

УДК 524.1, 524.7

А. А. Елиїв, Б. І. Гнатик

Науково-дослідна лабораторія «Астрономічна обсерваторія»
Київського національного університету ім. Тараса Шевченка
04053 Київ-53, вул. Обсерваторна 3

**Кореляція космічних променів надвисоких енергій
з різними класами позагалактичних об'єктів:
внесок найближчих та найяскравіших членів вибірок**

Досліджено кореляцію напрямків приходу космічних променів надвисоких енергій (КПНВЕ), зареєстрованих в експериментах AGASA та SUGAR, з розподілом на небі різних класів позагалактичних об'єктів — потенційних джерел космічних променів (КП). На відміну від інших досліджень, де у вибірці включались об'єкти різних класів (порядку сотень у вибірці), тут досліджувались кореляції з найяскравішими та найближчими об'єктами кожного класу, оскільки можливість зареєструвати від них КП більша через більший очікуваний потік КП та менших втрат енергії на їхнє поширення. Методом Монте-Карло досліджено кореляцію КПНВЕ з першими 3, 5, 10 та 20 об'єктами серед найближчих та найяскравіших скупчень Ейбеля, радіогалактик, надсвітних інфрачервоних галактик, лачертид, а також з 10 найближчими надскупченнями галактик. Виявлено достовірну кореляцію КП AGASA з п'ятьма найяскравішими радіогалактиками (внаслідок збігу радіогалактики 3C123 з дублетом КП) та з десятьма найяскравішими надсвітними інфрачервоними галактиками (9 пар галактика — КП для шести галактик), з ймовірностями випадкової реалізації відповідно 0.004 та 0.0007. За розрахованою енергією генерації КП в потенційних джерелах оцінено природу частинок (протони чи ядра заліза). Для подій з установки SUGAR помітної кластеризації та кореляції з розглядуваними позагалактичними об'єктами не виявлено.

КОРРЕЛЯЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ С РАЗНЫМИ КЛАССАМИ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ: ВКЛАД БЛИЖАЙШИХ И ЯРЧАЙШИХ ЧЛЕНОВ ВЫБОРОК, Элийев А. А., Гнатик Б. И. — Исследованы корреляции направлений прибытия космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ), зарегистрированных в экспериментах AGASA и SUGAR, с распределением на небе разных классов внегалактических объектов — потенциальных источников космических лучей (КЛ). В отличие от других исследований, где в выборку включалось значительное количество объектов разных классов (порядка сотен в выборке), здесь исследуются корреляции с ярчайшими и ближайшими объектами каждого класса, поскольку возможность зарегистрировать от них КЛ усиливается вследствие большего ожидаемого потока КЛ и меньших потерь энергии при их распространении. Методом Монте-Карло

исследованы корреляции КЛСВЭ с первыми 3, 5, 10 и 20 объектами среди ближайших и ярчайших скоплений Эйбеля, радиогалактик, сверхсветимых инфракрасных галактик, лацертид, а также с 10 наиболее близкими сверхскоплениями галактик. Обнаружена достоверная корреляция КЛ AGASA с пятью ярчайшими радиогалактиками (вследствие совпадения радиогалактики 3C123 с дублетом КЛ) и с десятью наиболее яркими сверхсветимыми инфракрасными галактиками (9 пар галактика — КЛ для шести галактик), с вероятностью случайной реализации 0.004 и 0.0007 соответственно. По рассчитанной энергии генерации КЛ в потенциальных источниках оценена природа частиц (протоны или ядра железа). Для событий установки SUGAR заметной кластеризации и корреляции с рассматриваемыми внегалактическими объектами не обнаружено.

CORRELATION OF THE ULTRA HIGH ENERGY COSMIC RAYS WITH DIFFERENT CLASSES OF EXTRAGALACTIC OBJECTS: CONTRIBUTION OF THE NEAREST AND BRIGHTEST MEMBERS OF SAMPLE, by Elyiv A. A., Hnatyk B. I. — The correlations of ultra high energy cosmic rays (UHECR) arrival directions, detected in the experiments AGASA and SUGAR, with sky distribution of extragalactic objects of different classes (potential cosmic ray sources) are investigated. Contrary to previous investigations of various authors with the use of significant number of objects of different classes (about hundreds in a samples), we investigated the correlation with the brightest and nearest objects of each class, as the possibility to detect cosmic rays (CR) from them increases owing to a greater expected flow of CR and less energy losses during CR propagation. Using the Monte-Carlo method, we investigated correlation of UHECRs with first 3, 5, 10 and 20 objects among the nearest and brightest of Abell clusters, radio galaxies, ultra luminous infrared galaxies, BL Lacs, and also with 10 closest superclusters of galaxies. The correlation of AGASA CR with five brightest radio galaxies (owing to coincidence of the radio galaxy 3C123 with a CR doublet) and with ten brightest infrared galaxies (9 pairs of a galaxy — CR for six galaxies), with probability of a random realization of 0.004 and 0.0007, respectively, is found to be significant. From the calculated generation energy of CR in potential sources, the nature of particles (protons or nuclei of iron) is determined. For events of the detector SUGAR, an appreciable clusterisation and correlation with extragalactic objects under consideration are not revealed.

ВСТУП

Актуальною проблемою астрофізики залишається походження космічних променів надвисоких енергій (КПНВЕ). З одного боку, залишається невідомим механізм прискорення до спостережуваних енергій понад 10^{20} еВ [1, 10, 15, 27, 34], а з другого — проблематичним виявляється поширення їх на значні відстані у міжгалактичному середовищі. Протоны з енергією понад $4 \cdot 10^{19}$ еВ зазнають значних енергетичних втрат при взаємодії з мікрохвильовим випромінюванням, що повинно приводити до так званого обрізання Грайзена—Зацепіна—Кузьміна (ГЗК-границі) [24, 42] енергетичного спектру КПНВЕ. Проте у експерименті AGASA було зареєстровано значну кількість подій з енергіями, що перевищують ГЗК-границю.

