

УДК 537.591

**И. И. Залюбовский, В. М. Карташев, В. Е. Ковтун,  
О. К. Минко, Е. С. Шматко**

Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна

**Всплески потока быстрых нейтронов  
на поверхности Земли как завершение процесса  
высыпания энергичных протонов  
из зон захваченной радиации**

---

Розглядається можливість непрямого наземного детектування сплесків енергійних протонів, що висипаються із внутрішнього радіаційного поясу Землі. Показано, що сплески протонів трансформуються у сплески швидких атмосферних нейтронів. Ефективна реєстрація сплесків нейтронів можлива на низьких широтах за допомогою мюонно-нейтронного сцинтиляційного телескопа площею 5 м<sup>2</sup>.

---

**ВВЕДЕНИЕ**

В работе [2] описана физическая модель солнечно-земного триггерного процесса, заключительной стадией которого служат кратковременные всплески потоков электронов, высыпающихся из внутреннего радиационного пояса Земли. Прежде чем поглотиться в атмосфере, электроны испускают всплески частично когерентного синхротронного ВЧ-радиоизлучения, которые можно регистрировать наземными устройствами. Там же [2] предложен проект наземной нелокальной экспериментальной установки с пунктами базирования в Харькове, Киеве и Евпатории, с помощью которой предполагается изучить механизм высыпания энергичных электронов и весь солнечно-земной триггерный процесс в целом. Регистрация высыпающихся вместе с электронами энергичных протонов не была предусмотрена, главным образом по причине удорожания проекта. Между тем метод косвенного наземного их детектирования есть и будет описан ниже.

**ПРОТОНЫ ВО ВНУТРЕННЕМ РАДИАЦИОННОМ  
ПОЯСЕ ЗЕМЛИ**

Внутренние зоны захвата невозмущенной магнитосферы Земли заполняются протонами (и частично электронами) в результате постоянно действующего нейтронно-альбедного механизма космических лучей [1]. Согласно нему примерно 20 % нейтронов, рожденных в ядерных взаимодействиях галактических космических лучей в верхней атмосфере Земли, испускается в обратном направлении с интенсивностью порядка 1 см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Достигая внутренних зон захвата и распадаясь на протоны, электроны и антинейтрино, нейтроны обеспечивают наблюдаемые поток и энергетический спектр захваченных протонов. В возмущенной магнитосфере увеличивается утечка протонов из радиационных поясов, но включаются дополнительные механизмы их пополнения. При возвращении магнитосферы в исходное состояние поток захваченных протонов восстанавливается, и баланс между плотностью

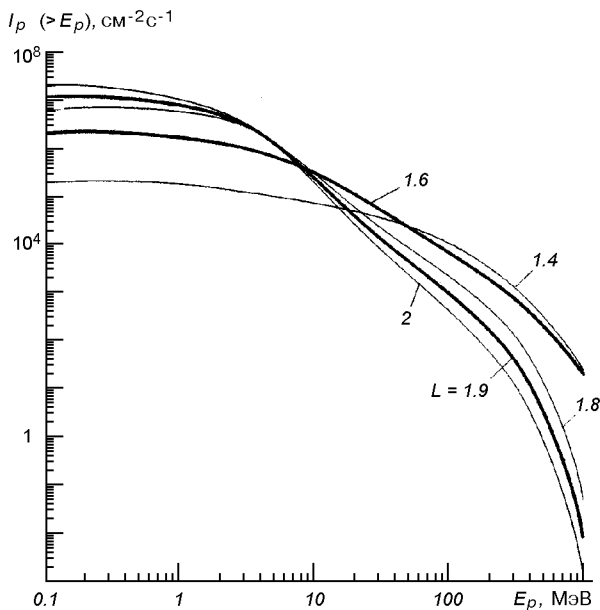


Рис. 1. Интегральные энергетические спектры захваченных протонов в области геомагнитного экватора на различных дрейфовых L-оболочках внутреннего радиационного пояса в период минимума солнечной активности.  $L = 1.9$  — широта Киева и Харькова,  $L = 1.6$  — широта Евпатории

энергии магнитного поля и плотностью кинетической энергии захваченных частиц снова соблюдается.

