

АННОТАЦИЯ

Приводятся результаты поиска источников космических лучей при энергиях 5×10^{13} – 5×10^{14} эВ по данным о 30 миллионах широких атмосферных ливней, зарегистрированных на установке КЛАРА Тянь-Шаньской станции ФИАН. Анализ осуществлён двумя различными методами: методом выделения направлений повышенного потока космических лучей в экваториальной системе с учетом углового распределения ливней и Методом Перемешивания. Обнаруженные области с повышенным потоком космических лучей сравниваются с результатами других установок и сопоставляются с координатами известных астрофизических источников (галактических остатков взрывов сверхновых, пульсаров и др.).



ВВЕДЕНИЕ

На Тянь-Шанской высокогорной научной станции (43°2'37"N 76°56'38"E) Физического института Академии наук СССР (ФИАН) была создана отдельная система КЛАРА-ХРОНОТРОН, предназначенная для изучения анизотропии первичных космических лучей с энергиями 50-500 ТэВ [1,2,3]. Электронная аппаратура системы была разработана в Центральном институте физических исследований Венгерской Академии Наук (КФКИ) для дальнейших совместных исследований. Первичный банк эксперимента содержит около 40 миллионов широких атмосферных ливней (ШАЛ), зарегистрированных за 5 лет наблюдений. Для настоящей работы из этого банка было отобрано 23 миллиона ливней. Критериями отбора стали требования стабильной работы установки на момент прихода события и зенитный угол наклона оси ШАЛ в интервале от 20 до 60 град. Ошибка вычисления зенитного θ и азимутального ϕ углов наклона оси ливня в местной горизонтальной системе для ливней не превышает 3°.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Для каждого ливня определялись местные угловые данные (θ , ϕ), по которым с учетом времени регистрации вычислялись экваториальные координаты (прямое восхождение α и склонение δ). Распределение по числу ШАЛ строилось на прямоугольных ячейках $[\alpha\delta] = [7.5^\circ \times 5^\circ]$, а дополнительно для верификации результатов – на квадратных ячейках $[10^\circ \times 10^\circ]$.

На рис. 1 синей линией показано распределение отклонений числа ливней в ячейке от среднего. Красной – ее аппроксимация распределением Гаусса

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \mu=0.241, \sigma=0.993.$$

Обработка результатов проводилась двумя различными методами.

- В первом случае для учета анизотропии регистрации данных по θ , а также существенной зависимости времени наблюдения областей от δ , были введены нормировки на время и веса по θ . Из-за ошибок, вносимых нормировками, ширина распределения отклонения числа ШАЛ в ячейке от среднего увеличилась в 1.3 раза (рис. 1). Этот параметр использовался для оценки статистической значимости величины отклонения значений в ячейках.

- Во втором – был использован метод Alexandreas et al. (1991), известный также как метод перемешивания (shuffling, scrambling). В этом случае использовались принятые для данного метода критерии значимости. Более подробная информация об этом этапе работы дана в докладе «Области повышенного потока космических лучей по данным установок ФИАН и МГУ», представленном М. Зотовым, etc. (сборник тезисов 33-й Всероссийской конференции по космическим лучам, тез. №87).

