

ИСТОЧНИКИ ПЕРВИЧНОГО КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ЭНЕРГИИ ОКОЛО 100 ПЭВ

С. Е. ПЯТОВСКИЙ^{1,2}

Выполнен сравнительный анализ спектров первичного космического излучения (ПКИ) по E_0 и спектров переменных звезд по периодам с целью установить причины нерегулярностей в спектре ПКИ по E_0 . Показана зависимость между периодами переменных звезд и максимальной энергией E_0 ядер ПКИ, генерируемой данными типами звезд. Нерегулярности в спектре ПКИ по E_0 связаны с переходом от одного доминирующего типа звезд к другому с ростом E_0 . Излом в спектре ПКИ при $E_0 = 3 - 5$ ПэВ связан с уменьшением вклада звезд переменности SRV и дальнейшим ростом вклада звезд переменности мириды в поток ПКИ. Бамп в спектре ПКИ с максимумом при $E_0 = 80$ ПэВ образован звездами-гигантами и сверхгигантами переменностей мириды и SRC.

Ключевые слова: космические лучи, первичное космическое излучение, спектр по энергии, звезды переменного типа, массовый состав.

Введение. Причины и вид нерегулярностей спектра ПКИ по E_0 остается предметом научных дискуссий. Обсуждаются вопросы локализации т. н. изломов спектра, “острота” изломов, при каких энергиях наблюдаются изломы в спектрах легких и тяжелых ядер в массовом составе ПКИ и другие. Внимание вызывают вопросы локализации и источники бампа в спектре ПКИ по E_0 около 100 ПэВ.

Анализ нерегулярностей спектра ПКИ при $E_0 = 1-100$ ПэВ выполнен, в частности, в работе [1]. На рис. 1 показаны результаты экспериментов KASCADE-Grande [2], Tunka и Ice-Top по исследованию энергетического спектра ПКИ. Отдельного внимания заслуживают результаты экспериментов ГАММА (ГАММА-07) [3] (Армения, Арагац) и Ад-

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: vgsep@yandex.ru.

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 125993 Россия, Москва, Волоколамское ш., 4.

рон (Тянь-Шаньская высокогорная научная станция), в которых при $E_0 \cong 70\text{--}100$ ПэВ зарегистрирован пик интенсивности, существенно превышающий данные других экспериментов. Природа данной нерегулярности не установлена при том, что другие эксперименты о наличии аналогичного пика не сообщают. Необычным является и то, что данный пик не наблюдался в экспозициях самого эксперимента ГАММА за другие периоды времени, например, ГАММА-06, -08 и др. Однако вполне возможно, что данный пик не является методической погрешностью обработки экспериментальных данных.

В работах [1, 4] показано, что нерегулярности в спектре ПКИ по E_0 , следующего за изломом при $E_0 = 3\text{--}5$ ПэВ, обусловлены выбытием ядер массового состава ПКИ начиная с протонов. Методом “мини-макс возраста ШАЛ” [1], основанным на существенно большей статистике экспериментальных характеристик ШАЛ, полученных, в частности, в эксперименте KASCADE-Grande, показано, что при $E_0 = 2\text{--}35$ ПэВ массовый состав ядер ПКИ остается смешанным и соответствующим CNO-группе. Однако излом в спектре ядер массового состава ПКИ самой тяжелой группы локализован до бампа, наблюдаемого при $E_0 = 50\text{--}100$ ПэВ, что указывает на то, что бамп в спектре ПКИ при $E_0 = 50\text{--}100$ ПэВ образован другими источниками ядер с другими особенностями ускорения.

1. *Экспериментальные данные для анализа бампа при $E_0 = 50\text{--}100$ ПэВ.* Анализ бампа спектра ПКИ по E_0 выполнен по данным эксперимента KASCADE-Grande [2, 4], база данных которого содержит характеристики более 150 млн ШАЛ, в т. ч. глобальное время регистрации ШАЛ.

Характеристикой данной нерегулярности (бампа) является показатель наклона γ спектра ПКИ по E_0 . Для оценки изменения γ выбран диапазон по $E_0 = 20\text{--}75$ ПэВ, расположенный после излома группы самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ и до максимума бампа при $E_0 = 80$ ПэВ, подтвержденного в экспериментах ГАММА и “Адрон”. Изучение изменения γ выполнено с интервалом 10 дней, что обеспечило статистику выборок $\cong 1$ млн событий.