На рис. 1 показаны интегральные энергетические спектры захваченных протонов в области геомагнитного экватора на различных дрейфовых L-оболочках внутреннего радиационного пояса в период минимума солнечной активности [4]. Энергетические спектры, соответствующие широте Киева и Харькова, принадлежат  $L = 1.9$ , а широте Евпатории —  $L = 1.6$ . Очевидно, что спектры становятся жестче при движении к низким широтам, и при энергии протонов  $E_p \sim 1$  ГэВ их интенсивность на дрейфовых оболочках, замыкающихся, соответственно, на широте Евпатории и широте Киева и Харькова, различаются более чем на три порядка. Поэтому косвенное наблюдение высыпающихся протонов на низких широтах, как будет показано в дальнейшем, более эффективно, чем на высоких, несмотря на значительную устойчивость внутренних зон захваченной радиации.

#### О ПРЯМОЙ РЕГИСТРАЦИИ ВЫСЫПАЮЩИХСЯ ПРОТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ

Прямое наблюдение высыпающихся протонов и электронов на искусственных спутниках Земли,

орбиты которых проходили ниже радиационных поясов, проводилось неоднократно.

Главными недостатками этих наблюдений, по мнению авторов, были:

- 1) небольшая площадь детекторов заряженных частиц,
- 2) сравнительно большое время накопления числа импульсов,
- 3) отсутствие привязки к определенной дрейфовой L-оболочке вследствие быстрого движения спутника,
- 4) высокая стоимость спутниковых экспериментов,
- 5) ограниченное время их проведения.

Главным достоинством следует признавать сам факт прямого детектирования и идентификации частиц. Целенаправленные баллонные эксперименты не получили распространения. Обычно с их помощью решались другие задачи. Тем не менее, именно на высотных аэростатах возможна прямая регистрация энергичных высыпающихся заряженных частиц в пределах одной и той же магнитной оболочки. Высыпающиеся электроны с кинетической энергией более 20 МэВ и протоны с энергией более 200 МэВ достигают высоты полета аэростата (30—33 км). Согласно [5] электроны с такой энергией в радиационных поясах отсутствуют, по крайней мере в спокойной магнитосфере. Относительно недавние измерения [3] показывают, что во внутреннем радиационном поясе есть потоки захваченных электронов с энергией  $15 \div 200$  МэВ, но их интенсивность на четыре порядка ниже.

Иллюстрацией всему сказанному может послужить эксперимент физиков Московского инженерно-физического института на высотном аэростате, в котором были зарегистрированы всплески потоков энергичных электронов и протонов как побочный продукт наблюдения энергичных космических гамма-квантов при помощи гамма-телескопа «Наталья-1» [7, 8]. Заряженные частицы детектировались тремя каналами интенсивметров, входящих в систему защиты основного канала регистрации космических гамма-квантов с энергией  $E_\gamma > 5$  МэВ.

На рис. 2 показан пример записи серии всплесков высыпающихся во время магнитосферной бури заряженных частиц, который взят из работы [7].

Длительность отдельных всплесков не превосходила времени накопления импульсов, равного 5 с. В канале интенсивметров I2 регистрировались электроны и протоны с энергиями  $E_e \geq 20$  МэВ и  $E_p > 500$  МэВ, приходящие из верхней полусферы. По оценке [7] плотность потока высыпающихся протонов с энергией  $E_p > 500$  МэВ во всплеске составляла  $I_p (> 500 \text{ МэВ}) \approx 8 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ , что сравнимо с плотностью потока захваченных частиц (рис. 1). К сожалению, аэростатные эксперименты,

