совпадает с осью разряда. Это линия нулевого поля О-типа, вдоль которой могут ускоряться частицы при возникновении достаточно большого электрического поля. Исследование динамики разряда при токе 200 кА показало, что вначале ( $t=0$ ) плазма заполняет всю разрядную камеру, ток из-за скин-эффекта течет вблизи стенок разрядной камеры (рис. 4) ( $t=0$ ) и его магнитное поле сжимает плазму к оси. Распределение тока показано внизу. Радиус столба разряда уменьшается от 10 см до 1 см. При этом скорость сжатия превосходит  $10^7$  см/с, а магнитное поле в сжимающейся плазме  $\sim 3 \times 10^4$  Гс (рис. 4,  $t = 3 \cdot 10^{-6}$  с). Поле Лоренца  $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c$  в это время составляет  $\sim 3$  кВ/см, т. е. полная разность потенциалов на длине разряда, равной 1 м, обеспечивает ускорение частиц. Дальнейшему сжатию препятствует возросшее давление плазмы, температура возрастает до 100 эВ, а концентрация до  $10^{17}$  см $^{-3}$ . Специально поставленный эксперимент [11], в котором ускоренные частицы могли выходить через отверстие в электроде, показал, что эти частицы действительно ускоряются вдоль оси разряда. Во время максимальной скорости сжатия плазменного разряда они приобретают энергию  $N$  большую 300 кэВ.

Сжатие прекращается, когда давление сжатого ионизованного газа становится равным давлению магнитного поля. Длительность наблюдаемого потока ускоренных частиц составляла доли микросекунды. При ускорении в ТС втекание плазмы в слой не вызывает такого сильного повышения давления. В окрестности Х-линии токового слоя происходит пересоединение линий поля, плазма втекает в слой и растекается вдоль него. Поэтому электрическое поле  $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c$ , а следовательно, и ускорение частиц может происходить значительно дольше. Имеется еще

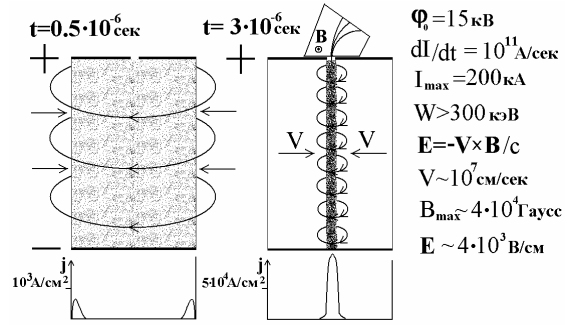


Рис. 4. Лабораторный эксперимент, демонстрирующий ускорение частиц полем Лоренца.

одно отличие процесса ускорения в Х-точке. В окрестности О-линии на каждую отклонившуюся от оси частицу действует сила  $eV_e \times \mathbf{B}/c$ , препятствующая ее уходу из области ускорения. Здесь  $V_e$  – скорость ускоряемой частицы. В окрестности Х-линии такая фокусирующая сила действует только поперек слоя, а в перпендикулярном направлении частица отклоняется от Х-линии слабым поперечным магнитным полем. В результате, пройдя некоторое расстояние в режиме ускорения, частицы уходят из области ускорения. Этим объясняется экспоненциальный характер спектра протонов, ускоренных в ТС. Расчет траекторий частиц, ускоряемых вдоль нейтральной Х-линии, подтвердил экспоненциальность спектра [6].

#### Заключение

Тепловое рентгеновское излучение вспышки возникает в короне в том месте, где МГД-моделирование показывает появление токового слоя. Жесткое рентгеновское излучение со степенным спектром вызывается пучками электронов, ускоренных в продольных токах. Расчет спектра частиц, ускоренных электрическим полем в окрестности Х-линии магнитного поля [6], указывает на экспоненциальный его характер. Экспоненциальный спектр быстрой компоненты солнечных космических лучей, а также оценка величины лоренцевского электрического поля и совпадение времени излучения  $\gamma$  и жесткого рентгеновского излучения вспышки позволяют сделать заключение о генерации быстрой компоненты солнечных космических лучей в ТС. Вопрос о механизме генерации запаздывающей компоненты более сложен. Всегда возникает соблазн связать ее с ускорением частиц в ударной волне. Однако большой показатель степени запаздывающей компоненты, по-видимому, не подтверждает такого предположения. Возможно, все частицы имеют единый механизм происхождения в момент вспышки, но часть их не может достичь орбиты Земли, двигаясь вдоль линии межпланетного поля, и, диффундируя поперек поля, эти частицы изменяют свой спектр за счет рассеяния на флуктуациях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 06-02-16006.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подгорный А.И., Подгорный И.М. Модель солнечной вспышки: сопоставление с наблюдением высокоэнергетичных процессов // *Астрономический журнал*. 2006. Т. 83. С. 940–949.

2. Подгорный И.М., Подгорный А.И. МГД-моделирование образования токового слоя над биполярной областью // *Астрономический журнал*. 2003. Т. 80. С. 753–760.
3. Podgorny A.I., Podgorny I.M. Solar flare model including the formation and distruction of the current sheet in the corona // *Solar Phys.* 1992. V. 139. P. 125–145.
4. Podgorny A.I. The magnetohydrodynamical instability of a current sheet created by plasma flow // *Plasma Phys. Controled Fusion*. 1989. V. 31. P. 1271–1279.
5. Lin R.P., Krucker S., Hurford G.J., et al. RHESSI observation of partcle acceleration and energy release in solar flare // *Astrophys. J.* 2003. V. 595. P. L69–L76.
6. Балабин Ю.В., Вашенюк Э.В., Мингалев О.В., Подгорный А.И., Подгорный И.М. Спектр солнечных космических лучей: данные наблюдений и модельных расчетов // *Астрономический журнал*. 2005. Т. 82. С. 940–949.
7. Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Miroshnichenko L.I. Relativistic solar protons in the Ground Level Event of 23 February 1956: New study // *Adv. Space Res.* 2007. (in print).
8. Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Perez-Peraza J., et al. Some features of the sources of relativistic particles at the Sun in the solar cycles 21–23 // *Adv. Space Res.* 2006. V. 36, N 3. P. 411–417.
9. Лукьянов С.Ю., Подгорный И.М. Жесткое рентгеновское излучение, сопровождающее разряд в газе // *Атомная энергия*. 1956. № 3. С. 93–103.
10. Арцимович Л.А., Доброхотов Е.И., Лукьянов С.Ю. и др. Нейтронное излучение газового разряда // *Атомная энергия*. 1956. № 3. С. 84–87.
11. Подгорный И.М., Ковальский Н.Г., Пальчиков В.Е. Электроны, вызывающие жесткое рентгеновское излучение импульсных разрядов // *Докл. АН СССР* 1958. Т. 123. С. 825–828.

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН, Москва

<sup>2</sup>Полярный геофизический институт КНЦ РАН, Апатиты

<sup>3</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва