

УДК 524.1-52, 524.1-65

**Р. Б. Гнатик**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
Проспект Академіка Глушкова 2, Київ, 03022  
roman\_hnatyk@ukr.net

### **Пошук джерел космічних променів з енергіями понад $10^{20}$ еВ**

*Джерела космічних променів надвисоких енергій ( $E > 10^{18}$  еВ) досі залишаються невідомими, головню внаслідок втрати напрямку на джерело при відхиленнях траєкторій космічних променів у міжгалактичному та галактичному магнітних полях. Зі збільшенням енергії (жорсткості) променів вплив магнітного поля послаблюється, тому найперспективнішим виявляється пошук джерел для подій з найвищою енергією. У роботі розширено вибірку космічних променів надвисоких енергій ( $E > 10^{20}$  еВ) з 33 до 42 подій за рахунок калібрування подій детектора AUGER. Вибірка характеризується наявністю триплету подій у крузі радіуса  $3^\circ$ . Подією з найвищою енергією залишається зареєстрована флюоресцентним детектором «Fly's Eye» (FE-подія) в 1993 р. злива з енергіями  $E = 3.2 \cdot 10^{20}$  еВ. Проаналізовано можливі джерела триплету та FE-події. З урахуванням відхилень траєкторій космічних променів у міжгалактичному та галактичному магнітних полях показано, що транзієнтними джерелами FE-події та триплету можуть бути галактики з активним зореутворенням, в яких промені прискорюються новонародженими мілісекундними пульсарами. Серед галактичних джерел потенційними кандидатами виділено молоді пульсари, які при народженні могли мати мілісекундні періоди, та гігантські спалахи магнетарів.*

**ПОИСК ИСТОЧНИКОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ЭНЕРГИЯМИ СВЫШЕ  $10^{20}$  эВ, Гнатик Р. Б.** — Источники космических лучей сверхвысоких энергий ( $E > 10^{18}$  эВ) до сих пор остаются неизвестными, в основном в результате потери направления на источник при отклонениях траекторий космических лучей в межгалактическом и галактическом магнитных полях. С увеличением энергии (жесткости) лучей влияние магнитного поля ослабевает, поэтому наиболее перспек-

тивним оказується пошук джерел для подій з найвищою енергією. В роботі розширена вибірка космічних променів надвисоких енергій ( $E > 10^{20}$  эВ) з 33 до 42 за рахунок калібрування подій детектора AUGER. Вибірка характеризується наявністю триплету подій в колі радіуса  $3^\circ$ . Подією з найвищою енергією остається зареєстрований флуоресцентним детектором «Fly's Eye» (FE-подія) в 1993 г. ливень з  $E = 3.2 \cdot 10^{20}$  эВ. Проаналізовані можливі джерела триплету і FE-події. З урахуванням відхилень траєкторій космічних променів в міжгалактичному і галактичному магнітних полях показано, що транзйентними джерелами FE-події і триплету можуть бути галактики з активним зорозодобранням, в яких промінь прискорюється новозродженими мільсекундними пульсарами. Серед галактичних джерел потенціально кандидатами виділені молоді пульсари, які при народженні можуть мати мільсекундні періоди, і гігантські всплески магнетарів.

*SEARCH OF THE SOURCES OF THE COSMIC RAYS WITH ENERGIES ABOVE  $10^{20}$  eV, by Gnatyk R. B. — Sources of the ultrahigh energy cosmic rays (UHECR,  $E > 10^{18}$  eV) are still unknown, mainly due to loss of a direction to the source after deviations of the trajectories of the cosmic rays (CR) in the Galactic and extragalactic magnetic fields. With CR energy (rigidity) increasing the influence of the magnetic field weakens, therefore the most promising is the search of the sources for events with the highest energies. In our work we expand the existing sample of the UHECR  $E > 10^{20}$  eV from 33 to 42 events due to calibration of the events of AUGER detector. The sample is characterized by existing of the triplet of events in a circle with radius of  $3^\circ$ . The event with the highest energy remains the shower detected by fluorescent detector Fly's Eye (FE-event) in 1993 with  $E = 3.2 \cdot 10^{20}$  eV. The possible sources of triplet and FE-event are analyzed. Taking into account deflection of the trajectories of the UHECR in extragalactic and Galactic magnetic fields it is shown, that transient sources of the FE-event may be galaxies with active star formation where UHECR are accelerated by newborn millisecond pulsars. Among potential Galactic sources we highlight young pulsars with millisecond period at birth, and giant magnetar flares.*

## ВСТУП

Космічні промені (КП) — високоенергетичні частинки з кінетичними енергіями, що суттєво перевищують їхню енергію спокою (приблизно 1 ГеВ для протона), — ефективно прискорюються в астрофізичних об'єктах. Спектр КП степеневий:  $F(E) \propto E^{-k}$ , де показник степеня залежить від енергії:  $k(E)$  [25]. У спектрі виділяють такі особливості: I коліно ( $3 \cdot 10^{15}$  еВ), II коліно ( $10^{17}$  еВ), щиколотка ( $6 \cdot 10^{18}$  еВ). В

області енергії  $E \approx E_{GZK} \approx 5 \cdot 10^{19}$  еВ є ознаки ГЗК-обрізання — різке зменшення потоку КП внаслідок їхньої взаємодії з реліктовим фоном [6, 8, 25]. На даний момент верхню межу енергії зареєстрованих подій визначає КП з енергією  $3.2 \cdot 10^{20}$  еВ [11, 21].

Потік та хімічний вміст (масові числа) КП з енергіями понад  $10^{14}$  еВ визначаються за допомогою наземних детекторів: за параметрами зливи і/або флюоресцентного свічення в атмосфері можна відновити енергію, масове число та напрямок приходу початкового КП [4—6, 16, 20, 25].

Космічні промені з енергіями до  $10^{17}$ — $10^{18}$  еВ мають хімічний склад, що відповідає прискоренню частинок міжзоряного середовища і, найбільш ймовірно, прискорюються на ударних фронтах галактичних залишків Наднових зір механізмом Фермі першого порядку [25]. Деякий вклад, особливо на високих енергіях, може давати прискорення КП у туманностях, породжених пульсарними вітрами у випадку потужного магнітодипольного випромінювання молодих пульсарів з мілісекундними періодами обертання [17, 27].

Потужності залишків Наднових недостатньо для прискорення космічних променів надвисоких енергій (КПНВЕ) з енергіями понад  $10^{17}$ — $10^{18}$  еВ, більше того, КП таких енергій не утримуються галактичним магнітним полем [13, 25, 26]. Тому спостережуваний ізотропний потік КПНВЕ з енергіями понад  $10^{18}$  еВ вважається позагалактичним, а його основними потенційними джерелами вважаються активні ядра галактик та космологічні гамма-спалахи [7—9, 25, 28]. В обох типах джерел КПНВЕ прискорюються на фронтах релятивістських ударних хвиль в релятивістських струменях (джетах), при цьому максимальні енергії очікуються у межах  $(10^{20} \text{—} 10^{21}) Z$  еВ, де  $Z$  — заряд частинки [9]. Проте протони в КПНВЕ з  $E \approx E_{GZK}$  підпадають під обмеження на відстань до потенційних джерел, наприклад, для протонів з енергією  $3 \cdot 10^{20}$  еВ максимальна відстань до джерела складатиме 30 Мпк [7]. Фотодезінтеграційні втрати обмежують пробіг ядер заліза так само [7, 8]. Однак найближчі АЯГ, здатні прискорювати КПНВЕ до субзетаелектронвольтних енергій ( $1 \text{ ZeV} = 10^{21}$  еВ), лежать на суттєво більших відстанях — приблизно 200 Мпк [28]. Це ставить під сумнів домінуючу роль АЯГ у прискоренні КПНВЕ.

Гамма-спалахи, як найпотужніші спалахи у Всесвіті після Великого вибуху, є популярними кандидатами на джерела КПНВЕ, вони відповідають вимогам до протонного субЗеВ-прискорювача [25, 29]. Однак частоти їхніх спалахів в Локальному Всесвіті (до 100 Мпк) недостатньо для забезпечення спостережуваного потоку КПНВЕ [17, 18].

Суттєву інформацію про можливу природу джерел КПНВЕ містить їхній хімічний склад. І в АЯГ, і в гамма-спалахах очікується домінування протонного компонента у потоці КПНВЕ [8, 10, 25]. Дані експериментів HiRes та TA показують, що у потоці КПНВЕ домінують протони на всіх енергіях від  $10^{18}$  до  $10^{20}$  еВ [4, 5]. Наявність ГЗК-

обрізання в теоретично передбаченому місці підтверджує домінування протонного компонента [6, 8, 10, 20]. Однак за даними експерименту AUGER зі збільшенням енергії збільшується доля важких ядер [5, 9, 16, 25, 28].

Суттєвий чи навіть домінуючий потік важких ядер, зокрема заліза, природно очікується у пульсарних моделях КПНВЕ, оскільки залізна кора нейтронних зір може бути джерелом для інжекції ядер заліза у прискорювальний процес [17, 25, 27]. Однак для досягнення енергій порядку  $10^{21}$ — $10^{22}$  еВ потрібне потужне магнітодипольне випромінювання, яке може забезпечити тільки новонароджений пульсар з початковим періодом обертання не більше декілька мілісекунд. Ймовірність народження такого пульсара мала — менше 0.3 %, і в нашій Галактиці зараз немає таких пульсарів, однак в об'ємі Локального Всесвіту частота появи таких пульсарів, головню в галактиках з активним зореутворенням, достатня для пояснення спостережуваного потоку КПНВЕ [25, 27]. Крім того, при спалахах Наднових можуть народжуватись магнетари — нейтронні зорі із гігантськими магнітними полями порядку  $10^{11}$  Тл, які зараз проявляються як аномальні рентгенівські пульсари (Anomalous X-ray pulsars (AXPs)) чи як джерела повторних спалахів у м'якому гамма-діапазоні (soft gamma repeaters (SGRs)) [12, 14, 25].

Крім прискорення КПНВЕ за аналогією з пульсарами, магнетар, який протягом багатьох тисяч років зберігає активність, підтримувану енергією запасеного магнітного поля, зокрема у вигляді гігантських спалахів, може забезпечити прискорення КПНВЕ до ЗеВ-енергій під час цих спалахів, де, як очікується, суттєву роль відіграють процеси перемикавання [14, 27].

Проблема встановлення джерел та механізмів прискорення ускладнюється відсутністю кореляцій напрямків приходу КПНВЕ із їхніми потенційними джерелами. Пошуки точкових джерел КПНВЕ за даними AUGER [2] і TA [3] не дали позитивного результату. В експерименті AUGER виявлено тільки порушення ізотропії у напрямку Cen A для  $E > 58$  ЕеВ з імовірністю випадкової реалізації 1.4 %, а у експерименті TA для  $E > 57$  ЕеВ — надлишок подій на рівні 5.1 стандартного відхилення у крузі радіуса  $R \sim 20$  з центром в  $\alpha = 146.7$ ,  $\delta = 43.2$  («гаряча пляма») [3].

В роботі [22] показано, що можливими джерелами надлишкових подій «гарячої плями» є близька галактика зі спалахом зореутворення M82 та яскравий блазар Mrk 180. Однак в цілому навіть на найвищих енергіях розподіл КПНВЕ не суперечить ізотропному.

В роботі [35] обґрунтовано, що спостережувана ізотропія потоку КП з  $E > 10^{19}$  еВ може свідчити про непостійність (транзйентність) джерел КПНВЕ а також про посилення міжгалактичного магнітного поля в околі Галактики.

Таким чином, відсутність окремих джерел (тобто, кластерів КП з близькими напрямками приходу) свідчить, що традиційні потужні

джерела КПНВЕ, такі як блазари чи радіогалактики не домінують у сумарному потоці КПНВЕ, велика кількість транзйентних джерел більш прийнятна ніж нечисленні стаціонарні джерела, а сукупна дія міжгалактичного та галактичного магнітних полів спричинює суттєве відхилення траєкторій [35]. Тому в нашій роботі ми шукаємо джерела КП з екстремально високими енергіями  $E > 10^{20}$  еВ, для яких два фактори покращують умови пошуку джерел. Для позагалактичних джерел КП з енергіями понад  $10^{20}$  еВ ( $3 \cdot 10^{20}$  еВ) ГЗК-горизонт становить 75 (30) Мпк [7], що зменшує кількість потенційних джерел, і зменшення відстані призводить до зменшення відхилення траєкторій у міжгалактичному магнітному полі. Із вибірки подій з енергіями понад  $10^{20}$  еВ для дослідження виберемо ФЕ-подію з найвищою енергією  $3 \cdot 10^{20}$  еВ з області антицентра Галактики [11] та можливий триплет подій з  $E > 10^{20}$  еВ з області Галактичного центра [34]. В обох напрямках Місцева група галактик межує з пустотами-войдами. Так, в напрямку на триплет Локальний void з галактичними координатами центру  $l = 47.7$ ,  $b = +11.0$  межує з Місцевою групою та простягається на 40—60 Мпк [37], що додатково звужує коло можливих джерел цих подій. Тому їхній аналіз найменше обмежений невизначеностями міжгалактичного магнітного поля та має важливе значення для встановлення потенційних джерел спостережуваних КП найвищих енергій.

## СПОСТЕРЕЖНІ ДАНІ ЩОДО КПНВЕ

*Детектування космічних променів надвисоких енергій.* Космічні промені з енергіями понад  $10^{20}$  еВ влітають в атмосферу Землі з частотою тільки приблизно раз на квадратний кілометр за століття. Тому їхнє вивчення вимагає детекторів атмосферних злив дуже великих розмірів. Реєструвались такі космічні промені, зокрема експериментами «Fly's Eye» (США), AGASA (Японія), «Haverah Park» (Англія), «Yakutsk» (Росія). Останнім часом до них долучилися три найбільші та найсучасніші детектори — вже непрацюючий HiRes (США), AUGER (Аргентина), «Telescope Array» (ТА, США) [16, 20].

«Pierre Auger Observatory» (PAO, AUGER) — на даний момент найбільший діючий експеримент з детектування космічних променів [16]. Будівництво почалося у 2000 р. в Аргентині, а накопичення даних — з 2005 р. Обсерваторія складається з масиву 1660 наземних черенковських детекторів (баків з водою) на площі  $3000 \text{ км}^2$ . Ці детектори реєструють зливи вторинних частинок, які виникають внаслідок зіткнення космічного променя з атомами та молекулами атмосфери Землі. По периметру масиву наземних детекторів у п'яти місцях встановлено 27 флюоресцентних детекторів. Вони реєструють флюоресцентне свічення атмосфери, збудженої широкою атмосферною зливою. Флюоресцентні детектори мають меншу експозицію, але суттєво вищу точність визначення енергії космічних променів, тому набір гіб-

ридних подій, зареєстрованих двома методами, використовується для калібрування наземних детекторів.

«Telescope Array» — детектор космічних променів, розташований у північній півкулі (штат Юта, США). Почав працювати у 2007 р. [20]. Детектор, як і РАО, працює за гібридною схемою: масив з наземних детекторів доповнено флюоресцентними детекторами, розташованими по периметру у трьох точках. Понад 500 наземних детекторів розташовано на відстані 1.2 км один від одного, загальна площа складає 762 км<sup>2</sup>. На відміну від РАО в експерименті ТА використовуються наземні детектори з твердим синтілятором.

**Події з енергією понад  $10^{20}$  еВ.** За період з січня 2004 р. до березня 2014 р. при сумарній апертурі для подій із zenітним кутом менше 60° в 51753 км<sup>2</sup>стер рік РАО зареєстрував лише шість таких подій [2], тоді як ТА за період від травня 2008 р. до травня 2014 р. при сумарній апертурі для подій із zenітним кутом менше 55° в 5400 км<sup>2</sup>стер рік зареєстрував 10 подій [1, 3, 20]. Це можна пояснити систематичними похибками експериментів. У роботах [4, 6—8] показано, що калібрування спектрів на основі протонної моделі КПНВЕ усуває розбіжності, якщо ввести коректувальні коефіцієнти для різних експериментів. Його значення складає  $k = 1.2$  для РАО та  $k = 1.0$  для ТА. У табл. 1 приведено список КП, зареєстрованих РАО без нормування та з нормуванням  $k = 1.2$ . Надалі ми будемо розглядати нормовані дані РАО.

Список подій з  $E > 10^{20}$  еВ, зареєстрованих детекторами, які працювали в минулому («Fly's Eye», AGASA, «Yakutsk», «Haverah Park», «Volcano Ranch»), взято з роботи [31].

Загальну карту подій з енергією понад  $10^{20}$  еВ зображено на рис. 1 в галактичних координатах. Як вже відмічалось вище, досі не вдалось ототожнити хоча б одну подію з конкретним астрофізичним джерелом. Виявлено тільки вказівки на підвищену концентрацію КПНВЕ в

**Таблиця 1.** Космічні промені з енергіями більше  $10^{20}$  еВ після калібрування за даними РАО (експеримент AUGER)

Номер	Рік	$E$ , ЕеВ	$E k$ , ЕеВ	$l$ , град	$b$ , град
1	2007	127.1	152.52	-57.1	41.7
2	2008	118.3	141.96	36.5	-3.6
3	2014	118.3	141.96	80.1	-39.9
4	2008	111.8	134.16	47.5	-70.5
5	2005	108.2	129.84	179.5	-49.6
6	2011	100.1	120.12	-110.9	34.1
7	2012	99.0	118.80	-31.5	-35.2
8	2011	92.8	111.36	-44.9	-42.6
9	2008	89.3	107.16	-96.4	-12.9
10	2010	89.1	106.92	-48.7	-9.7
11	2006	89.0	106.80	88.4	-47.3
12	2013	85.3	102.36	-131.7	15.1
13	2013	84.8	101.76	-82.4	8.3
14	2004	84.7	101.64	-50.8	27.7

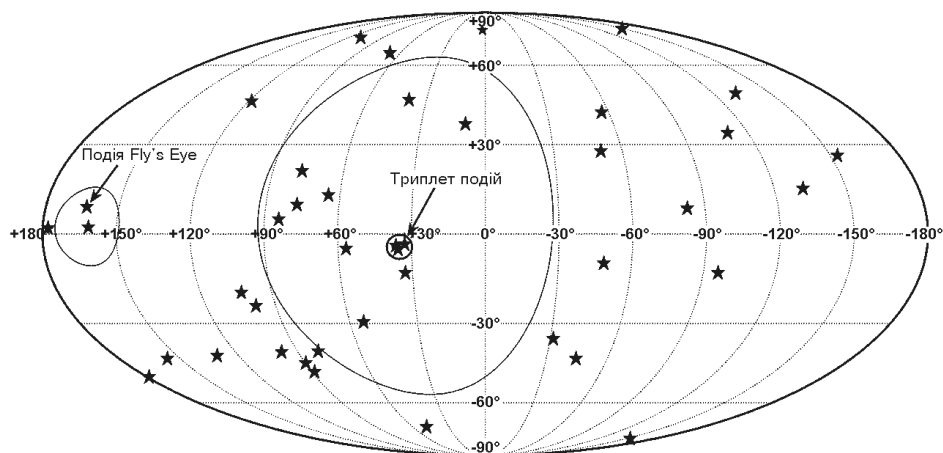


Рис. 1. Карта подій з енергіями більше  $10^{20}$  eВ (до списку [31] додано дев'ять нових подій РАО [2] після калібрування з табл. 1). Стрілки — триплет і подія Fly's Eye з енергією  $E = 3.2 \cdot 10^{20}$  eВ, круги навколо них — пустоти-войди, що межують з Місцевою групою [15, 37]

околі АЯГ Центавр А ( $l = 309.51$  ;  $b = 19.41$  ) [2] та в «гарячій плямі» ( $l = 177.1$  ,  $b = 49.6$  ) [3]. Обидва райони не виділяються на карті (рис. 1). Тому в нашій роботі зосередимо увагу на пошуку можливих джерел конкретних подій з найвищими шансами виявити такі джерела — це FE-подія внаслідок максимальної зареєстрованої енергії та триплет подій як можливий прояв одного джерела.

**Триплет подій?** На карті подій  $E > 10^{20}$  eВ виділяється група з трьох подій, які лежать на кутовій відстані не більше 4 одна від одної. Події, які входять до цієї групи, вказано у табл. 2.

Група двох подій № 1 та № 2 з триплету вже аналізувалась у роботі [36], де можливим джерелом вважалась маломасивна рентгенівська подвійна система Aql X-1. Можлива наявність тут триплету вказувалась в роботі [34].

**FE-подія  $E = 3.2 \cdot 10^{20}$  eВ.** В роботі [11] зареєстровано подію з досі рекордною енергією  $(3.2 \pm 0.9) \cdot 10^{20}$  eВ з координатами приходу  $l = 85.2 \pm 0.2$  ,  $b = 48.5_{6.3}^{5.2}$  (галактичні координати центровані на  $l = 163.4$  ,  $b = 9.6$  ) та з глибиною максимуму зливи  $X_{\max} = 815_{53}^{60}$  г/см<sup>2</sup>. На жаль, природу первісної частинки встановити не вдається — такі

Таблиця 2. Триплет подій

Номер події	Експеримент	Дата	$E$ , EeВ	$l$ , град	$b$ , град
1	AUGER	2008	141.96	36.50	-3.60
2	Telescope Array	2011	135.50	35.72	-4.68
3	Telescope Array	2008	101.40	32.74	-3.33

характеристики можна очікувати і для протона (модель QGSJETII-03 розвитку зливи в ТА-колаборації), і для ядра заліза (модель EPOS-LHC в РАО-колаборації) [5].