Розв'язати проблему походження джерел КПНВЕ допомогло б надійне ототожнення хоча б кількох подій з відповідними астрофізичними об'єктами. Якщо КП — нейтральні частинки, або міжгалактичні магнітні поля досить слабкі, то напрямки прибуття КП будуть вказувати на джерела. Тому природним є пошук кореляцій між напрямками приходу КПНВЕ та астрофізичними об'єктами — їхніми потенційними джерелами. Так, у

роботі [23] досліджено кореляцію між променями з енергією понад 10^{19} еВ з установки HiRes і найяскравішими лацертидами. Методом Монте—Карло виявлено значну кореляцію для 14 пар «космічний промінь — лацертида», розміром менше 0.8° при ймовірності випадкової реалізації порядку 10^{-4} . В експерименті AGASA, з урахуванням магнітного поля Галактики і заряду частинок, також виявлено кореляцію з лацертидами [37]. Ці дані є дуже суперечливими. Наприклад, у роботі [14] методом двоточкової кореляційної функції статистично достовірної кореляції космічних променів установки AGASA з лацертидами не виявлено, але показано незначну взаємну кореляцію між КПНВЕ з енергією понад $8 \cdot 10^{19}$ еВ і скупченнями галактик Ейбеля. В роботі [22] дано оцінку можливості експериментально підтвердити чи відкинути кореляцію КП з лацертидами.

Цінною інформацією про природу джерел КПНВЕ стало б виявлення анізотропії їхнього потоку. Оцінка кутової кореляційної функції для космічних променів HiRes вище 10^{19} еВ та комбінованих даних HiRes і AGASA для енергій вище $4 \cdot 10^{19}$ еВ не виявила значного відхилення від ізотропного розподілу у великих масштабах [20]. Зате на малих масштабах до 3° зафіксовано значну автокореляцію КПНВЕ AGASA на рівні більше 4σ при ймовірності випадкової реалізації 0.1 % і однорідність розподілу на масштабах більше 4° [14]. Вказувалось також на помітне на рівні 3σ згущення до супергалактичної площини для енергій $(5...8) \cdot 10^{19}$ еВ. Для інших енергій відхилення від ізотропного розподілу немає. В роботі [6] проведено пошук анізотропії космічних променів з експерименту HiRes на малих масштабах. Найбільший ступінь кластеризації був зафіксований для енергій вище $1.69 \cdot 10^{19}$ еВ — виявлено 10 пар розміром менше 2.2° з ймовірністю випадкової реалізації 1.9 %. До масштабу 5° значної кореляції не виявлено. Ніякої помітної кластеризації подій HiRes не виявлено в роботі [35].

У попередніх дослідженнях [2, 3, 5, 14, 23, 33, 38] для пошуку кореляцій напрямків прибуття КПНВЕ з різними класами астрофізичних об'єктів використовувались достатньо великі вибірки різних позагалактичних об'єктів. Але при такому підході кореляція з дійсними джерелами може знівельоватися наявністю великої кількості слабких та далеких об'єктів з

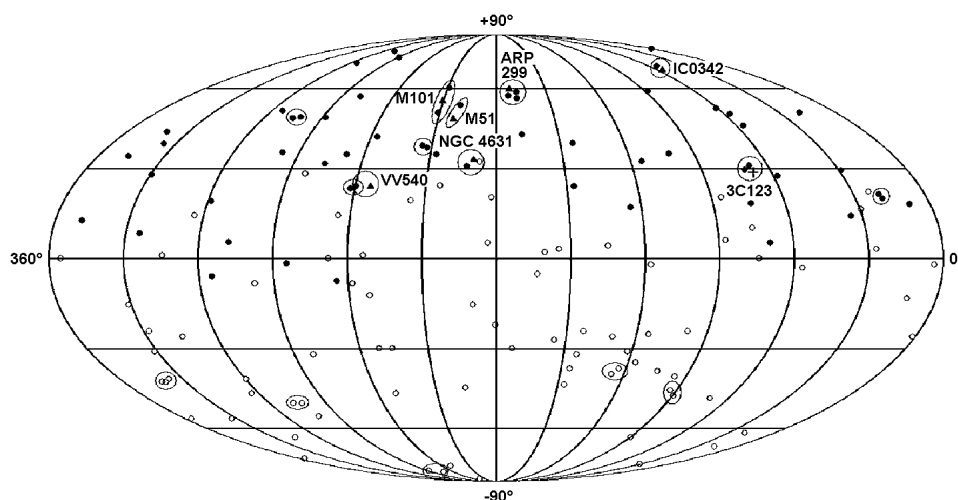


Рис. 1. Розподіл на небесній сфері КПНВЕ: AGASA — точки, SUGAR — кружки, надсвітні інфрачервоні галактики, для яких виявлена кореляція з КП AGASA — трикутники. Обведені дублети, триплети та виявлені кореляції КП з радіогалактикою та інфрачервоними галактиками. Екваторіальна система координат

дуже малою ймовірністю детектування КП. Так, наявність чорнотільного обрізання утруднює прихід космічних променів високих енергій з далеких відстаней. Крім того, чим вищий потік від потенційного джерела КПНВЕ в радіо-, інфра- чи в оптичному діапазоні, тим більша ймовірність того, що і потік КП буде вищим. Як результат, навіть при однорідному просторовому розподілі джерел КПНВЕ ефекти селекції приведуть до зростання ролі близьких та яскравих джерел. Тому в нашій роботі для кожного класу позагалактичних об'єктів ми дослідили кореляції з КПНВЕ для обмежених вибірок з 3, 5, 10, 20 найближчих та найяскравіших членів. Як потенційні джерела розглядались надскупчення галактик, ейбелівські скупчення галактик, радіогалактики, надсвітні інфрачервоні галактики та лацертиди. У випадку протяжних надскупчень галактик, які займають на небесній сфері тисячі квадратних градусів, оцінено відхилення кількості КП, що проектується на їхні площі, від статистично очікуваної. Для виявлених кандидатів у джерела КП розраховано величину та енергію генерації, оцінено природу частинок (протони чи ядра заліза).

СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИБІРОК КПНВЕ ДЕТЕКТОРІВ AGASA ТА SUGAR

Установка AGASA за час своєї роботи зареєструвала 58 КП з енергіями понад $4 \cdot 10^{19}$ еВ. Зона видимості установки по схиленню від -10° до $+80^\circ$. Точність визначення напрямку прибуття — 1.6° , похибка визначення енергії — 30 % [26]. Австралійський експеримент SUGAR зареєстрував 80 КПНВЕ з енергією вище $4 \cdot 10^{19}$ еВ у зоні огляду від -90° до $+40^\circ$ з точністю визначення напрямку $3^\circ \cdot \sec(\theta)$, де θ — зенітний кут приходу КП [41]. На рис. 1 показано розподіл КПНВЕ на небесній сфері.

Дослідженню анізотропії та кластеризації КПНВЕ детекторів AGASA та SUGAR присвячено ряд робіт [6, 16, 18, 20, 28, 35, 38]. Стандартною процедурою при цьому є застосування методу Монте-Карло до пошуку маломасштабної анізотропії (кластеризації) напрямків приходу КП та оцінки ймовірності їхньої випадкової реалізації. Надалі нам будуть потрібні характеристики дублетів та триплетів у розподілі КПНВЕ в залежності від кутових відстаней між компонентами мультиплетів, які ми розраховували за допомогою методу Монте-Карло. При цьому спочатку ми підраховували кількість $N_\varphi \equiv N(<\varphi)$ взаємних пар КП, кутові відстані φ між якими менші за певну величину (рис. 4). Далі випадковим чином згенерували положення спостережуваної кількості КП на небесній сфері у поясі видимості установ-

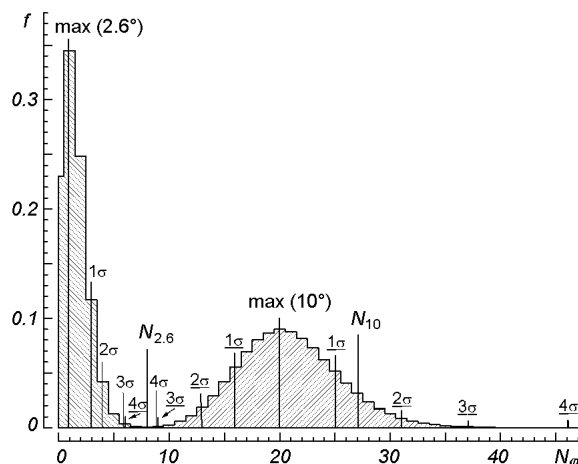


Рис. 2. Частота f випадкової реалізації пар 58 КП AGASA розміром менше 2.6° та 10°

Рис. 3. Ймовірність P_N випадкової реалізації кількості пар, не меншої за спостережувану

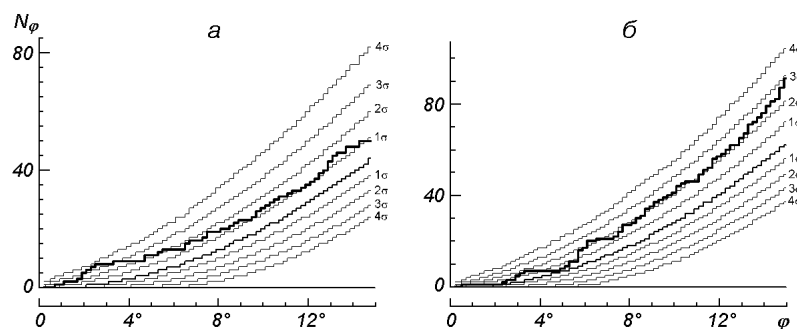
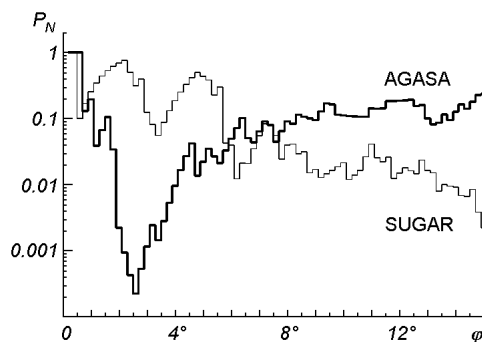


Рис. 4. Залежність кількості пар КП AGASA (а) і SUGAR (б) від їхнього розміру: тонкі лінії — найбільш ймовірна кількість пар при випадковому розподілі, товсті — реальна кількість пар

Таблиця 1. Десять найяскравіших на частоті 178 МГц радіоґалактик в полі видимості установки AGASA

ЗС	Інша назва	α , град	δ , град	z	Потік, Ян
405	Cygnus A	299.4	40.6	0.057	8100
274	Virgo A	187.05	12.7	0.004	970
348	Hercules A	252.15	5.1	0.154	325
353	4C+29.14	259.5	1.0	0.031	203
123	B2 0433+29	68.55	29.6	0.218	175
295	4C+52.30	212.4	52.5	0.473	73
273	PG 1226+023	186.6	2.3	0.157	67
196	[HB89] 0809+483	122.55	48.4	0.828	59
84	Perseus A	49.05	41.3	0.018	58
147	[HB89] 0538+498	84.6	49.8	0.544	58

ки, і підраховали кількість N_φ випадково утворених пар, розміром менших за певну величину. Таку процедуру повторили $8 \cdot 10^5$ разів. Для кожного розміру пар ми отримали розподіл їхньої кількості N_φ за частотою f випадкової реалізації (рис. 2). За аналогією з нормальним розподілом відкладено еквіваленти 1σ , 2σ , 3σ та 4σ інтервалів, які відмежовують від кінців розподілу площі відповідно 18.87, 2.28, 0.135 та 0.0032 %. Ймовірність P_N випадкової реалізації кількості пар, не меншої за спостережувану, обчислюється як сума відповідних ймовірностей при випадковому розподілі (рис. 3).