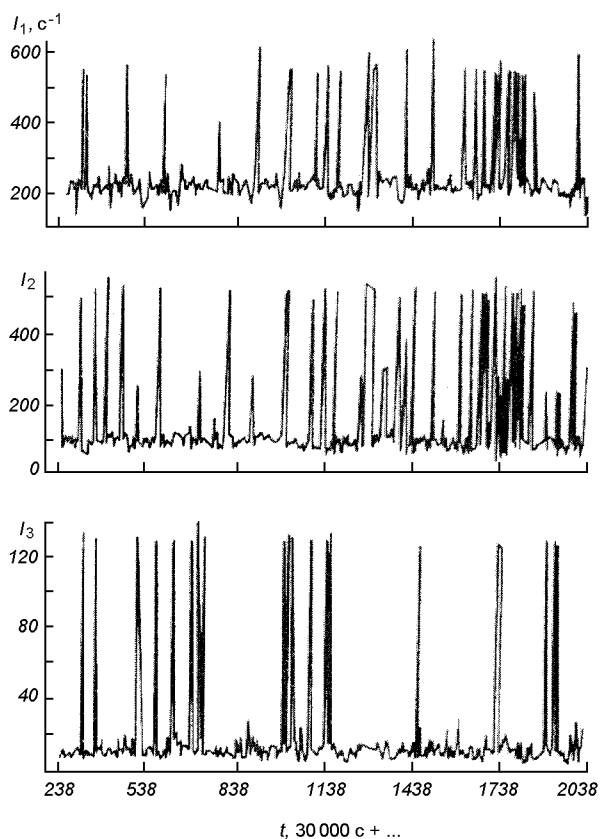


Рис. 2. Всплески интенсивности заряженных частиц, наблюдавшиеся 20 августа 1979 г. в полете аэростата на высоте 30—33,5 км и северной магнитной широте  $46^\circ$  [7].  $I_1$  — электроны с энергией  $E_e > 20$  МэВ и протоны с энергией  $E_p > 100$  МэВ в апертуре телескопа.  $I_2$  — электроны с энергией  $E_e > 20$  МэВ, протоны с энергией  $E_p > 500$  МэВ в апертуре телескопа с направлением из верхней полусферы.  $I_3$  — электроны с энергией  $E_e > 1.5$  МэВ и протоны с энергией  $E_p > 12$  МэВ, приходящие из всех направлений

описанные в работах [7, 8], продолжения не имели.

#### ПРОИСХОЖДЕНИЕ БЫСТРЫХ АТМОСФЕРНЫХ НЕЙТРОНОВ

Протоны — сильноионизирующие частицы. При низких энергиях ионизация — основной канал их потеря энергии. Минимум ионизации достигается в области кинетической энергии протонов  $E_p \sim 2m_p c^2$  ( $m_p$  — масса протона,  $c$  — скорость света). При входе в атмосферу из околоземного пространства протоны с энергией менее 500 МэВ поглощаются в атмосфере за счет ионизации, не достигнув высоты 15 км. Критическая энергия для протонов составляет 1 ГэВ. Начиная с этой энергии, ядерные неупру-

гие соударения с рождением вторичных адронов (главным образом, пионов) становятся преобладающими над ионизацией. Энергетический порог рождения пионов в pp-столкновениях составляет  $E_p \approx 290$  МэВ, но их заметный выход наблюдается при достижении протоном критической энергии. В среднем половина энергии протона уходит на рождение пионов. Еще одна часть энергии идет на ядерные расщепления, результатом которых является вылет из возбужденного ядра нейтронов, протонов, дейтронов, альфа-частиц и более тяжелых осколков испарительного происхождения. Средняя энергия ядерных расщеплений, по крайней мере в интервале энергий налетающих протонов  $1—10^3$  ГэВ, слабо зависит от первичной энергии и составляет для воздуха 400 МэВ/ядро [10]. Вторичные тяжелые заряженные частицы поглощаются за счет ионизации, поэтому цепь ядерных расщеплений могут продолжить только заряженные пионы (нейтральные пионы быстро распадаются) и нейтроны. Первичный протон, если его энергия достаточно велика, сохраняется, и может перезарядиться в нейтрон. В любом случае остается лидирующий нуклон, который участвует в ядерно-каскадном процессе, рождая пионы и производя ядерные расщепления. Таким образом, ядерные расщепления могут происходить по всей глубине атмосферы, а поверхности Земли достигают быстрые нейтроны даже в том случае, когда лидирующий нуклон уже поглотился. Коэффициент связи потока быстрых нейтронов на уровне моря и потока протонов с энергией  $E_p \sim 1$  ГэВ за пределами атмосферы составляет  $2 \cdot 10^{-3}$  [6]. Протоны с меньшими энергиями на уровне моря нейтронов не образуют. О потоке галактических протонов с энергией  $E_p > 6$  ГэВ можно судить по потоку атмосферных мюонов на уровне моря, которые рождаются в распадах заряженных пионов [6]. В радиационных поясах таких протонов не наблюдается, если не предполагать каких-либо ускорительных механизмов. Поэтому мюонные потоки на поверхности Земли можно использовать только для контроля галактического протонного потока, на фоне которого возникают протонные всплески магнитосферного происхождения.