**Вимоги до потенційних джерел.** Джерела спостережуваних подій — FE-події та триплету — повинні задовольняти ряд вимог. По-перше, вони повинні забезпечити енергію прискорення, що перевищує спостережувану. По-друге, вони повинні перебувати на достатньо близькій відстані, щоб втрати енергії КПНВЕ на шляху до Землі не перевищували надлишку, отриманого у процесі прискорення. По-третє, відхилення траєкторії КПНВЕ у міжгалактичному та галактичному магнітних полях повинні відповідати різниці напрямку на джерело та напрямку приходу частинки.

Перша умова, як вже відмічалось вище, задовольняється у релятивістських струменях активних ядер галактик та гамма-спалахів, а також у пульсарно-вітрових туманностях навколо молодих мілісекундних пульсарів/магнетарів та у гігантських спалахах магнетарів. Внаслідок малої ймовірності гамма-спалаху та малого потоку КПНВЕ від магнетарного спалаху в Локальному Всесвіті потенційними джерелами FE-події та триплету вважатимемо серед позагалактичних джерел АЯГ та галактики із активним зореутворенням, а серед галактичних джерел — молоді мілісекундні пульсари/магнетари чи магнетарні спалахи.

Друга умова обмежує відстань (вірніше, шлях, пройдений частинкою від джерела до детектора) до значень 75 (30) Мпк для протона (чи ядра заліза) із спостережуваною енергією в детекторі  $10^{20}$  ( $3 \cdot 10^{20}$ ) eV [7, 25].

Третя умова найважче піддається перевірці, оскільки наші знання характеристик міжгалактичного та галактичного магнітних полів ще досить далекі від можливості відтворення траєкторії КПНВЕ, виходячи із його енергії та напрямку приходу. Зазвичай позагалактичне магнітне поле моделюється комірками з характерним розміром (довжиною когерентності)  $l_B = 0.1 \dots 1$  Мпк з випадковим розподілом в них напрямків магнітного поля з амплітудою  $B_{rms} = 10^{-16} \dots 10^{-13}$  Тл [13, 35]. Космічний промінь з енергією  $E$  від джерела на відстані  $D$  в такому полі відхиляється на кут  $\theta_{rms}$  і затримується на час  $t_{rms}$  [35]:

$$\theta_{rms}(E, D) \approx 0.8 Z \frac{E}{10^{20}} \frac{D}{10} l^{1/2} \frac{B_{rms}}{10^{-13}}, \text{ град} \quad (1)$$

$$t_{rms}(E, D) \approx 1.5 Z^2 \frac{E}{10^{20}} \frac{D}{10} l \frac{B_{rms}}{10^{-13}}, \text{ тис. років.} \quad (2)$$

Тут і нижче одиниці вимірювання:  $E$  — eV,  $D$  і  $l$  — Мпк,  $B$  — Тл, — град.

Якщо ж космічний промінь перетинає область постійного поля (наприклад, у міжгалактичному філаменті чи галактичному рукаві), то



кут відхилення  $\theta_{reg}$  та часова затримка  $t_{reg}$  визначатимуться перпендикулярною до напрямку на джерело складовою магнітного поля [13]:

$$\theta_{reg} \sim \frac{ZeB}{E} \frac{D}{10^{13}} \approx 0.52 Z \frac{E}{10^{20}} \frac{B}{10^{13}} D, \text{ град}, \quad (3)$$

$$t_{reg} \sim \frac{D}{c} \approx \frac{1}{24} \frac{D}{c} \approx 15Z^2 \frac{E}{10^{20}} \frac{B}{10^{13}} D^3, \text{ років}. \quad (4)$$

**Позагалактичне магнітне поле.** Великомасштабна структура Локального Всесвіту в напрямках на FE-подію та на триплет включає оточення Місцевої групи з підвищеною густиною та войди з пониженою густиною матерії. Тому для розподілу випадкового міжгалактичного магнітного поля в цих напрямках прийmemo модель [35]:

— у войдах магнітне поле має амплітуду  $B_{rms} \sim 10^{-15}$  Тл і когерентну довжину  $l_B \sim 0.1$  Мпк, для триплету з  $D \sim 75$  Мпк кут відхилення  $\theta_{rms} \sim 0.01Z$  град і час затримки  $t_{rms} \sim 0.8Z^2$  років є малими навіть для ядер заліза ( $Z = 26$ ), для FE-події з  $D \sim 30$  Мпк кути та затримки ще менші.

— в локальному міжгалактичному магнітному полі навколо нашої Галактики — сферичній ( $R = 2$  Мпк) замагніченій області з  $B \sim 10^{-13}$  Тл,  $l_B \sim 0.1$  Мпк — кути та затримки для триплету також залишаються малими:  $\theta \sim 0.1Z$  град,  $t \sim 6Z^2$  років.

**Галактичне магнітне поле.** Галактичне магнітне поле моделюється сумою регулярного та випадкового компонентів [13, 18, 23, 24]. Обидва компоненти слід враховувати як для позагалактичних джерел (коли траєкторія космічного променя в Галактиці починається із її границі) так і для галактичних джерел (коли на траєкторію впливає тільки поле між джерелом та детектором).

Для випадку КПНВЕ від позагалактичних джерел розрахунки [26] показують, що в області FE-події регулярне магнітне поле Галактики відхиляє протон (ядро заліза) з енергією FE-події приблизно на  $1^\circ$  (на  $5^\circ$ ) у бік зменшення широти  $b$  (тобто, вхід в Галактику відбувається на вищих  $b$ ), тоді як в області триплету регулярне магнітне поле Галактики відхиляє протон (ядро заліза) з енергією понад  $10^{20}$  еВ приблизно на менше  $5^\circ$  (на  $30^\circ$ ) градусів в бік зменшення довготи  $l$  (вхід в Галактику відбувається на більших  $l$ ). Для випадкового компонента з амплітудою  $B_{rms} \sim 3 \cdot 10^{-10}$  Тл та когерентною довжиною  $l \sim 100$  пк величини відхилення траєкторії та затримки часу дорівнюють

$$\theta \sim Z \frac{d}{10} \frac{E}{10^{20}} \text{ град}, \quad (5)$$

$$t \sim 1.4Z^2 \frac{d}{10} \frac{E}{10^{20}} \text{ років} \quad (6)$$

(тут одиниці вимірювання:  $E$  — еВ,  $d$  — кпк). Довжина  $d$  шляху всередині Галактики з радіусом  $R_{gal} = 20$  кпк для спостерігача на відстані  $R_{sun} = 8.5$  кпк від центра Галактики в напрямку ( $l, b \sim 0$ ) дорівнює  $d(l) = R_{gal} \sin(l - l) / \sin l$ , причому  $\sin l \approx (R_{sun} / R_{gal}) \sin l$ . Для ФЕ-події та триплету ці довжини відповідно дорівнюють  $d_{FE} = 12$  кпк і  $d_{tr} = 26$  кпк.

Для відносно близьких Галактичних джерел суттєвим може бути відхилення КПНВЕ в області постійного магнітного поля, наприклад у рукаві. В цьому випадку для постійної поперечної складової поля  $B \sim 10^{-10} [B / (10^{-10})]$  Тл і джерела на відстані  $d$  в Галактиці з формул (3), (4) отримаємо:

$$\sim \frac{d}{R_L} \sim 0.6Z d \frac{E}{10^{20}} \frac{B}{10^{-10}} \text{ град}, \quad (7)$$

$$\sim \frac{d}{c} \frac{1}{24} \frac{d}{c} \sim 0.015 Z^2 \frac{E}{10^{20}} \frac{B}{10^{-10}} d^2 \text{ років} \quad (8)$$

(тут одиниці вимірювання:  $E$  — еВ,  $d$  — кпк,  $B$  — Тл).