Примеры полученных спектров приведены на рис. 2, где показаны спектры с показателями наклона γ вблизи $E_0 = 80$ ПэВ от минимальных значений $\gamma = 1.60 \pm 0.02$ до максимальных $\gamma = 2.31 \pm 0.04$. Спектры, построенные по выборкам из экспериментальных данных KASCADE-Grande, приведены в сравнении с данными эксперимента ГАММА-07. Несмотря на то, что усредненный по всей статистике наблюдений показатель γ получен с высокой точностью, значения γ за различные интервалы времени существенно различаются. Данное изменение γ может быть связано либо с флуктуаци-

ями характеристик ШАЛ, либо с изменением интенсивности ПКИ в данном диапазоне E_0 . Из рис. 2 следует, что выпадающее событие, зарегистрированное в эксперименте ГАММА-07, не является уникальным и имеет аналоги в событиях, зарегистрированных в эксперименте KASCADE-Grande.

По базе данных эксперимента KASCADE-Grande получены значения показателя γ в диапазоне по $E_0 = 20\text{--}75$ ПэВ для 248 временных интервалов.

2. *Спектральный анализ изменения показателя γ .* Спектральный анализ изменения γ выполнен с целью выявления возможных максимумов периодов изменения значений γ . Для анализа применено спектральное преобразование Фурье с окном Хэмминга. Полученная спектральная плотность лог-периода приведена на рис. 3. Проведенный анализ позволил выявить на интервале 40–300 дней два максимума в периоде изменения γ (66 и 229 дней). Ширина пика спектральной плотности характеризует “локальность” источника ПКИ – чем ближе пик к нормальному распределению, тем с большей вероятностью в формировании пика доминирует один источник ПКИ. На рис. 3 пики с

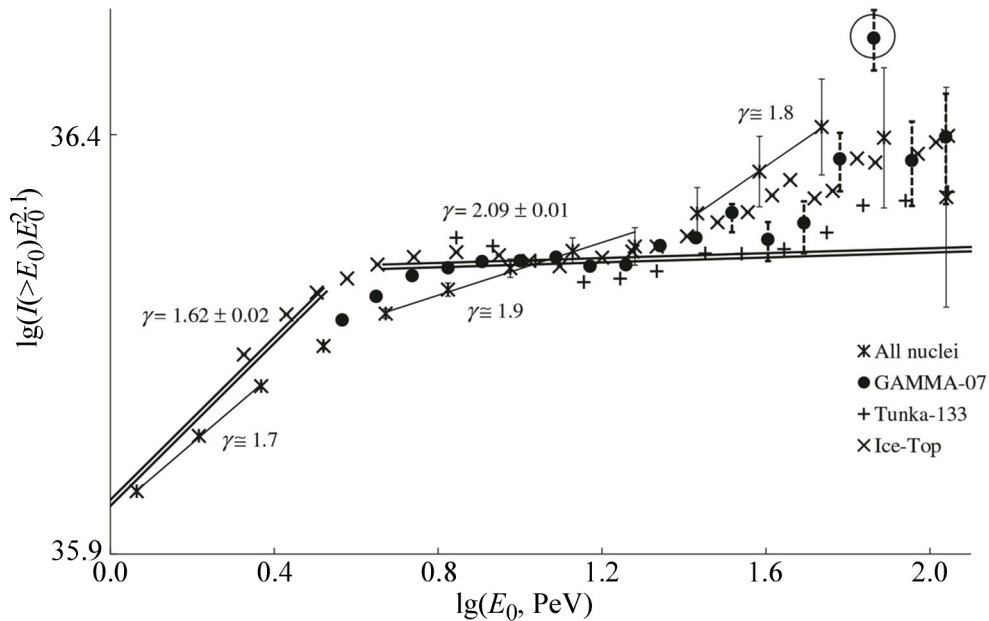


Рис. 1: Интегральные спектры по E_0 , полученные в экспериментах KASCADE-Grande и ГАММА-07. Максимумы бампов в спектрах, полученных в экспериментах KASCADE-Grande и ГАММА-07, соответствуют $E_0 = 50\text{--}80$ ПэВ, что выше энергии излома самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ [1]. В спектре ПКИ по E_0 , полученном в эксперименте ГАММА-07, наблюдается выпадающее значение (обведено).