#### МЮОННО-НЕЙТРОННЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ТЕЛЕСКОП ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ВСПЛЕСКОВ ПОТОКА ЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ

Структурная схема проекта мюонно-нейтронного сцинтилляционного телескопа изображена на рис. 3. Телескоп состоит из двух рядов пластмассо-

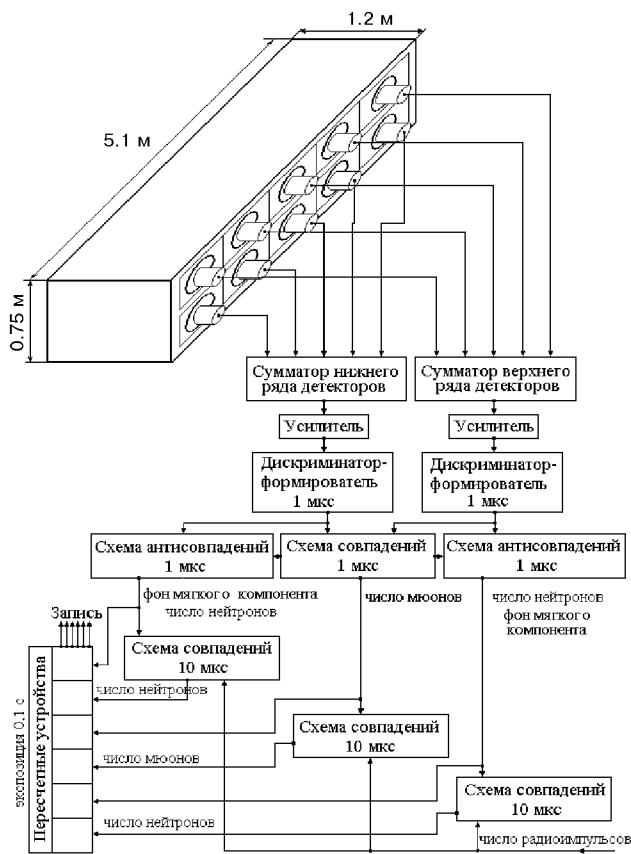


Рис. 3. Структурная схема проекта мюонно-нейтронного скителляционного телескопа, предназначенного для регистрации всплесков потока высыпавшихся магнитосферных протонов с энергией  $E_p > 1$  ГэВ.

вых сцинтилляторов с площадью каждого  $5 \text{ м}^2$  и толщиной  $5 \text{ см}$ . Для подавления фона мягкого компонента космических лучей и окружающей среды каждый ряд со всех сторон окружен слоем свинца толщиной  $5 \text{ см}$ . Верхний слой свинца служит также размножителем быстрых нейтронов ( $85 \%$  от полного числа при доле атмосферных нейтронов  $15 \%$ ). Быстрые нейтроны упруго рассеиваются на ядрах водорода в верхнем ряде детекторов и регистрируются по протонам отдачи вместе с атмосферными мюонами и остаточным фоном мягкого компонента. Мюоны детектируются независимо методом совпадений во времени импульсов из верхнего и нижнего рядов, а затем эти импульсы вычитаются из общего их числа в каждом ряде при помощи схем антисовпадений. Остаточный фон мягкого компонента частично дискриминируется, но полностью из общего числа счетов не исключается. Кроме того, в каждом ряде могут регистриро-