#### ПОШУК МОЖЛИВИХ ПОЗАГАЛАКТИЧНИХ ДЖЕРЕЛ ФЕ-ПОДІЇ ТА ТРИПЛЕТУ

Як вже відмічалось вище, відхилення траєкторій КПНВЕ в галактичних та міжгалактичних магнітних полях суттєво утруднює пошук їхніх джерел. Однак у нашому випадку високих енергій космічних променів та слабких магнітних полів у войдах, де ймовірно перебувають джерела, ефекти відхилення суттєво зменшуються. Так, для ФЕ-події та триплету відхилення у міжгалактичному магнітному полі не перевищують декількох градусів навіть для ядер заліза.

У регулярному галактичному полі позагалактичний космічний промінь з напрямку ФЕ-події (з Галактичного антицентра) також відхиляється мало — менше 5° навіть для заліза. Позагалактичний триплет в регулярному полі Галактики відхилиться на кут до 30° в напрямку на центр Галактики, випадковий компонент призведе до додаткового розкиду напрямків приблизно на 30°. Тому і для ФЕ-події, і для триплету потенційні позагалактичні джерела повинні лежати у крузі радіуса 30° навколо спостережуваного напрямку приходу.

Як вже відмічалось, до найімовірніших можливих джерел цих подій у Локальному Всесвіті відносяться активні ядра галактик та галактики із активним зореутворенням, у яких можна очікувати наявності пульсарно-вітрових туманностей з мілісекундними пульсарами/магнетарами. Для пошуку потенційних АЯГ та галактик із активним зореутворенням використовувалась база даних SIMBAD [38], пульсарів — ATFF Pulsar Catalogue [30], магнетарів — The McGill Magnetar Catalog [32], молодих залишків Наднових з ПБТ — SNR Catalog [19], мікроквazarів — каталог [33].

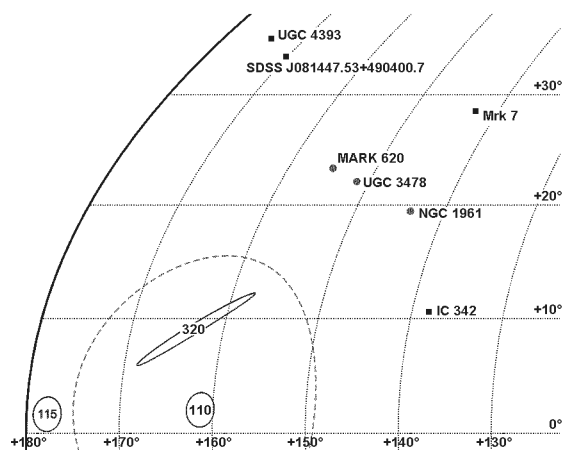
Таблиця 3. АЯГ в околі події  $3 \cdot 10^{20}$  eВ

Ім'я	$l$ , град	$b$ , град	$l$ , град	$z$	$Sp$
NGC 1961	143.82	19.47	21.34	0.012	Sy3/LIN
UGC 3478	151.43	22.12	17.21	0.012	Sy1n
MARK 620	154.96	23.31	16.22	0.006	Sy1n

Таблиця 4. Галактики з зореутворенням в околі події  $3 \cdot 10^{20}$  eВ

Ім'я	Тип	$l$ , град	$b$ , град	$l$ , град	$z$
UGC 4393	Emission-line Galaxy	174.09	35.17	27.92	0.007
Mrk 7	Blue compact Galaxy	142.60	28.53	27.40	0.010
IC 342	Starburst Galaxy	138.17	10.58	24.65	$7.7 \cdot 10^{-5}$
SDSS J081447.53+490400.7	Emission-line Galaxy	170.18	33.50	25.24	0.002

Рис. 2. Позагалактичні джерела на відстані до 40 Мпк в околі FE-події: АЯГ (точки) та галактики із активним зореутворенням (квадратики)



Перелік АЯГ як можливих джерел FE-події приведено у табл. 3, а перелік галактик з активним зореутворенням — у табл. 4 ( $l$  — кутова відстань між об'єктом і напрямком приходу космічного променя,  $z$  — червоне зміщення,  $Sp$  — тип об'єкта). Положення об'єктів на небесній сфері відносно FE-події приведено на рис. 2.

Як впливає з даних таблиць та рис. 2, серед позагалактичних об'єктів немає достатньо вірогідного джерела. Обмеження на відстань та відхилення задовольняють сейфертівська галактика MARK 620, яка хоч і належить до класу АЯГ, але не вважається потенційним джерелом ZeV-енергій (не володіє релятивістським струменем), та галактики із зореутворенням UGC 4393, Mrk 7, IC 342, SDSS J081447.53+490400.7, що лежать на краю області.

**Можливі позагалактичні джерела FE-події.** Перелік АЯГ як можливих джерел триплету приведено у табл. 5, а перелік галактик з активним зореутворенням — у табл. 6. Положення об'єктів на небесній сфері відносно триплету приведено на рис. 3.

**Таблиця 5. АЯГ в околі триплету**

Ім'я	$l$ , град	$b$ , град	$l'$ , град	$z$	$S_p$
PADOVA 1	43.59	5.26	12.56	0.009	Sy1
MCG +04.28.002	67.01	-7.57	32.07	0.013	Sy1
H 1934-063	32.59	-13.07	9.48	0.01	Sy1.5
NGC 6814	29.35	-16.01	13.33	0.005	Sy1.5

**Таблиця 6. Галактики з зореутворенням в околі триплету**

Ім'я	Тип	$l$ , град	$b$ , град	$l'$ , град	$z$
MCG-04-47-011	Emission-line Galaxy	21.04	-26.24	26.04	0.002
IC 1317	Blue compact Galaxy	44.48	-19.99	18.58	0.013
UGC 11631	Emission-line Galaxy	47.02	-25.77	24.76	0.014
MCG+00-50-001	Emission-line Galaxy	37.88	-12.09	8.70	0.005
6dFGS gJ201931.1-051923	Emission-line Galaxy	38.36	-22.00	18.41	0.011
NGC 6821	Emission-line Galaxy	32.80	-14.87	11.20	0.005
MCG-01-52-004b	Emission-line Galaxy	36.32	-25.85	22.01	0.015
MCG-01-50-001	Emission-line Galaxy	32.57	-14.65	11.03	0.005
NGC 6962	LINER-type AGN	47.41	-25.37	24.59	0.014
6dFGS gJ202045.5-033606	Emission-line Galaxy	40.15	-21.48	18.30	0.017
6dFGS gJ201456.3-200052	Emission-line Galaxy	23.11	-27.00	25.75	0.016