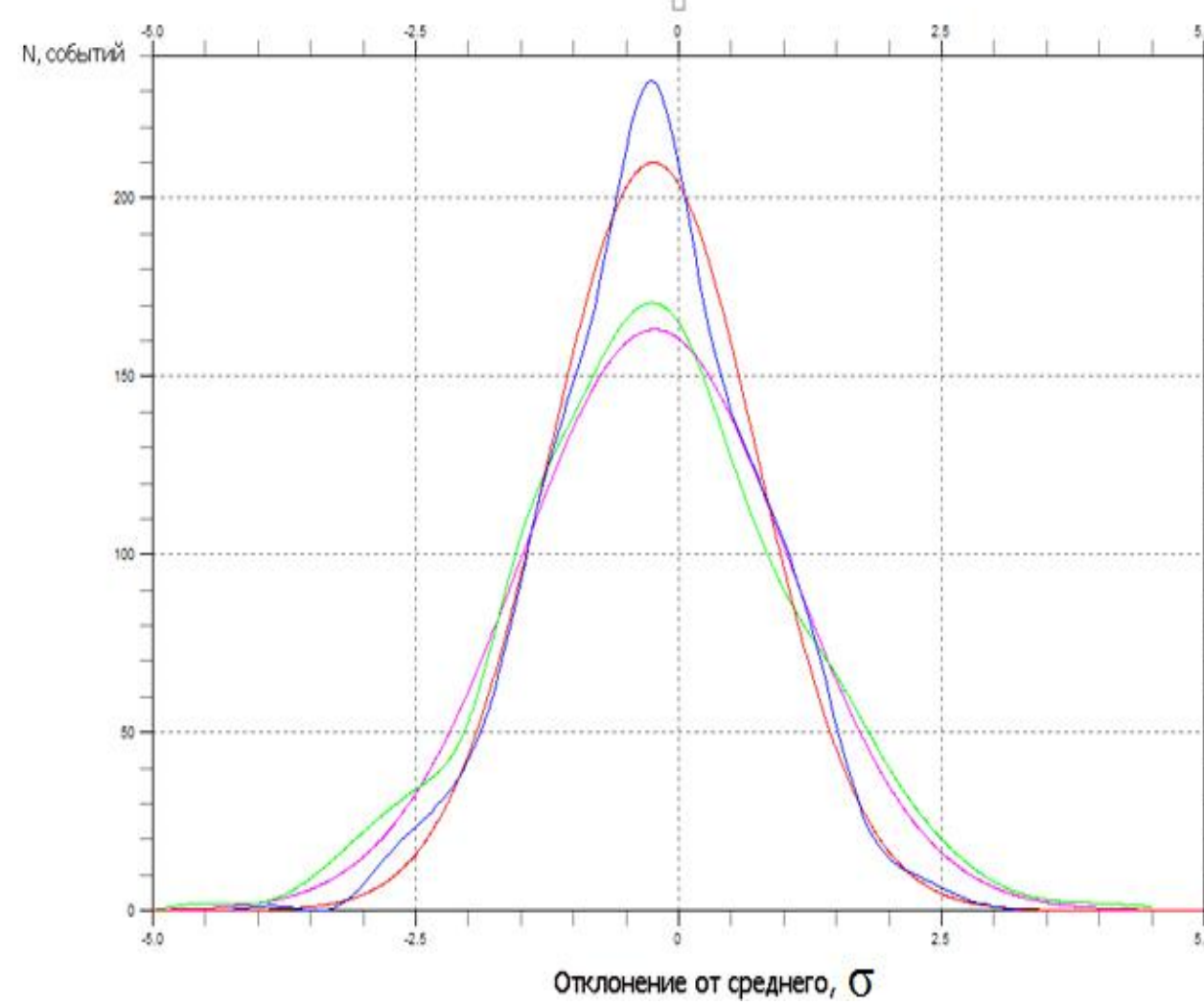


Рис. 1. Распределение отклонения числа ливней в ячейке $[\alpha, \delta]$ от среднего.

а) синяя линия – экспериментальная кривая для исходного материала,

б) красная – аппроксимация гауссовским распределением кривой «а», $D=0.993$.

в) зеленая линия – экспериментальные данные после введения нормировки по времени и весов по зенитному углу.

г) розовая линия – аппроксимация гауссовским распределением кривой «в», $D=1.27$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рис. 2 представляет сравнение результатов, полученных обоими методами. На карте звездного неба в экваториальных координатах, показаны ячейки, в которых среднее число событий превышает 3.0σ (лиловые квадраты), $2.1 \div 3.0 \sigma$ (голубые квадраты), $1.8 \div 2.0 \sigma$ (крупные синие ромбы). Эллипсами показаны области повышенного потока космических лучей, выделенные по второму методу. Цвет эллипса каждой области отражает уровень значимости, на котором эта область отобрана. Шкала цветов представлена цветной линией в верхней части рисунка. Кроме того, на карту нанесены галактический экватор (две параболические кривые), Λ -образной кривой – плоскость Супергалактики, синими ромбами малого размера – γ -пульсары. Просматривается достаточно высокий процент совпадения выделенных областей.