ваться мюоны, не попавшие в телесный угол телескопа, а в нижний ряд могут попадать быстрые нейтроны, пришедшие с боков. Поэтому непрерывный поток быстрых нейтронов, образованный потоком галактических космических лучей и регистрируемый верхним рядом детекторов, будет сопровождаться некоторым посторонним фоном. Однако измерение непрерывного потока быстрых нейтронов в данном случае не является самоцелью. Мало того, этот посторонний фон может быть оценен на основе показаний схем антисовпадений. Окончательное выделение нейтронных импульсов, принадлежащих нейтронным всплескам, производится схемой совпадений с разрешающим временем  $10 \text{ мкс}$  в случае попадания в этот интервал радиоимпульсов, входящих в состав всплесков высокочастотного синхротронного радиоизлучения высыпавшихся электронов [9]. Разрешающее время специально увеличено на порядок, чтобы нивелировать различие в тонкой временной структуре электронных и протонных всплесков, создаваемой, соответственно, электроно-циклотронной и протонно-циклотронной неустойчивостями в зоне захвата. Следует заметить, что совпадениями радиоимпульсов с нейтронными импульсами, вызванными высыпавшимися протонами, исключаются непрерывный фон нейтронов и остаточный фон мягкой компоненты и мюонов, поэтому отпадает необходимость в идентификации нейтронных всплесков на фоне флуктуаций потоков другой природы.

Ожидаемое число импульсов, регистрируемое мюонно-нейтронным телескопом за время отдельного всплеска, может быть оценено в результате использования следующих предположений: 1) высыпание протонов приводит к полному опустошению локальной зоны их захвата; 2) в каждом полушарии Земли высыпается половина захваченных протонов; 3) длительность всплеска высыпавшихся протонов равна половине баунс-периода для захваченных, т. е. порядка  $0.1 \text{ с}$ ; 4) развитие неустойчивости захваченных протонов происходит в области геомагнитного экватора; 5) при высыпании в атмосферу плотность потока протонов по сравнению с экваториальной возрастает на порядок, благодаря сохранению магнитного потока через орбиты вращающихся частиц; 6) регистрируются нейтроны, образованные протонами с энергией  $E_p \geq 1 \text{ ГэВ}$ ; 7) коэффициент связи нейтронных и протонных потоков равен  $2 \cdot 10^{-3}$ ; 8) соотношение атмосферных нейтронов и нейтронов, размноженных в свинцовой защите, соответственно,  $15 \%$  и  $85 \%$ ; 9) эффективность регистрации верхним рядом детекторов равна  $0.5$  из-за рассеяния атмосферных и размножающихся нейтронов в свинце в

заднюю полусферу; 10) при однократном рассеянии в пластмассовом сцинтилляторе нейтрон передает протону в среднем половину своей кинетической энергии; 11) площадь верхнего ряда детекторов равна  $5 \text{ м}^2$ .

Оценки приводят к следующему результату: для дрейфовой магнитной оболочки с  $L = 1.9$  ожидаемое число импульсов равно 1.4 за время всплеска на всю площадь телескопа, для  $L = 1.6$  — 3300 импульсов. По самым максимальным оценкам число импульсов от фоновых нейтронов, регистрируемое телескопом, не будет превосходить 15 за время всплеска. Экспериментальные измерения [9] показали, что за время всплеска регистрируется не более 5000 радиоимпульсов от высыпавшихся электронов. В этом случае только 1.5 фоновых нейтронных импульсов могут случайно совпасть с радиоимпульсами. Следует иметь в виду, что в силу локальности опустошающихся в результате высыпаний зон захвата и различных способов регистрации электронных и протонных событий, нейтронные всплески будут наблюдаться существенно реже, чем радиовсплески.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги, можно констатировать, что описанный мюонно-нейтронный сцинтилляционный телескоп отвечает задаче детектирования протонных высыпаний из зон захваченной радиации. Авторы считают, что в пределах Украины оптимальное место его расположения должно выбираться на территории Евпаторийского Центра приема научной информации, где планируется сооружение одного из пунктов наземной нелокальной экспериментальной установки для наблюдения солнечно-земных процессов [2]. На геомагнитной широте Евпатории ( $\lambda \approx 38^\circ$ ) предельный импульс геомагнитного обрезания вертикального потока галактических протонов  $P_{\text{lim}}(\lambda) = 14.8 \cos^4 \lambda \approx 5.7 \text{ ГэВ/с}$ , поэтому фоновый поток нейтронов меньше, а ожидаемые нейтронные всплески интенсивнее, чем на более высоких широтах, вследствие формирования сравнительно жесткого энергетического спектра у захваченных на  $L = 1.6$  протонов.