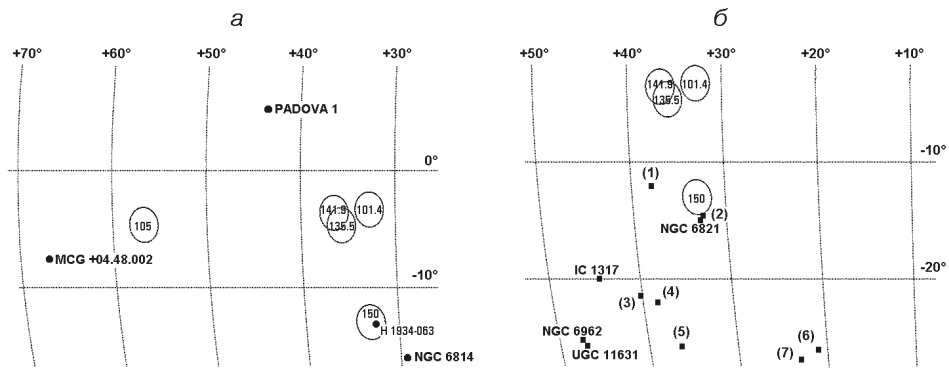


Рис. 3. Позагалактичні джерела на відстані до 80 Мпк в околі триплету: АЯГ (зліва, точки) та галактики із активним зореутворенням (справа, квадратики). Цифрами у дужках позначено об'єкти: (1) — MCG-00-50-001, (2) — MCG-01-50-001, (3) — 6dFGS gJ202045.5-033606, (4) — 6dFGS gJ201931.1-051923, (5) — MCG-01-52-004b, (6) — MCG-04-47-011, (7) — 6dFGS gJ201456.3-200052

**Можливі позагалактичні джерела триплету.** Як і у випадку FE- події, з табл. 5 і 6 та рис. 3 впливає, що серед позагалактичних об'єктів немає достатньо вірогідного джерела і для триплету. Обмеження на відстань та відхилення серед АЯГ задовольняють тільки чотири сейфертівські галактики та чотири достатньо близькі галактики із зореутворенням.

## ПОШУК МОЖЛИВИХ ГАЛАКТИЧНИХ ДЖЕРЕЛ FE-ПОДІЇ ТА ТРИПЛЕТУ

До можливих галактичних джерел FE-події та триплету відносяться новонароджені мілісекундні пульсари/магнетари (зараз їхній вік визначається часом затримки внаслідок відхилення траєкторії у магнітному полі Галактики) та магнетари різного віку, що виявляють активність у вигляді гігантських спалахів. Внаслідок орієнтаційних ефектів не всі замагнічені нейтронні зорі реєструються як пульсари, однак пульсарно-вітрові туманності, в яких відбувається прискорення, спостерігаються з усіх напрямків, тому, крім молодих пульсарів та магнетарів, до потенційних джерел відносимо і молоді залишки Наднових з пульсарно-вітровими туманностями. Несподівано близько до триплету виявився відомий мікроквазар SS433, тому розглянемо також і кореляції з відомими мікроквазарами в Галактиці [33].

У пульсарно-магнетарній моделі, крім протонів, можуть ефективно прискорюватись і ядра заліза, останні на шляху до детектора частково фрагментують на легші ядра, тому у потоці прискорених КПНВЕ очікуються протони, ядра заліза та CNO-групи. Оцінимо кут відхилення траєкторії та відповідну затримку часу приходу внаслідок відхилення у магнітному полі Галактики. Відхилення у магнітному полі залежить від напрямку та відстані до джерела.

На рис. 4 з роботи [24] показано структуру регулярного компонента магнітного поля Галактики. У напрямках на FE-подію ( $l = 163.4^\circ$ ) та

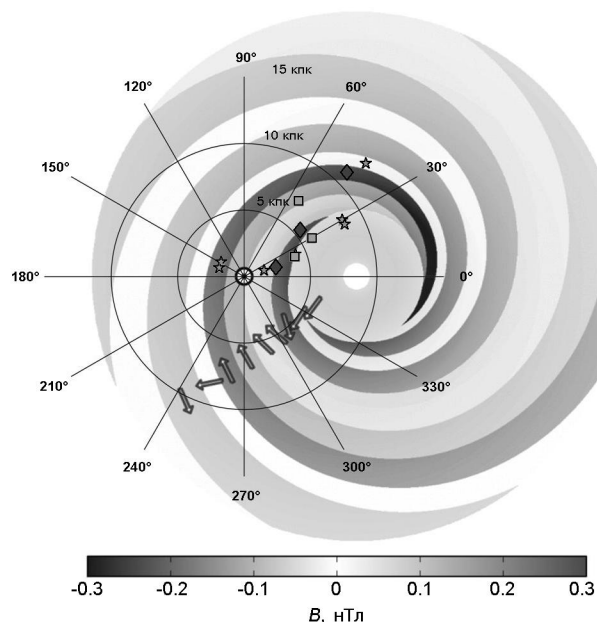


Рис. 4. Потенційні галактичні джерела в секторах FE-події ( $l = 163.4^\circ$ ) та триплету ( $l = 35^\circ$ ), накладені на карту регулярного компонента магнітного поля Галактики на зрізі  $z = 10$  пк з роботи [24]: квадратики — молоді пульсари, зірочки — магнетари, ромбики — мікроквазари, стрілки — напрямок магнітного поля

триплет ( $l = 35^\circ$ ) нанесено положення потенційних галактичних джерел FE-події та триплету.

Для потенційних джерел очікується таке відхилення траєкторії у магнітному полі:

— у випадковому компоненті кут  $\sim Z[d/(10 \text{ кпк})]^{1/2}[E/(10^{20} \text{ еВ})]^{-1}$ , що становить приблизно 1 для протона чи 30 для заліза, та затримка часу приходу  $\sim 1.4Z^2[d/(10 \text{ кпк})]^2[E/(10^{20} \text{ еВ})]^{-2}$ , що складає декілька років для протона чи тисячі років для заліза;

— у регулярному компоненті — аналогічні оцінки:

$$\sim d/R_L \sim 0.6Z[d/(1 \text{ кпк})][E/(10^{20} \text{ еВ})]^{-1}[B/(10^{10} \text{ Тл})], \text{ град,}$$

$$\sim d/c \quad (1/24) d/c^2$$

$$0.015Z^2[E/(10^{20} \text{ еВ})]^{-2}[B/10^{10} \text{ Тл}]^2[d/(1 \text{ кпк})]^3 \text{ років.}$$

**Можливі галактичні джерела FE-події.** Перелік можливих галактичних джерел FE-події приведено у табл. 7, 8 ( $d$  — відстань від Землі до об'єкта,  $P$  — період обертання,  $\dot{P} = dP/dt$  — зміна періоду з часом), положення цих об'єктів на небесній сфері відносно FE-події показано на рис. 5.