На рис. 3 представлено сравнение результатов обработки первым методом на ячейках $[7.5^\circ \times 5^\circ]$ и $[10^\circ \times 10^\circ]$. Как видим, существуют зоны, в которых повышенный поток частиц стабильно фиксируется при различных разбиениях звездного неба.

Рис. 4 позволяет сопоставить наши данные с другими работами. Серым овалом отмечена область Monogem Ring [4], возле центра которого находится молодой радио-пульсар PSR B0656 + 14. С ним совпадает область ППКИ с $\sigma=2.08$. Красными крестами нанесены наблюдавшиеся на Тянь-Шаньской комплексной установке [5,6] «гамма- события», не имеющие в составе ШАЛ мюонов и адронов [7]. Координаты пяти из восьми этих событий совпадают с нашими результатами. Надо отметить совпадение с результатами лаборатории Милагро. «Горячая точка» области Milagro hotspot A [8] лежит в пределах выделенной нами ячейки, где количество событий превышает среднее на 2.2σ . В районе области Milagro hotspot B нами зарегистрированы 2 зоны повышенного потока с $\sigma=2.02$ и $\sigma=1.94$. Отмечается совпадение с несколькими областями, выделенными экспериментом Ice Cube [9] (пронумерованные синие точки на графике). Также есть пересечения с результатами работы установок «ШАЛ МГУ» и «ПРО-1000» (НИИ ядерной физики МГУ, Москва) [10] и эксперимента KASCADE [11].

ВЫВОДЫ

Сравнение полученных результатов с другими исследованиями позволяет отметить повторяемость направлений прихода повышенного космического излучения в одних и тех же областях (кандидатов в источники). Поскольку количество областей с повышенным потоком излучения незначительно превышает статистически ожидаемое, сформировать окончательные выводы о существовании источников ПКИ при энергиях порядка 10^{14} эВ в данных направлениях помогла бы статистически аргументированная оценка совместной вероятности совпадения областей, выделенных различными экспериментами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Koch J., et al., Асейкин В. С. и др. КФКИ-70 НЕР.1970.V.7. P.1
- [2] G. Benkó, G. Erdős, S.I. Nikolsky, N.M. Nesterova, V.A.Romakhin A.P. Chubenko, A.L. Shchepetov, A. Somogyi, A. Varga Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 175-176. P. 541-543. (2008).
- [3] J. Benko, A.Varga, E.N. Gudkova, N.M. Nesterova, G. Erdos. Bulletin of the Physical Lebedev Institute. V.38. № 5. P. 123-127. (2011).
- [4] Thorsett S. E. et al. Astrophys. J. Lett. 2003. V.5. P.14 .
- [5] Adamov D. S. et al. Proc. 20th ICRC, Moscow. 1987. V.5 P.460
- [6] Nesterova N. M. et al. Proc. 24th ICRC, Roma. 1995. V.2. P.748.
- [7] Stamenov J. N. et al. Proc.18th ICRC, Bangalore.1983. V.6. P.54.
- [8] A. A. Abdo, B. Allen, T. Aune, et al. Discovery of Localized Regions of Excess 10-TeV Cosmic Rays. Physical Review Letters, 101:221101, 2008. arXiv:0801.3827.
- [9] M. G. Aartsen, M. Ackermann, J. Adams, et al. Observation of High-Energy Astrophysical Neutrinos in Three Years of IceCube Data. 2014. arXiv:1405.5303
- [10] M. Y. Zotov and G. V. Kulikov. Bulletin of the Russian Academy of Science, Phys., 75:342–346, 2011. arXiv:1107.2784.
- [11] Febler F. et al. Proc. 27th ICRC, Hamburg. 2001. P. 2370.