Единственный существующий в Украине нейтронный супермонитор принадлежит Главной астрономической обсерватории (ГАО НАНУ) и расположен в пос. Дымер в 50 км севернее Киева. Если

включить его в состав наземной нелокальной экспериментальной установки, то рядом с ним также необходимо сооружать радиофизический пункт регистрации электронных высыпаний.

1. Вернов С. Н., Вакулов П. В., Горчаков Е. В., Логачев Ю. И. Радиационные пояса Земли и космические лучи. — М.: Просвещение, 1970.—128 с.
2. Власенко В. П., Залюбовский И. И., Карташев В. М. и др. Перспективы наземного исследования солнечно-земных связей // Космічна наука і технологія. Додаток.—2003.—9, № 2.—С. 7—19.
3. Воронов С. А., Гальпер А. М., Колдашов С. В. и др. Энергетические и пространственные распределения электронов с энергией более 15 МэВ в радиационном поясе Земли // Изв. РАН. Сер. физ.—1997.—61, № 6.—С. 1126—1129.
4. ГОСТ 25645.138-86. Пояса Земли радиационные естественные. Модель пространственно-энергетического распределения плотности потока протонов. — М.: Изд-во стандартов, 1986.
5. ГОСТ 25645.139-86. Пояса Земли радиационные естественные. Модель пространственно-энергетического распределения плотности потока электронов. — М.: Изд-во стандартов, 1986.
6. Дорман Л. И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. — М.: Наука, 1975.—462 с.
7. Иудин А. Ф., Кириллов-Угрюмов В. Г., Котов Ю. Д. и др. Импульсное высыпание протонов с  $E_p > 500 \text{ МэВ}$  во время магнитной бури с оболочки  $L = 2$  // Письма в ЖЭТФ.—1983.—38, вып. 11.—С. 553—556.
8. Иудин А. Ф., Кириллов-Угрюмов В. Г., Котов Ю. Д. и др. Высыпание энергичных протонов на средних широтах, связанное с импульсным возмущением магнитосферы // Письма в ЖЭТФ.—1985.—41, вып. 4.—С. 140—143.
9. Карташев В. М., Лазарев А. В., Сорока Д. В., Шматко Е. С. Всплески синхротронного радиоизлучения электронов, высыпавшихся из внутреннего радиационного пояса Земли // Радиофизика и радиоастрономия.—1997.—2, № 2.—С. 165—174.
10. Мурзин В. С. Введение в физику космических лучей. — М.: Изд-во Москов. ун-та, 1988.—320 с.

#### BURSTS OF FAST NEUTRON FLOWS ON THE EARTH'S SURFACE AS THE COMPLETION OF THE PROCESS OF ENERGETIC PROTON SCATTERING FROM THE CAPTURED RADIATION ZONES

I. I. Zalyubovskiy, V. M. Kartashev, V. E. Kovtun, O. K. Minko, E. S. Shmatko

The possibility of indirect ground-based detection of bursts of energetic proton scattering from the Earth's internal radiation zone is considered. The bursts are shown to be transformed into bursts of fast atmospheric neutrons. Efficient detection of the neutron bursts is possible at low latitudes when muon-neutron scintillation telescope with an area of five square metres is used.