максимумами в периодах 66 и 229 дней описываются нормальными распределениями с $R_a^2 > 98\%$.

Для поиска возможных источников ПКИ в диапазоне $E_0 = 20\text{--}100$ ПэВ использованы каталоги звездных объектов “General Catalogue of Variable Stars (GCVS)” [5] и “Zwicky Transient Facility Catalog (ZTF)” [6]. В GCVS представлено более 60 тыс звезд более 250 типов с указанием периодов, локаций и других характеристик. На рис. 3 показано, что первой гармонике 66 дней соответствуют, в основном, звезды с переменностью типа SR, вторая гармоника 229 дней образована преимущественно миридами. Здесь же необходимо обратить внимание, что звезды, находящиеся на заключительных этапах эволюции, обычно имеют сильные магнитные поля.

Область перехода от полурегулярных гигантов к миридам (рис. 3) характеризуется локальным нарушением скейлинга в спектре ПКИ при $E_0 = 3\text{--}20$ ПэВ [7]. Локальных областей, аналогичных показанным на рис. 3, где происходит нарушение скейлинга, в спектре ПКИ по E_0 несколько, – области нарушения скейлинга связаны с переходом от

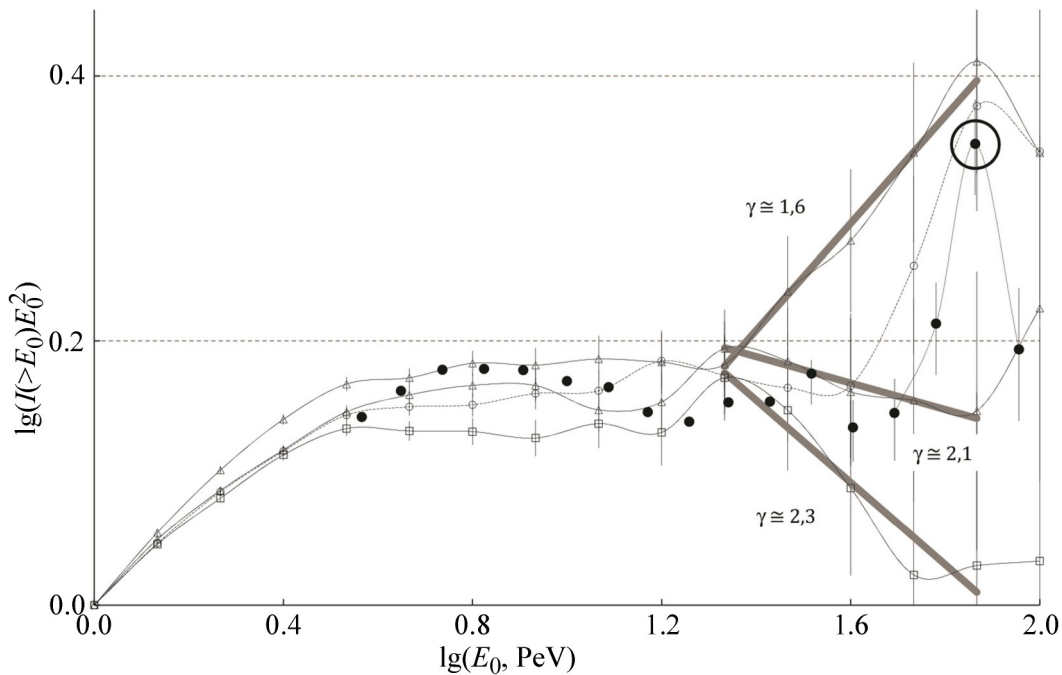


Рис. 2: Спектр ПКИ по E_0 , полученный в эксперименте GAMMA-07 (черные кружки, “выпадающее” значение обведено), в сравнении с данными эксперимента KASCADE-Grande для различных интервалов времени (пустые маркеры). Серые прямые – регрессии в интервале $E_0 = 20\text{--}75$ ПэВ.

одного доминирующего типа звезд к другому, а степени проявления нарушений скейлинга определены распределениями по энергиям, которые обеспечены доминирующим типом звезд рассматриваемой переменности.