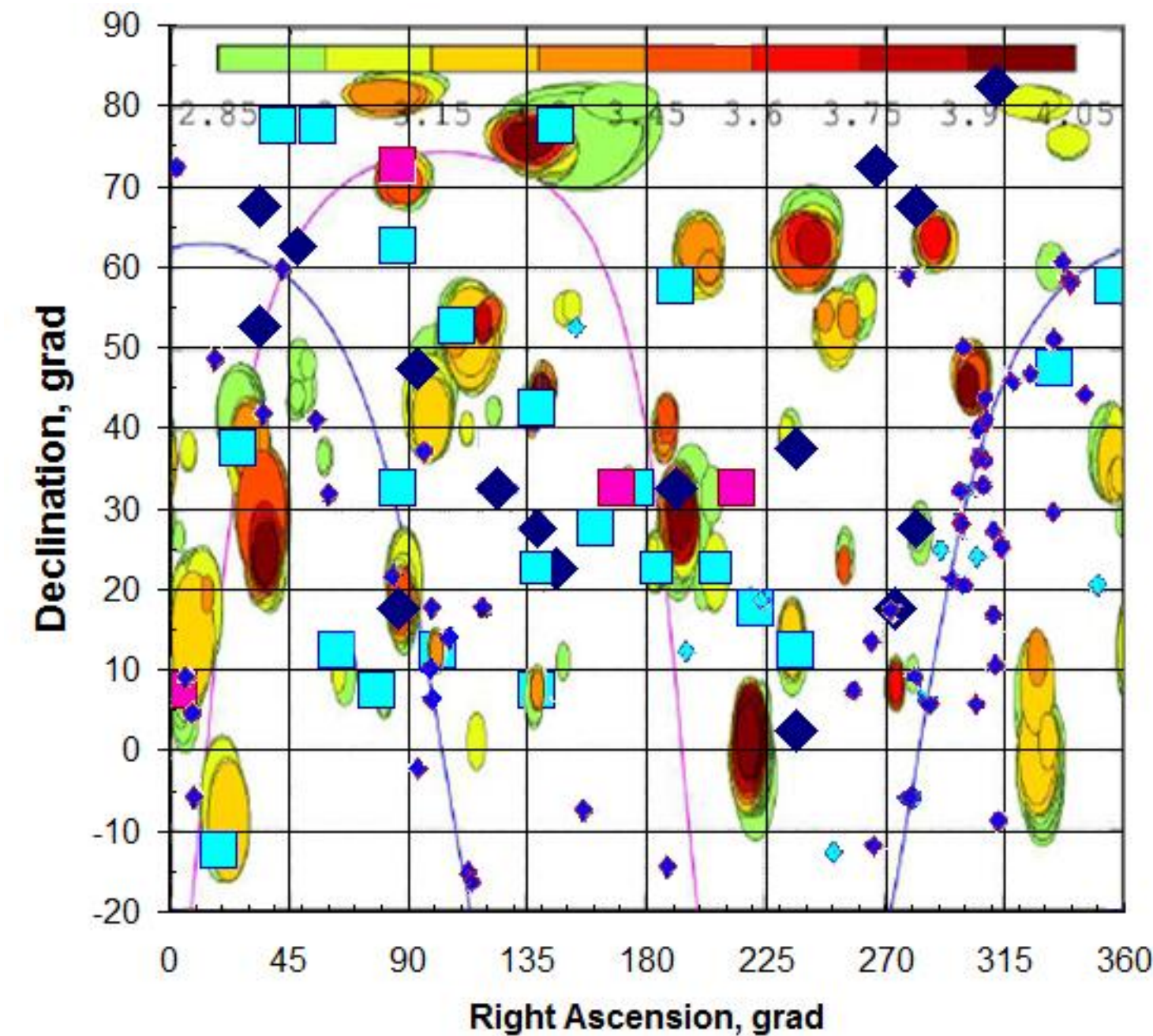


Рис. 2. Направления на возможные источники ПКИ (экваториальные координаты). 1ый метод. Отклонение от среднего: лиловые квадраты $>3\sigma$; голубые квадраты - $(2.1 \div 3.0) \sigma$, крупные синие ромбы – $(1.8 \div 2.0) \sigma$. 2ой метод. Эллиптические области, цвет которых отражает уровень значимости, цветовая шкала уровней – сверху рисунка.