**Можливі галактичні джерела триплету.** Перелік можливих галактичних джерел триплету приведено в табл. 9 ( — характеристич-

Таблиця 7. Магнетари в околі події  $3 \cdot 10^{20}$  еВ

Ім'я	$l$ , град	$b$ , град	$d$ , кпк	$P$ , мс	$\dot{P}$ , $10^{-15}$
SGR 0501+4516	161.55	1.95	$\sim 2$	5762	5940
SGR 0418+5729	147.98	5.12	$\sim 2$	9078	4

Таблиця 8. Молоді залишки Наднових з ПВТ в околі події  $3 \cdot 10^{20}$  еВ

Ім'я	$l$ , град	$b$ , град	$d$ , кпк	Вік, років
G156.2+05.7	156.2	5.7	1—3	7000—26000
HB9	160.9	2.6	0.8—4	4000—7000

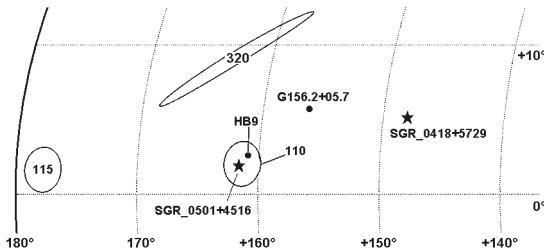


Рис. 5. Галактичні магнетари (зірочки) і молоді залишки Наднових (точки) в околі FE-події, овалами позначено області космічних променів з енергіями понад  $10^{20}$  еВ

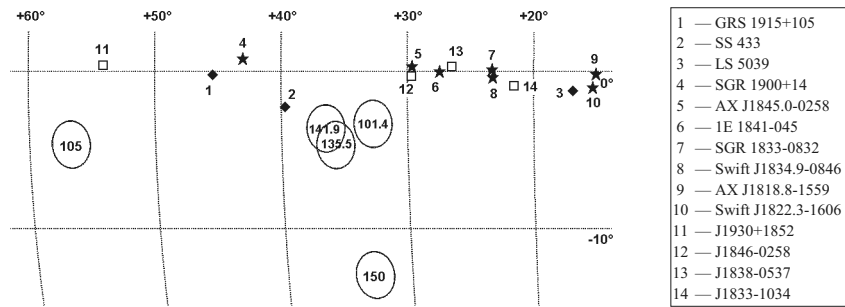


Рис. 6. Потенційні галактичні джерела триплету: квадратики — молоді пульсари, зірочки — магнетари, ромбики — мікроквазари, овали — області КП з енергіями понад  $10^{20}$  eВ

Таблиця 9. Галактичні компактні об'єкти в околі триплету

Ім'я	$l$ , град	$b$ , град	$l$ , град	$d$ , кпк	$P$ , мс	$\dot{P}$ , $10^{-15}$	$\tau$ , років
Молоді пульсари							
J1833-1034	21.50	-0.89	13.78	4.1	61.9	202.0	4850
J1838-0537	26.51	0.21	9.39	?	145.7	471.8	4890
J1846-0258	29.71	-0.24	6.39	5.8	326.6	7107.5	728
J1930+1852	54.10	0.27	19.56	7.0	136.9	750.6	2890
Магнетари							
SGR 1900+14	43.02	0.77	9.29	12.5	5199	92000	—
AX J1845.0-0258	29.56	0.11	6.71	~8.5	6971	?	—
1E 1841-045	27.39	-0.01	8.50	8.5	11788	40920	—
SGR 1833-0832	23.34	0.02	12.25	?	7565	3500	—
Swift J1834.9-0846	23.25	-0.34	12.23	4.2	2482	7960	—
Swift J1822.3-1606	15.35	-1.02	19.80	1,6	8437	21.4	—
AX J1818.8-1559	15.04	-0.25	20.24	?	?	?	—
Мікроквазари							
GRS 1915+105	45.36	-0.21	11.01	11	—	—	—
SS 433	39.69	-2.24	4.99	5.5	0.2	—	—
LS 5039	16.88	-1.28	18.25	2.5	—	—	—

ний вік пульсара). На рис. 6 приведено положення цих об'єктів на небесній сфері. Перелік молодих залишків Наднових з пульсарно-вітровими туманностями приведено в табл. 10. Положення на небесній сфері молодих залишків Наднових в околі триплету показано на рис. 7.

## ОБГОВОРЕННЯ ТА ВИСНОВКИ

Космічні промені надвисоких енергій з енергіями понад  $10^{20}$  eВ є найкращими трасерами джерел таких подій внаслідок зменшення відхилень траєкторій КПНВЕ у магнітних полях та можливих відстаней до джерел зі збільшенням енергії  $E$  (точніше жорсткості  $R = E/Z$ ) частинок.

**Таблиця 10. Молоді залишки Наднових з ПВТ**

Ім'я	$l$ , град	$b$ , град	$d$ , кпк	Вік, років
G000.0+00.0	0.0	0.0	8	1200—10000
G000.1-00.1	0.1	-0.1	—	—
G000.9+00.1	0.9	0.1	8.5—10	1900
W33	12.8	0.0	4	1200
G016.7+00.1	16.7	0.1	10	—
G021.5-00.9	21.5	-0.9	4.3—5.1	720—1070
3C396	39.2	-0.3	6.2	3000—7000

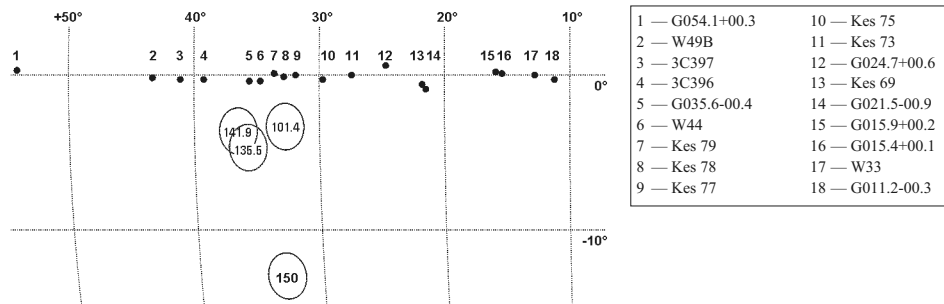


Рис. 7. Молоді залишки Наднових в околі триплету

Але навіть події таких енергій не виявляють явної анізотропії приходів, що унеможливило встановлення їхніх джерел. Тому в нашій роботі аналізувались два екстремальні випадки — FE-подія з найвищою з досі зареєстрованих енергією  $3 \cdot 10^{20}$  eV та (можливо фізичний) триплет подій у крузі радіуса до  $2 \cdot$  Ймовірними кандидатами цих подій серед позагалактичних джерел є АЯГ та галактики з активним зореутворенням, де очікуються достатньо часті спалахи Наднових з народженням молодих мілісекундних пульсарів/магнетарів. Серед галактичних джерел — також молоді пульсари-магнетари, вік яких зараз сумірний з часом затримки приходу КПНВЕ внаслідок відхилень траєкторій у галактичному магнітному полі, оскільки КПНВЕ прискорюються тільки у перші місяці-роки життя мілісекундного пульсара з потужним магнітодипольним випромінюванням. Магнетари більшого віку (сотні років і більше) можуть прискорювати КПНВЕ під час гігантських спалахів (внаслідок меншого енерговиділення, ніж у випадку новонародженого пульсара/магнетара сумарний потік КПНВЕ буде суттєво меншим і детектуватиметься тільки з близьких відстаней порядку кілопарсеків). Аналіз показує, що можливими джерелами FE-події можуть бути два магнетари: SGR 0501+4516 і SGR 0418+5729, а можливими джерелами триплету можуть бути молодий пульсар J1846-0258 і магнетари з табл. 9.

Очевидно, що наявні спостережувані дані недостатні для впевненого ототожнення КПНВЕ з їхніми астрофізичними джерелами. Ви-



рішальне значення для розв'язання проблеми джерел матиме збільшення статистики подій, особливо після запуску місії JEM-EUSO.

Автор вдячний розробникам каталогів, що були використані у роботі: ATFF Pulsar Catalogue [<http://www.atnf.csiro.au/people/pulsar/psrcat/>], The McGill Magnetar Catalog [<http://www.physics.mcgill.ca/pulsar/magnetar/main.html>], SNR Catalog [<http://www.physics.umanitoba.ca/snr/SNRcat/>], SIMBAD database, operated at CDS, Strasbourg, France.