3. *Спектр звезд по периоду.* Интегральный спектр переменных звезд в зависимости от лог-периода представлен на рис. 4, где показаны усредненные по типам переменных звезд периоды. Рассмотрены звезды типов от белых карликов до сверхгигантов типа рекуррентных новых. Чем более существенны нерегулярности в спектре по периоду источников ПКИ, тем более существенны нерегулярности в спектре ПКИ по E_0 , образованном данными источниками. Самые большие нерегулярности в спектре по периоду обозначены на рис. 4 как известные значения E_0 : периоду 17 дней соответствует

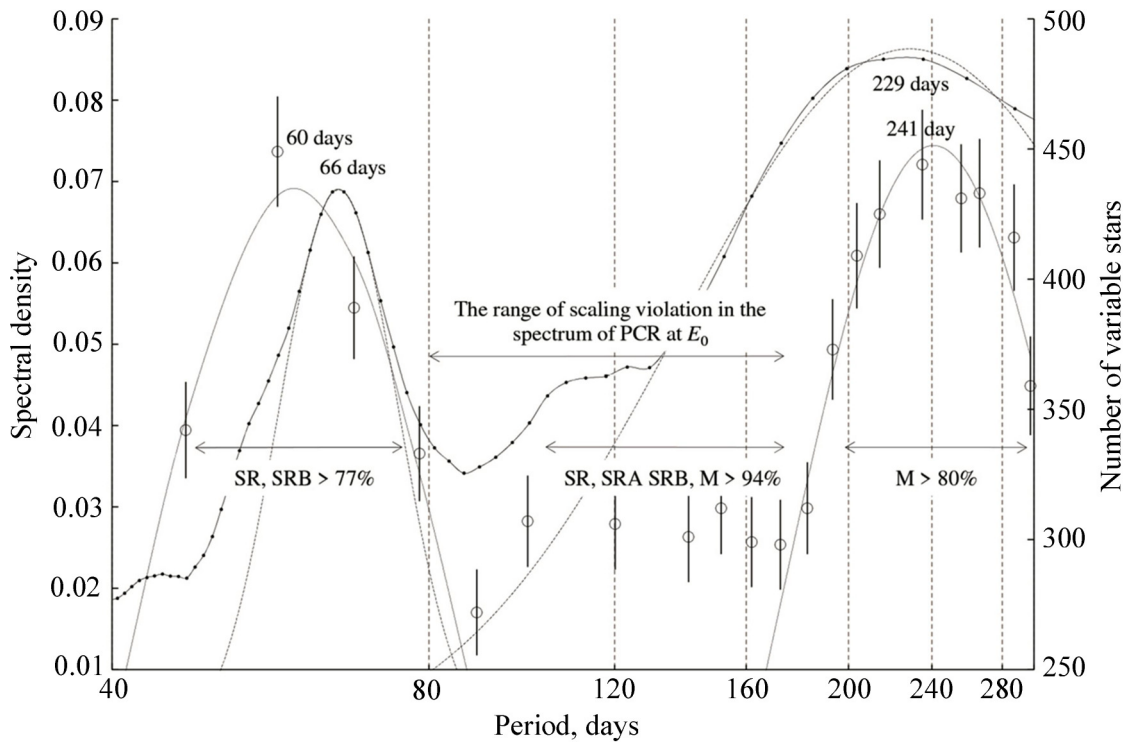


Рис. 3: Спектральная плотность лог-периода изменения показателя γ спектра ПКИ по E_0 (сплошная линия, левая ось) в сравнении с периодами звезд различных типов переменности (пунктирные линии, правая ось): *SR* – полурегулярные красные гиганты и сверхгиганты промежуточных или поздних спектральных классов, *SRA* и *SRB* – полурегулярные красные гиганты поздних спектральных классов *M*, *C* и *S*, *M* – мириды, красные гиганты на конечных этапах звездной эволюции с эмиссионными спектрами поздних классов.

$E_0 = 0.1$ ПэВ (область красных карликов), 120 дней, – $E_0 = 5$ ПэВ (бамп при $E_0 = 3–5$ ПэВ в спектре ПКИ) и 176 дней, – $E_0 = 20$ ПэВ (начало бампа с максимумом при $E_0 = 80$ ПэВ). Ускорение ПКИ до $E_0 = 0.1$ ПэВ во вспышках красных карликов установлено в работах Ю. И. Стожкова [8].

На рис. 4 показано, что источниками ПКИ низких энергий $E_0 < 0.1$ ПэВ являются карлики, локализованные преимущественно в созвездиях Стрельца, Змееносца и Центавра; субгиганты и гиганты из созвездий Стрельца и Змееносца средних энергий $E_0 = 0.2–2$ ПэВ; гиганты и сверхгиганты из созвездия Стрельца высоких энергий $E_0 > 5$ ПэВ.