Аналіз показав, що найбільше відхилення кількості пар від статистично очікуваної дорівнює 3.6σ і має місце для дублетів розміром менше за 2.6° (рис. 4, а). При цьому спостережувана кількість пар складає $N_{2.6} = 8$, а

ймовірність випадкової реалізації восьми і більше пар сягає $P_8 = 2 \cdot 10^{-4}$ (рис. 3). На рис. 2 показано розподіли для пар $\varphi < 2.6^\circ$, спостережувана кількість ($N_{2.6} = 8$) яких найбільше відрізняється від найімовірнішої ($N = 1$). Поруч для порівняння показано те ж для пар $\varphi < 10^\circ$. Для кожного розподілу показані відповідні σ -інтервали. Аналогічний аналіз можливості реалізації одного триплету подій (С2 в роботі [26]) показав для нього ймовірність випадкової реалізації 0.012. Отже, можна констатувати існування анізотропії КПНВЕ AGASA у масштабах до 3° та рівномірний розподіл напрямків у великих масштабах. Для космічних променів SUGAR методом Монте-Карло анізотропії не виявлено (рис. 3, 4, δ).

КОРЕЛЯЦІЇ КПНВЕ З НАЙБЛИЖЧИМИ ТА НАЙЯСКРАВШИМИ ПРЕДСТАВНИКАМИ ЇХНІХ ПОТЕНЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

В роботі [4] показано, що регулярний компонент галактичного магнітного поля домінує над випадковим у відхиленні високоенергетичних протонів. Так, для енергій вище $4 \cdot 10^{19}$ eV відхилення складає менше 8° . У турбулентному позагалактичному магнітному полі з середньою індукцією 10^{-13} Тл і довжиною когерентності 1 Мпк відхилення протона з енергією $4 \cdot 10^{19}$ eV на відстані 20 Мпк складає в середньому 3° [15]. Для ядер заліза відповідні відхилення будуть на порядок більшими. Отже, при умові слабких галактичних та міжгалактичних магнітних полів, незважаючи на похибки встановлення напрямку приходу і на випадкові відхилення у магнітних полях, повинна зберігатись кореляція напрямків приходу із джерелами КПНВЕ (особливо для розглядуваних нами близьких об'єктів). Для пошуку кореляцій між напрямками прибуття КП і їхніми можливими точковими

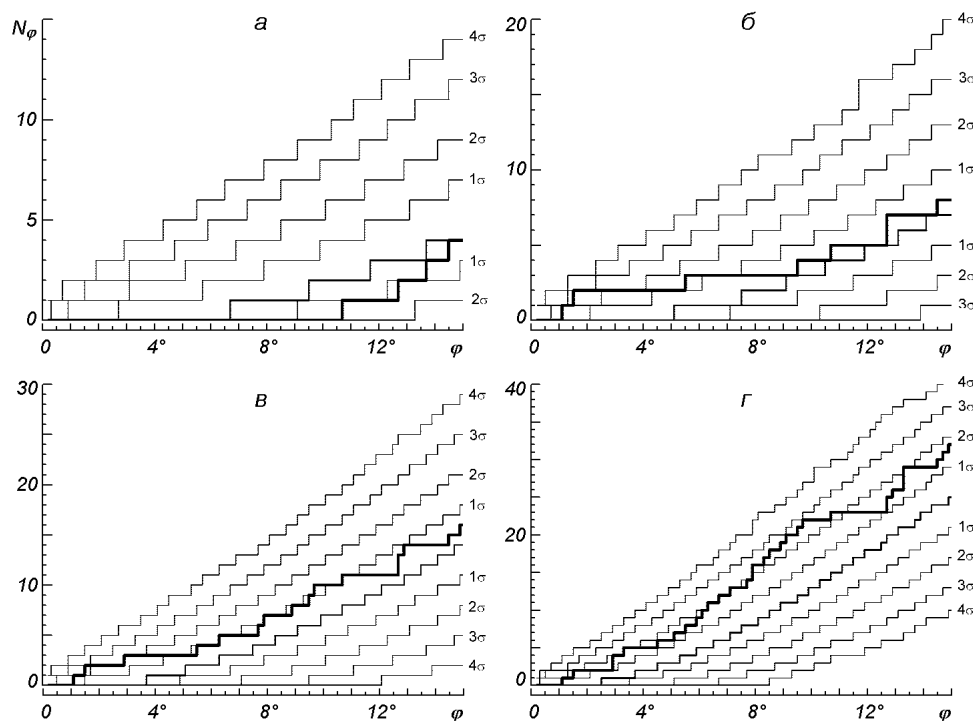


Рис. 5. Залежність кількості пар КПНВЕ AGASA — радіогалактика для 3 (а), 5 (б), 10 (в), 20 (г) радіогалактик з навищим потоком на частоті 178 МГц від їхнього розміру (тонкі лінії — найбільш ймовірна кількість пар при випадковому розподілі, товсті — реальна кількість пар)

Рис. 6. Залежність кількості пар КПНВЕ AGASA — галактика для 10 інфрачервоних галактик з найвищим потоком на довжині хвилі 60 мкм: тонкі лінії — найбільш ймовірна кількість пар при випадковому розподілі, товсті — реальна кількість пар