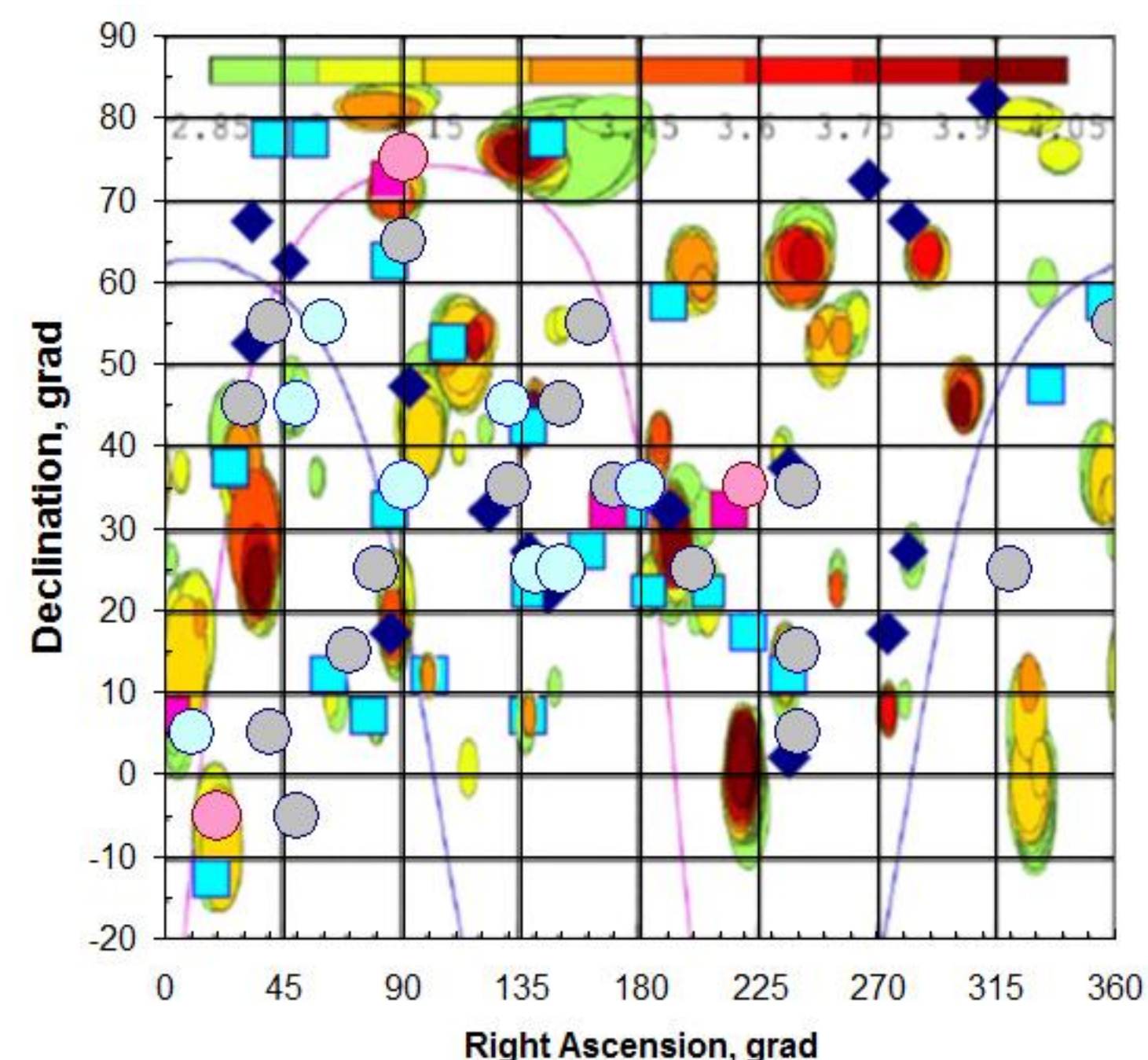


Рис.3. Результаты для ячеек разного размера. Для ячеек 10×10 град: Отклонение от среднего: розовые круги $>3\sigma$; голубые круги - $(2.1 \div 3.0) \sigma$, серые круги – $(1.8 \div 2.0) \sigma$. Для ячеек 5×7.5 град обозначение см. на рис. 2.