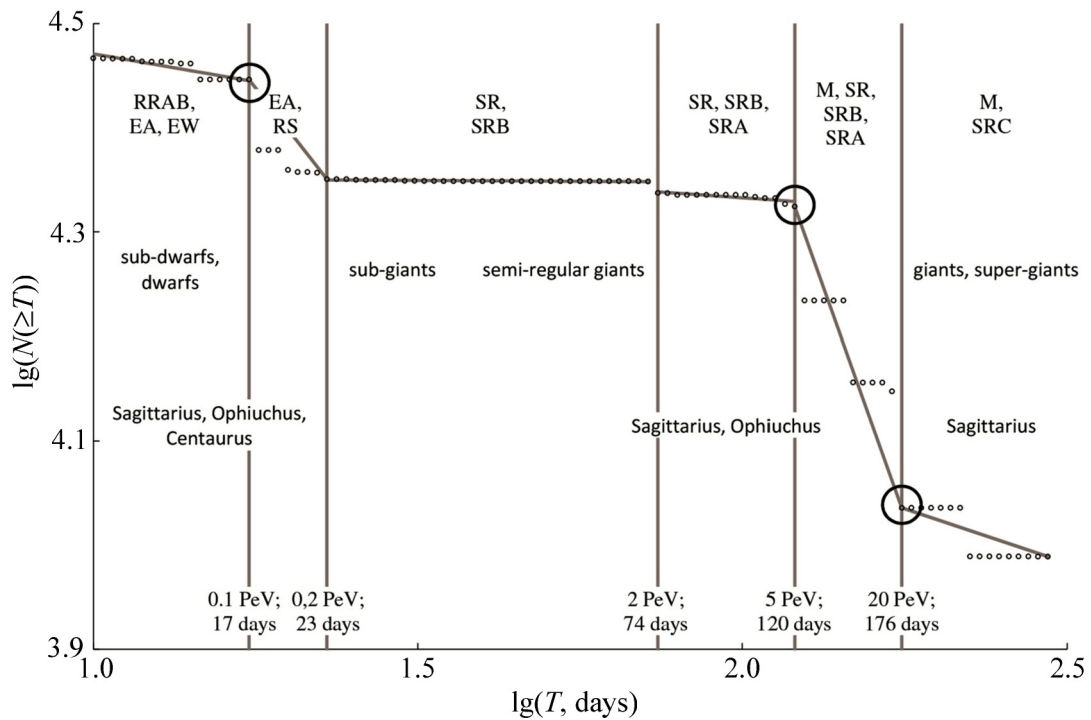


Рис. 4: Интегральный спектр распределения переменных звезд по лог-периоду. Обозначены доминирующие типы звезд и созвездия, где находятся данные звезды, для указанных интервалов по E_0 и периодам: EA – оранжевые субгиганты поздней эволюции, EW – контактные желтые карлики спектрального класса F, RS – эруптивные желто-белые карлики со вторичным компонентом – магнитно-активным субгигантом со спектрами Ca-II, H и K в эмиссии, SRC – полурегулярные сверхгиганты поздних спектральных классов M, C и S. Обведены нерегулярности в спектре с соответствующими значениями E_0 .

Из анализа данных, представленных на рис. 4, получена регрессия, определяющая зависимость между средним периодом данного типа звезды-источника ПКИ и максимальной E_0 :

$$\lg(T, \text{дней}) = (0.45 \pm 0.05)\lg(E_0, \text{ПэВ}) + (1.71 \pm 0.05). \quad (1)$$

Из регрессии (1) следует, что нижняя граница области субгигантов для периода 23 дня составляет $E_0 = 0.2$ ПэВ, область начала первого бампа в спектре ПКИ по E_0 – период 74 дня и $E_0 = 2-3$ ПэВ. Также можно оценить максимальную энергию ПКИ: согласно каталогу GCVS [5] максимальный зарегистрированный период составляет 29000 дней (80 лет) для рекуррентных новых звезд переменности типа NR, что соответствует максимально зарегистрированной в КЛ $E_0 \cong 1-2$ ЗэВ.