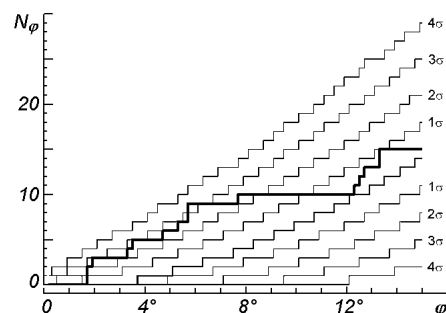
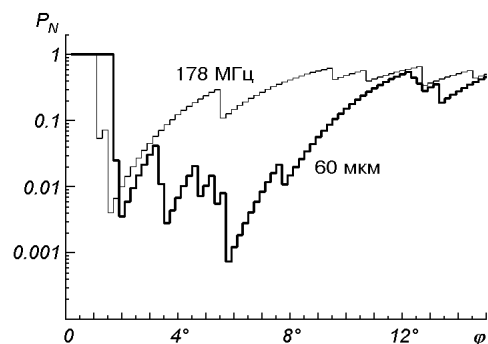


Рис. 7. Ймовірності випадкової реалізації спостережуваної та більшої кількості пар для п'яти радіогалактик з найвищим потоком на частоті 178 МГц (тонка лінія) та для 10 інфрачервоних галактик з найвищим потоком на довжині хвилі 60 мкм (товста лінія)



джерелами ми використали процедуру, аналогічну до пошуку кластерів. Розглядалися пари КП — джерело в області видимості детектора. Оскільки один космічний промінь може мати лише одне джерело, то максимальна кількість пар вичерпується кількістю космічних променів. Для досліджень ми взяли класи об'єктів, які з фізичних міркувань вважаються найімовірнішими джерелами КПНВЕ.

Радіогалактики завдяки наявності активних процесів, радіоплям, джетів, ударних хвиль вважаються можливими прискорювачами космічних променів до енергій 10^{20} eV [21, 31]. Для дослідження їхніх кореляцій з КП ми використали вибірки найближчих радіогалактик та радіогалактик з найбільшим потоком на частоті 178 МГц для AGASA (<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/ftp-index?VIII/1A>) [9, 17] та 408 МГц для SUGAR (<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/ftp-index?VIII/3>) [13] (табл. 1). Результати досліджень для найяскравіших 3, 5, 10 та 20 радіогалактик приведено на рис. 5. Виявлено достовірну кореляцію космічних променів AGASA для вибірки з п'яти галактик, як бачимо, саме завдяки вкладу в кореляцію п'ятої по яскравості радіогалактики 3C123, яка з точністю до 2° збігається з дублетом космічних променів AGASA, на рівні 3σ , з ймовірністю випадкової реалізації $4 \cdot 10^{-3}$ (рис. 5, 7). Ці рисунки показують також переваги використання малих вибірок, оскільки перехід до більших вибірок (в нашому випадку до 10 і 20 членів) замиває вклад радіогалактики 3C123. Аналогічний аналіз обмежених вибірок найближчих радіогалактик кореляції не виявив.

Надсвітні інфрачервоні галактики з ознаками інтенсивного зореутворення, злиття та газодинамічної активності є привабливими кандидатами на джерела КПНВЕ [8, 15, 33]. Нами були вибрані галактики з каталогу IRAS PSCz (<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/ftp-index?VII/221>) [32] з найбільшим потоком на довжині 60 мкм та найближчі. Аналіз показав значну кореляцію космічних променів AGASA з 10 найяскравішими інфрачервоними галактиками (табл. 2). Спостерігається дев'ять пар розміром менше 6° , утворених шістьма джерелами; відхилення від статистично очікуваних

Таблиця 2. Десять найяскравіших інфрачервоних галактик в полі видимості AGASA

IRAS	Інша назва	α , град	δ , град	Відстань, Мпк	Потік, Ян (60 мкм)
09517+6954	M82	147.93	69.90	4.9	1217.26
03419+6756	IC 0342	55.49	67.93	3.5	232.69
02401-0013	M77	40.03	-0.22	16.8	189.16
06106+7822	NGC 2146	92.68	78.37	15.4	139.05
20338+5958	NGC 6946	308.46	59.97	5.0	124.26
11257+5850	ARP 299	171.42	58.83	44	105.8
15327+2340	VV 540	233.19	23.67	78	104.1
B/066/901	M51	201.94	47.45	7.8	98.8
14013+5435	M101	210.34	54.58	5.3	80.04
12396+3249	NGC 4631	189.92	32.82	8.5	75.36

двох пар склало 3.3σ (рис. 6), а ймовірність випадкової реалізації $7.4 \cdot 10^{-4}$ (рис. 7). Вибірки з найближчих інфрачервоних радіогалактик не показали кореляції з КП.

Лацертиди — найімовірніші джерела КПНВЕ, оскільки лише вони виявляють ознаки кореляції з КПНВЕ [5, 22, 23]. Ми провели пошук кореляції КП з найближчими об'єктами та найяскравішими у видимому діапазоні (<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/ftp-index?VII/235>) [34]. В жодному випадку кореляції не виявлено.

Ейбелівські скупчення галактик з ймовірними магнітними полями в декілька мкГ і довжиною когерентності до 1 Мпк, здатні утримувати і прискорювати космічні промені до енергій 10^{20} еВ [29]. Однак проведений аналіз не показав кореляції КПНВЕ з вибірками найближчих скупчень Ейбеля [7].