1. *Aab A., Abreu P., Aglietta M., et al.* Searches for large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays detected above energy of  $10^{19}$  eV at the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array // *Astrophys. J.*—2014.—**794**, N 2.—P. 172.
2. *Aab A., Abreu P., Aglietta M., et al.* Searches for anisotropies in the arrival directions of the highest energy cosmic rays detected by the Pierre Auger Observatory // *Astrophys. J.*—2015.—**804**.—P. 15.
3. *Abbasi R. U., Abe M., Abu-Zayyad T., et al.* Indications of intermediate-scale anisotropy of cosmic rays with energy greater than 57 EeV in the northern sky measured with the surface detector of the Telescope Array experiment // *Astrophys. J.*—2014.—**790**, N 2.—P. L21.
4. *Abbasi R. U., Abe M., Abu-Zayyad T., et al.* Study of ultra-high energy cosmic ray composition using Telescope Array's middle drum detector and surface array in hybrid mode // *Astropart. Phys.*—2015.—**64**.—P. 49—62.
5. *Abbasi R., Bellido J., Belz J., et al.* Report of the working group on the composition of ultra high energy cosmic rays // 2015.—arXiv:1503.07540 [astro-ph.HE].
6. *Abu-Zayyad T., Aida R., Allen M., et al.* Energy spectrum of ultra-high energy cosmic rays observed with the Telescope Array using a hybrid technique // *Astropart. Phys.*—2015.—**61**.—P. 93—101.
7. *Allard D.* Extragalactic propagation of ultrahigh energy cosmic-rays // *Astropart. Phys.*—2012.—**39-40**, N 1.—P. 33—43.
8. *Aloisio R., Berezhinsky V., Blasi P., et al.* A dip in the UHECR spectrum and the transition from galactic to extragalactic cosmic rays // *Astropart. Phys.*—2007.—**27**, N 1.—P. 76—91.
9. *Aloisio R., Berezhinsky V., Blasi P.* Ultra high energy cosmic rays: implications of Auger data for source spectra and chemical composition // *J. Cosmol. and Astropart. Phys.*—2014.—N 10.—P. 020.
10. *Berezinsky V. S., Grigorieva S. I., Hnatyk B. I.* Extragalactic UHE proton spectrum and prediction for iron-nuclei flux at  $10^8$ — $10^9$  GeV // *Astropart. Phys.*—2004.—**21**, N 6.—P. 617—625.
11. *Bird D. J., Corbato S. C., Dai H. Y., et al.* Detection of a cosmic ray with measured energy well beyond the expected spectral cutoff due to cosmic microwave radiation // *Astrophys. J.*—1995.—**441**, N 1.—P. 144—150.
12. *Duncan R. C., Thompson C.* Formation of very strongly magnetized neutron stars - Implications for gamma-ray bursts // *Astrophys. J.*—1992.—**392**, N 1.—P. L9—L13.
13. *Durrer R., Neronov A.* Cosmological magnetic fields: their generation, evolution and observation // *Astron. and Astrophys. Rev.*—2013.—**21**.—P. 62.
14. *Eichler D.* Ultrahigh energy activity in giant magnetar outbursts // 2005.—arXiv:astro-ph/0504452.
15. *Elyiv A. A., Karachentsev I. D., Karachentseva V. E., et al.* Low-density structures in the Local Universe. II. Nearby cosmic voids // *Astrophys. Bull.*—2013.—**68**, N 1.—P. 1—13.
16. *Etchegoyen A.* Science and detectors of the Pierre Auger Observatory // 2010.—arXiv:1004.2635 [astro-ph.IM].

17. Fang K., Kotera K., Murase K., et al. Testing the newborn pulsar origin of ultrahigh energy cosmic rays with EeV neutrinos // *Phys. Rev. D.*—2014.—**90**.—P. 103005.
18. Farrar G.R., Piran T. Tidal disruption jets as the source of ultra-high energy cosmic rays // 2014.—arXiv:1411.0704v1 [astro-ph.HE].
19. Ferrand G., Safi-Harb S. A census of high-energy observations of Galactic supernova remnants // *Adv. Space Res.*—2012.—**49**, N 9.—P. 1313—1319.
20. Fukushima M. Recent results from Telescope Array // 2015.—arXiv:1503.06961 [astro-ph. HE].
21. Halzen F., Vazquez R. A., Stanev T., et al. The highest energy cosmic ray // *Astropart. Phys.*—1995.—**3**, N 2.—P. 151—156.
22. He H., Kusenko A., Nagataki S., et al. The possible extragalactic source of ultra-high-energy cosmic rays at the telescope array hotspot // 2014.—arXiv:1411.5273v1 [astro-ph. HE].
23. Jansson R., Farrar G. R. The galactic magnetic field // *Astrophys. J.*—2012.—**761**, N 1.—P. L11.
24. Jansson R., Farrar G. R. A new model of the Galactic magnetic field // *Astrophys. J.*—2012.—**757**, N 1.—P. 14.
25. Kotera K., Olinto A. V. The astrophysics of ultrahigh energy cosmic rays // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—2011.—**49**.—P. 119—153.
26. Kuempel D. Extragalactic propagation of ultra-high energy cosmic rays // 2014.—arXiv:1409.3129v2 [astro-ph.HE].
27. Lemoine M., Kotera K., Petri J. On ultra-high energy cosmic ray acceleration at the termination shock of young pulsar winds // 2014.—arXiv:1409.0159v1 [astro-ph.HE].
28. Lemoine M., Waxman E. Anisotropy vs chemical composition at ultra-high energies // *J. Cosmol. and Astropart. Phys.*—2009.—N 11.—P. 009.
29. Liu X.-W., Wu X.-F., Lu T. Diffuse high energy neutrinos and cosmic rays from hyperflares of soft-gamma repeaters // *New Astron.*—2010.—**15**, N 3.—P. 292—296.
30. Manchester R. N., Hobbs G. B., Teoh A., et al. The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue // *Astron. J.*—2005.—**129**, N 4.—P. 1993—2006.
31. Moharana R., Razzaque S. Angular correlation of cosmic neutrinos with ultrahigh-energy cosmic rays and implications for their sources // 2015.—arXiv:1501.05158v1 [astro-ph. HE].
32. Olausen S. A., Kaspi V. M. The McGill Magnetar Catalog // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2014.—**212**, N 1.—P. 6.
33. Ritter H., Kolb U. Catalogue of cataclysmic binaries, low-mass X-ray binaries and related objects (Seventh edition) // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**404**.—P. 301—303.
34. Sokolsky P. Recent results from TA // Report on workshop “Multimessenger Astronomy in the Era of PeV Neutrinos.”—2014.
35. Takami H., Murase K., Dermer C. D. Isotropy constraints on powerful sources of ultrahigh-energy cosmic rays at  $10^{19}$  eV // 2014.—arXiv:1412.4716v2 [astro-ph.HE].
36. Troitsky S. V. Doublet of cosmic-ray events with primary energies  $> 10^{20}$  eV // *J. Experiment. and Theor. Phys. Lett.*—2012.—**96**, N 1.—P. 13—16.
37. Tully R. B., Fisher J. R. Nearby galaxies atlas. — Cambridge: University Press, 1987.
38. Wenger M., Ochsenbein F., Egret D., et al. The SIMBAD astronomical database. The CDS reference database for astronomical objects // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—2000.—**143**.—P. 9—22.

Стаття надійшла до редакції 11.06.15