4. *Типы переменных звезд и спектр ПКИ по E_0 .* Из рис. 3 и 4 следует, что полурегулярные гиганты и мириды составляют основное звездонаселение, обеспечивающее источники ПКИ при $E_0 = 1-100$ ПэВ. С применением метода основного массива рассмотрим формирование звездами переменностей типа SR, SRA, SRB и M спектра ПКИ при данных E_0 .

Распределение звезд по лог-периодам соответствует нормальному распределению $N \sim \exp\{-[\ln(T) - \ln(\bar{T})]^2 / (2\sigma^2)\}$. Наиболее близкими к периоду 229 дней, полученному фурье-анализом по изменению показателя γ спектра ПКИ по E_0 (рис. 3), становятся звезды переменностей SRA (193 дня), M (280 дней) и SRC (372 дня). С учетом, что количество мирид существенно больше, нежели звезд других типов с близкими периодами, можно предположить, что бамп в спектре ПКИ по E_0 около 100 ПэВ образован, в основном, миридами. С ростом E_0 в диапазоне 1–100 ПэВ определяющий вклад в ПКИ начинают вносить звезды на конечных этапах звездной эволюции, что вызывает утяжеление массового состава ПКИ. Однако для каждого значения E_0 массовый состав ПКИ определяется доминирующим типом звезд данного периода, что может приводить к существенным флуктуациям доли различных ядер в массовом составе ПКИ с изменением по E_0 .

Спектры ПКИ по E_0 , полученные в экспериментах GAMMA, Tunka-133, Ice-Top и KASCADE-Grande, в сравнении со спектрами доминирующих звезд переменностей SR, SRA, SRB, SRC и M показаны на рис. 5. Максимум бампа спектра ПКИ в данном случае составляет $E_0 \cong 67$ ПэВ.

Однако, как следует из рис. 5, бамп должен быть менее выраженным и находиться при $E_0 < 67$ ПэВ. Средний период звезд переменности SRC (сверхгиганты) 372 дня, что по (1) дает значение $\lg(E_0) = 1.91$ (81 ПэВ). Данное значение E_0 соответствует

результатам эксперимента KASCADE-Grande. В то же время средний период мирид 280 дней или $\lg(E_0) = 1.64$ (44 ПэВ). Т.к. количество наблюдаемых мирид на порядок больше, нежели звезд переменности SRC, локализация максимума бампа по данным эксперимента KASCADE-Grande при $E_0 = 80$ ПэВ завышена, и бамп сформирован как миридами, так и звездами-сверхгигантами переменности SRC.

Ускорение КЛ до сверхвысоких энергий происходит во взрывных и новоподобных звездах, например, в рекуррентных новых звездах, у которых зарегистрирован максимальный период, обеспечивающий максимальную $E_0 \sim 1\text{--}2$ ЗэВ. В интервале $E_0 = 200$ ПэВ – 3.5 ЭэВ типу переменности ZAND соответствует средний период $T = 553$ дня, или по (1) $E_0 = 200$ ПэВ, далее следуют звезды переменности N с $T = 2000$ дней, или $E_0 = 3.5$ ЭэВ, что обеспечивает минимум в спектре ПКИ при данных E_0 .

Примером двойной звездной системы, где происходит ускорение до сверхвысоких энергий, может быть звезда переменности EA+SRC типа, с зарегистрированным периодом 7430 дней (20 лет), что должно обеспечить бамп в спектре ПКИ при $E_0 = 60$ ЭэВ