Надскупчення галактик виділяються як групи скупчень Ейбеля [7, 19, 36, 40, 43]. Розмірами в десятки Мпк вони займають на небесній сфері площі до 500 град^2 , і є зонами підвищеної концентрації галактик, а отже, і можливих джерел КПНВЕ. Пошук кореляцій для надскупчень полягав в оцінці суттєвості надлишку кількості КП, зафіксованих з площі вибраного надскупчення, над статистично очікуваною $m = N \frac{\omega}{\Omega}$, де N — кількість всіх КП, зареєстрованих даною установкою, ω — площа, яку займає надскупчення на небесній сфері, Ω — площа зони огляду установки. Оскільки кутові розміри надскупчень сягають 20° , то при такому підході несуттєвими стають впливи похибок визначення напрямку прибуття КП. Для дослідження ми вибрали 10 найближчих надскупчень галактик у полі видимості AGASA та SUGAR [43]. Ймовірність p того, що станеться r випадкових попадань КП на площу певного надскупчення, дається біноміальним розподілом і добре апроксимується розподілом Пуассона $P(r) = \frac{m^r}{r!} e^{-m}$. В табл. 3 представлені ймовірності випадкових реалізацій r та більшої кількості попадань. Для відносно малих ймовірностей оцінено відхилення від статистично очікуваної кількості m в еквівалентних σ -інтервалах. Як видно, для жодного надскупчення не виявлено надлишку КП вище 2σ .

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ТЕСТ КАНДИДАТІВ У ДЖЕРЕЛА КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ

Результатом викладених вище досліджень стало виявлення семи кандидатів на джерела 11 КПНВЕ, зареєстрованих детектором AGASA (табл. 2). Додатковим тестом на реальність цих джерел є оцінка енергії КП, яку вони

Таблиця 3. Ймовірність $P(\geq r)$ випадкової реалізації спостережуваної r та більшої кількості збігів КП установок AGASA та SUGAR з 10 найближчими надскупченнями галактик, та відхилення величини r від очікуваної кількості пар m в еквівалентних σ інтервалах

Назва	m	r	$P(\geq r)$	σ
AGASA				
Perseus-Pisces	1.12	0	1	—
Coma	0.69	1	0.50	—
Hercules (a)	0.35	1	0.30	—
Leo	0.68	0	1	—
Hercules (b)	0.52	2	0.10	1.5
A 2572, 2589, 2593, 2657	0.20	1	0.18	1.0
A 119, 147, 168	0.18	0	1	—
A 160, 193, 195	0.37	2	0.05	1.8
A 912, 930, 957, 970, 978, 979, 993	0.51	0	1	—
A 1216, 1308, 1334	0.12	0	1	—
SUGAR				
Centaurus	2.64	3	0.49	—
Pavo-Indus	0.98	2	0.26	—
Coma	0.67	2	0.15	1.2
A 2731, 2806, 2836, 2870, 2877, 2896	0.89	0	1	—
Hercules (a)	0.34	0	1	—
Leo	0.65	0	1	—
Hercules (b)	0.51	1	0.40	—
Shapley (a)	0.23	0	1	—
A 548, 3341, 3374, 3381, 3390	0.82	1	0.56	—
A 2572, 2589, 2593, 2657	0.20	0	1	—

повинні були мати в момент генерації. Оскільки доля нейтральних частинок (фотонів, нейтронів, нейтрино тощо) у потоці КПНВЕ не може бути значною [15], надалі обмежимося найімовірнішими кандидатами в КПНВЕ — протонами та ядрами, зокрема ядрами заліза.

Знаючи відстань r до джерела (а отже, і час поширення $T = r/c$), енергію E зареєстрованого КП, та енергетичні втрати $-\frac{1}{E} \frac{dE}{dt} = \beta(E, z)$ як функцію від червоного зміщення $z(t)$, можна відновити початкову енергію генерації E_0 з умови $E = E_0 \exp\left(-\int_0^T \beta(E, z) dt\right)$ [1]. При $E < 10^{18}$ еВ для протонів та $E < 3 \cdot 10^{19}$ еВ для ядер заліза домінують адіабатичні втрати внаслідок розширення Всесвіту — $\beta_H(E, z) = (1+z)^{3/2} H_0$, де H_0 — постійна Габбла. Для протонів до $4 \cdot 10^{19}$ еВ домінують втрати на утворення електрон-позитронних пар при взаємодії з реліктовими фотонами $p + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$ + p , для вищих енергій — втрати при фотопіонних реакціях $p + \gamma \rightarrow \pi + N$ [11]. У випадку заліза крім втрат на утворення електрон-позитронних пар, при $E > 10^{20}$ еВ домінує значення має фотодисоціація ядер [12]. В епоху z втрати визначаються як $\beta(E, z) = (1+z)^3 \beta((1+z)E, 0)$.

Оскільки похибка визначення енергії КП детектором AGASA складає $\pm 30\%$ [26], то доцільно оцінити нижню і верхню межу енергії генерації КП. Розглянуто два крайні випадки КП: протони і ядра заліза. Вважалося, що максимальна енергія генерації становить 10^{22} еВ. Як видно з табл. 4, промені, зареєстровані від радіогалактики 3C123, можуть бути лише ядрами заліза, для інших КП (від інфрачервоних галактик, які знаходяться на близьких відстанях) обмежень на хімічний склад немає, оскільки і протони, і ядра заліза витримують енергетичний критерій.