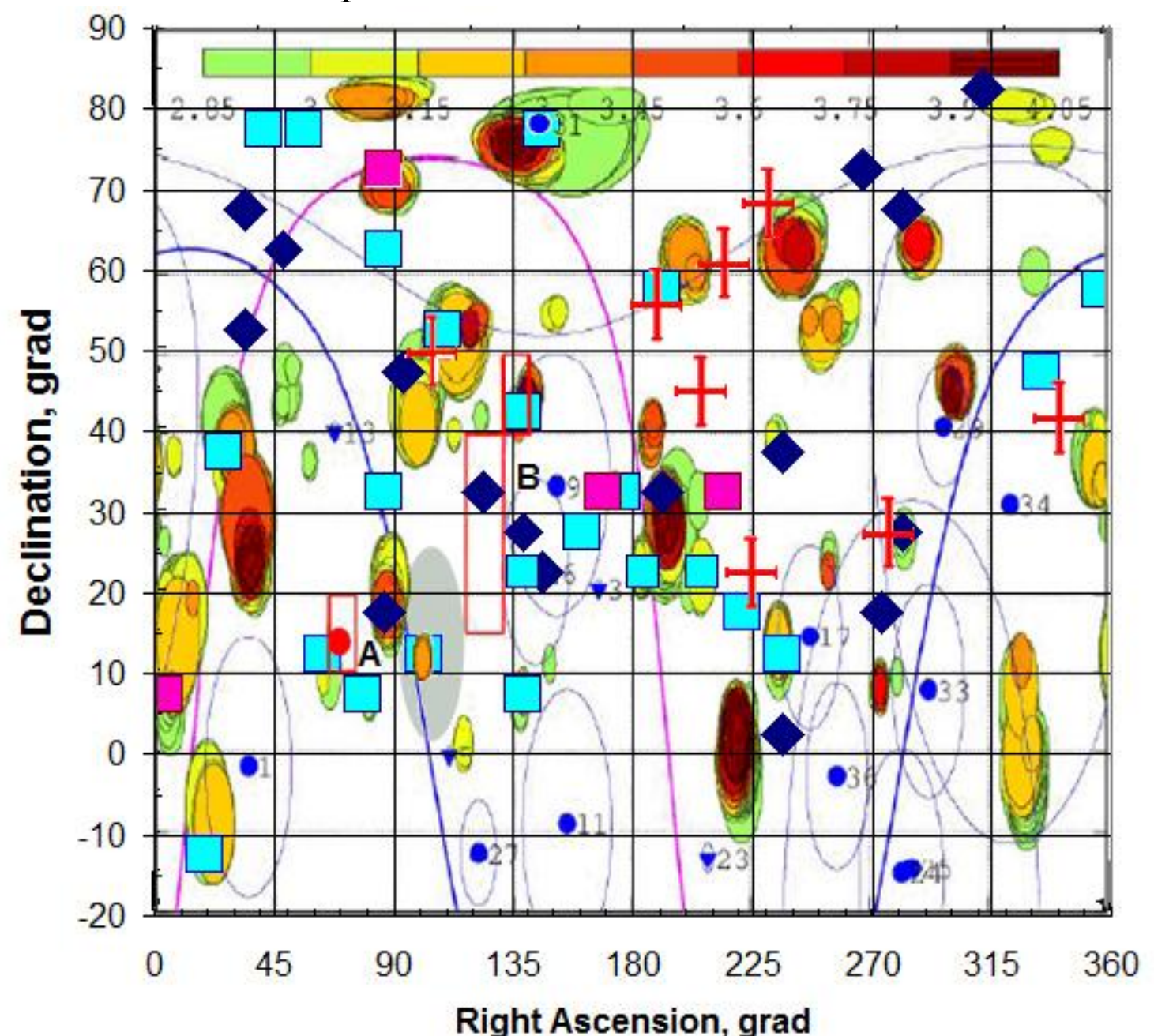


Рис. 4. Направления на возможные источники ПКИ. Сопоставление результатов установок КЛАРА-Хронотрон, ШАЛ (ТШВНС), ШАЛ (МГУ), Ice Cube, Milagro.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят коллектив сотрудников КФКИ Венгерской Академии наук, ФИАН и Тянь-Шаньской станции, принимавших многолетнее участие в создании установки, проведении измерений и обработке экспериментального материала.