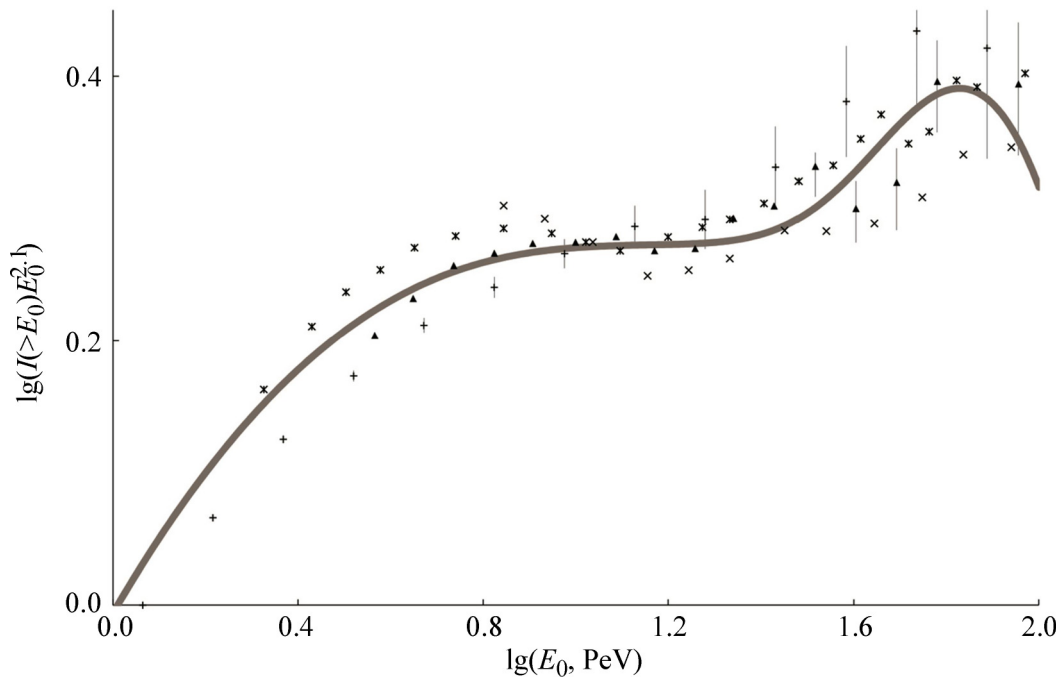


Рис. 5: Сравнение спектров ПКИ по E_0 , полученных в экспериментах GAMMA, Tunka-133, Ice-Top и KASCADE-Grande с распределением звезд переменностей типа SRA, SRB, SRC и M (серая кривая).

или $\lg(E_0, \text{ПэВ}) = 4.80$. Это может быть звезда типа μ Цефея (гранат Гершеля, красный сверхгигант на последней стадии звездной эволюции с He-C циклом, что указывает на то, что массовый состав ПКИ относительно CNO-группы становится более легким при данных E_0) и звезда типа Алголь β Персея.

Примером тройной звездной системы, где происходит ускорение до сверхвысоких энергий, может быть система звезд с зарегистрированным периодом 11900 дней (33 года), что должно обеспечить бамп в спектре ПКИ при $E_0 = 180$ ЭэВ или $\lg(E_0, \text{ПэВ}) = 5.26$. Если данный источник считать единственным, обеспечивающим поток ПКИ при $E_0 = 180$ ЭэВ, изменения потока ПКИ должны быть существенны – от максимума до полного затухания, что наблюдается в экспериментах.

Суммируя полученные в данном исследовании результаты, построим зависимость лог-периода и E_0 от типов затменно-переменных звезд, приведенную на рис. 6. Данный спектр характеризуется тремя основными областями нерегулярностей относительно линейной составляющей: начиная со звезд переменности RS наблюдается т. н. ранний излом в спектре ПКИ по E_0 ; начиная со звезд типа SRD (гиганты и сверхгиганты спек-