Таблиця 4. Кандидати в джерела КПНВЕ

Кандидати в джерела	r, Мпк	E, 10^{19} еВ	θ , град	E_0 , 10^{19} еВ	
				Для протонів	Для ядер заліза
Радіогалактика					
3C123	800	4.89	1.8	> 1000	> 12
		5.47	1.2	> 1000	> 12
Інфрачервоні галактики					
ARP299	44	5.50	1.8	4.0...8.4	3.9...7.5
		7.76	2.0	5.8...21	5.6...11
		5.35	3.3	3.9...8.1	3.8...7.3
VV540	78	3.89	5.8	3.0...5.7	2.8...5.4
NGC4631	8.5	5.79	3.5	4.1...7.8	4.1...7.6
IC0342	3.5	5.53	1.6	3.9...7.3	3.9...7.2
M101	5.3	6.22	4.7	4.4...8.3	4.4...8.1
M51	7.8	4.46	5.3	3.1...5.9	3.1...5.8
		5.68	5.7	4.0...7.6	4.0...7.4

ОБГОВОРЕННЯ ТА ВИСНОВКИ

Проведений нами аналіз кластеризації КПНВЕ показав ізотропний розподіл потоків на великих масштабах для обох вибірок і суттєве відхилення (3.6σ) від ізотропного розподілу на масштабах до 2.5° для космічних променів AGASA з ймовірністю випадкової реалізації спостережуваних 8 пар $2 \cdot 10^{-4}$. Випадкове утворення одного триплету подій AGASA виявилось досить ймовірним, $\delta = 0.012$. Результати добре узгоджуються з роботами [14, 20], де кластеризація вивчалася з використанням двоточкової кореляційної функції та [18] — за допомогою гармонічного аналізу.

Результати досліджень показали, що серед усіх потенційних джерел КПНВЕ суттєвою є кореляція КПНВЕ AGASA з найяскравішими радіогалактиками та надсвітними інфрачервоними галактиками. Так, тісний збіг радіогалактики 3C123 з дублетом подій ($4.89, 5.47 \cdot 10^{19}$ еВ), дало відхилення 3σ від статистично очікуваної кількості, з ймовірністю випадкової реалізації 0.004. Тест на енергію генерації показав неможливість зареєструвати від даної радіогалактики протони. Радіогалактика 3C123 ($z = 0.218$) типу FR II має пекулярну радіоструктуру з незвично високою радіосвітністю для таких червоних зміщень. Однією з особливостей є подвійна гаряча пляма з потоком 6 Ян на 5 ГГц. Це другий за яскравістю комплекс гарячих плям після Лебедя А [25, 30]. Якщо дана радіогалактика є дійсно джерелом дублету КП, то для оцінки верхньої межі позагалактичного магнітного поля отримаємо значення $6 \cdot 10^{-16}$ Тл за умови, що зареєстрованими частинками являються ядра заліза.

З шістьма надсвітними інфрачервоними галактиками КП AGASA утворюють дев'ять пар розміром менше 6° , відхилення від статистично очікуваних двох пар склало 3.3σ , а ймовірність випадкової реалізації $7.4 \cdot 10^{-4}$. Всі вони потенційно можуть бути джерелами КПНВЕ, як протонів, так і ядер заліза. З триплетом подій AGASA ($5.4, 5.5, 7.8 \cdot 10^{19}$ еВ) з точністю експерименту збігається шостий за яскравістю об'єкт з каталогу IRAS — ARP 299 (44 Мпк), що є системою галактик з активними ядрами, які зливаються (IC 694 та NGC 3690). Світність групи в далекому інфрачервоному діапазоні складає $2.9 \cdot 10^{11} L_\odot$, а в діапазоні 0.5...100 кеВ — $1.9 \cdot 10^{36}$ Вт. В системі ARP 299 спостерігаються компактні активні області, деякі дослідники припускають існування там надмасивної чорної діри [8,

33]. Решта джерел — VV540, M51, NGC4631 (ARP281) — це активні взаємодіючі системи, M101, IC 342 — близькі гігантські галактики, які теж потенційно можуть бути прискорювачами КПНВЕ.