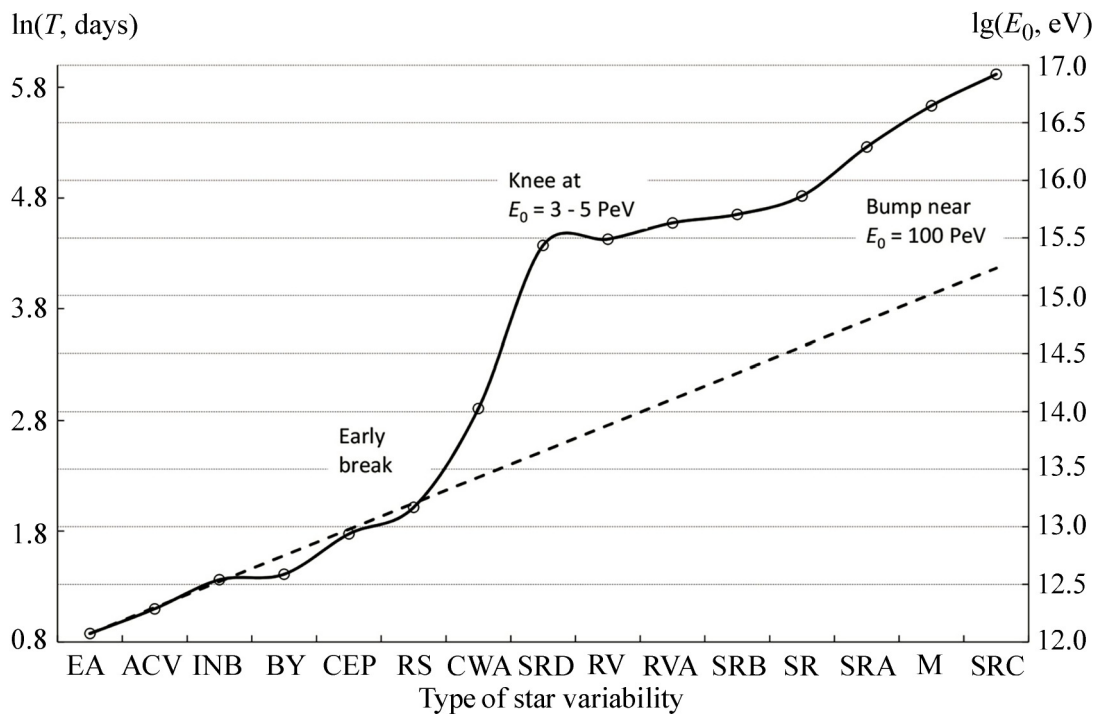


Рис. 6: Зависимость периодов звезд и энергии E_0 от типов затменно-переменных звезд, упорядоченных по возрастанию периода.

тральных классов F, G, K), – излом при $E_0 = 3\text{--}5$ ПэВ; начиная с мирид, – т. н. “бамп” при E_0 около 100 ПэВ. Как следует из рис. 6, после укрупнения спектра ПКИ по E_0 после излома при 3–5 ПэВ, показатель γ спектра ПКИ по E_0 вновь уменьшается и становится примерно таким же, каким был до излома.

Выводы:

1. Источниками ПКИ являются переменные звезды различных типов, находящиеся на различных этапах эволюции, от субкарликов до сверхгигантов.

2. Существует зависимость между средним периодом для звезды данного типа переменности и максимальной энергией E_0 ПКИ, обеспечиваемой механизмами ускорения в данных типах звезд.

3. Звезда каждого типа своими вспышками определяет диапазон по E_0 ПКИ. Каждому диапазону по E_0 соответствует массовый состав ПКИ, определяемый типом звезды-источника и который меняется при изменении E_0 .

4. Бамп в спектре ПКИ при E_0 около 100 ПэВ образован гигантами и сверхгигантами переменности M и SRC поздних спектральных классов. За другие нерегулярности в спектре ПКИ по E_0 ответственны другие типы звезд.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. D. Erlykin, V. S. Puchkov, S. E. Pyatovsky, *Physics of Atomic Nuclei* **84**(3), 279 (2021). DOI: 10.1134/S1063778821030170.
- [2] T. Antoni, W. D. Apel, F. Badea, et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **513**, 490 (2003). DOI: 10.1016/S0168-9002(03)02076-X.
- [3] A. P. Garyaka, R. M. Martirosov, S. V. Ter-Antonyan, et al., *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **35**, 115201 (2008). arXiv: 0808.1421v1 [astro-ph]. DOI: 10.1088/0954-3899/35/11/115201.
- [4] W. Apel, J. C. Arteaga, et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **620**(2–3), 202 (2010). DOI: 10.1016/j.nima.2010.03.147.
- [5] General Catalogue of Variable Stars. The Sternberg Astronomical Institute, The Institute of Astronomy of Russian Academy of Sciences. URL: <http://www.sai.msu.su/gcvs/>

- [6] C. Xiaodian, W. Shu, D. Licai, et al., The Astrophysical Journal Supplement Series, 249:18 (21pp), 2020 July. DOI: 10.3847/1538-4365/ab9cae.
- [7] С. Б. Шаулов, В. А. Рябов, А. Л. Щепетов, С. Е. Пятовский и др., Письма в ЖЭТФ **1-2**(7), 3 (2022). DOI: 10.31857/S1234567822130018.
- [8] V. G. Sinitsyna, V. Yu. Sinitsyna, Yu. I. Stozhkov, Astronomische Nachrichten **342**(1-2), 342 (2021). DOI: 10.1002/asna.202113931.

Поступила в редакцию 9 августа 2023 г.

После доработки 27 ноября 2023 г.

Принята к публикации 28 ноября 2023 г.