1. *Березинский В., Буланов С., Гинзбург В. и др.* Астрофизика космических лучей. — М.: Наука, 1990.—528 с.
2. *Гнатик Б., Еліїв А.* Пошуки джерел космічних променів надвисоких енергій // Вісник астрон. школи.—2003.—4, № 2.—С. 112—116.
3. *Гнатик Б., Еліїв А.* Пошуки кореляцій між напрямками приходу космічних променів надвисоких енергій та розподілом на небі їх можливих джерел // Вісник Київ. нац. ун-ту. Астрономія.—2003.—Вип. 39–40.—С. 66—70.
4. *Гнатик Б., Еліїв А.* Відхилення космічних променів надвисоких енергій в магнітному полі Галактики // Кинематика и физика небес. тел.—2006.—22, № 3.—С. 204—207.
5. *Abbasi R., Abu-Zayyad T., Amann J., et al.* Search for cross-correlation of ultra-high-energy cosmic rays with BL Lacertae objects // *Astrophys. J.*—2006.—636, N 2.—P. 680—684.
6. *Abbasi R., Abu-Zayyad T., Amann J., et al.* Study of small-scale anisotropy of ultra high energy cosmic rays observed in stereo by HiRes // *Astrophys. J.*—2004.—610, N 2.—P. 73—78.
7. *Abell G., Corwin H., Olowin R.* A catalogue of Rich Clusters of Galaxies // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1989.—70.—P. 1—138.
8. *Ballo L., Braito V., Della R., et al.* Arp 299: a second merging system with two active nuclei? // *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.*—2004.—132.—P. 141—144.
9. *Bennett A.* The revised 3C catalogue of radio sources // *Mem. Roy. Astron. Soc.*—1962.—68.—P. 163—170.
10. *Berezinsky V.* Ultra high energy cosmic rays from decaying superheavy particles // *AIP Conf. Proc.*—1998.—433.—P 279—291.
11. *Berezinsky V., Grigorieva S.* A bump in the ultra-high energy cosmic ray spectrum // *Astron. and Astrophys.*—1988.—199, N 1-2.—P. 1—12.
12. *Bertone G., Isola C., Lemoine M., et al.* Ultrahigh energy heavy nuclei propagation in extragalactic magnetic fields // *Phys. Rev. D—Part. and Fields.*—2002.—66, N 10.—P. 103—113.
13. *Burbidge G., Crowne A.* An Optical catalogue of radio Galaxies // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1979.—40,—P. 583—655.
14. *Burgett W., Malley M.* Searching for sources of the highest energy cosmic rays: low statistics, pitfalls, and possible clues. — 2003.—arXiv:astro-ph/0312190
15. *Cronin J.* The highest-energy cosmic rays. — 2004.—arXiv:astro-ph/0402487.
16. *Cuoco A., Abrusco R., Longo G., et al.* The footprint of large scale cosmic structure on the ultra-high energy cosmic ray distribution // *J. Cosmology and Astroparticle Phys.*—2006.—N 1.—P. 9—30.
17. *Edge D., Shakeshaft J., Mcadam W., et al.* A survey of radio sources at a frequency of 159Mc/s // *Mem. Roy. Astron. Soc.*—1959.—68.—P. 37—60.
18. *Evans N., Ferrer F., Sarkar S.* The anisotropy of the ultra-high energy cosmic rays // *Astropart. Phys.*—2002.—17, N 3—P. 319—340.
19. *Fairall A.* Large-scale structures in the Universe // *J. Brit. Astron. Assoc.*—1998.—108, N 3.—P. 172—178.
20. *Finley C.* Angular correlation estimates for ultrahigh energy cosmic rays // *Int. J. Mod. Phys.*—2005.—20.—P. 3147—3152.
21. *Gopal-Krishna S., Wiita, P., Subramanian P., et al.* Are the hotspots of radio galaxies the sites of in situ acceleration of relativistic particles? // *Astron. and Astrophys.*—2001.—377, N 3.—P. 827—834.
22. *Gorbunov D., Tinyakov P., Tkachev I., Troitsky S.* Estimate of the correlation signal between cosmic rays and BL Lacs in future data // *J. Cosmology and Astroparticle Phys.*—2006.—N 1.—
23. *Gorbunov D., Tinyakov P., Tkachev I., et al.* Testing the correlations between ultra-high-energy cosmic rays and BL Lac type objects with HiRes stereoscopic data // *Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.*—2004.—80.—P. 167—170.
24. *Greisen K.* End to the cosmic-ray spectrum? // *Phys. Rev. Lett.*—1966.—16.—P. 748—750.
25. *Hardcastle M., Birkinshaw M., Worrall D.* A Chandra detection of the radio hotspot of 3C123 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2001.—323, N 2.—P. 17—22.
26. *Hayashida N., Honda K., Inoue N., et al.* Updated AGASA event list above $4 \cdot 10^{19}$ eV // *Astron. J.*—2000.—120, N 5.—P 2190—2196.
27. *Hill C., Schramm D., Walker T.* Ultra-high-energy cosmic rays from superconducting cosmic strings // *Phys. Rev. D—Part. and Fields.*—1987.—36, N 4.—P. 1007—1016.

28. *Kachelriess M., Semikoz D.* Clustering of ultra-high energy cosmic ray arrival directions on medium scales. — 2005. — arXiv:astro-ph/0512498 v1.
29. *Kang H., Ryu D., Jones T.* Acceleration of cosmic rays at large scale shocks: The implications for structure formation in the universe // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—1999.—**31**.—P. 1554—1558.
30. *Looney L.* Sub-arcsecond imaging of 3C123: 108-GHz continuum observations of the radio hotspots // *Astrophys. J.*—2000.—**534**, N 1.—P. 172—179.
31. *Rachen J., Biermann P.* Extragalactic ultra-high energy cosmic-rays. Part One. Contribution from hot spots in Fr-II radio galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1993.—**272**, N 1.—P. 161—166.
32. *Saunders W., Sutherland W., Maddox S., et al.* The PSCz catalogue // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2000.—**317**, N 1.—P. 55—63.
33. *Smialkowski A., Giller M., Michalak W.* UHECR anisotropy from luminous infrared galaxies predictions for the pierre auger observatory // *Proc. of the 28th International Cosmic Ray Conference.* — Trukuba, Japan: IUPAP, 2003.—P. 727—730.
34. *Stanev T.* High energy cosmic rays. — Chichester, UK: Springer, 2004.—20 p.—(Springer-Praxis books in astrophysics and astronomy).
35. *Stokes B.* The search for anisotropy in the arrival directions of ultra-high energy cosmic rays observed by the high resolution fly's eye detector in monocular mode // *Nucl. Phys. B.*—2004.—**136**.—P. 52—57.
36. *Struble M., Rood H.* A compilation of redshifts and velocity dispersions for ACO clusters // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1999.—**125**, N 1.—P. 35—71.
37. *Tinyakov P., Tkachev I.* Tracing protons through the Galactic magnetic field: a clue for charge composition of ultra-high energy cosmic rays // *Astropart. Phys.*—2002.—**18**, N 2.—P. 165—172.
38. *Tinyakov P., Tkachev I.* Cuts and penalties: a comment on «The clustering of ultra-high energy cosmic rays and their sources» // *Phys. Rev. D—Part. and Fields.*—2004.—**69**, N 12.—P. 128—134.
39. *Veron-Cetty M., Veron P.* Quasars and active galactic nuclei (11th Ed.) // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**412**, N 2.—P. 399—403.
40. *West M.* On the morphology of superclusters // *Astrophys. J.*—1989.—**347**.—P. 610—626.
41. *Winn M., Ulrichs J., Peak L., et al.* Catalogue of highest energy cosmic rays — Giant extensive air showers // *School of Physics, University of Sydney.*—1986.—N 2.
42. *Zatsepin G., Kuzmin V.* Upper limit of the spectrum of cosmic ray // *J. Exper. Theor. Phys. Let.*—1966.—**4**.—P. 78—80.
43. *Zucca E., Zamorani G., Scaramella R., Vettolani G.* All-sky catalogs of superclusters of Abell-ACO clusters // *Astrophys. J.*—1993.—**407**, N 2.—P. 470—488.

Надійшла до редакції 13.03.06