

# Поиск внегалактических источников космических лучей сверхвысоких энергий

А. А. Иванов<sup>1)</sup>

Институт космофизических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера Сибирского отд. РАН, 677980 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 11 декабря 2007 г.

После переработки 17 января 2008 г.

Выполнен поиск вероятных внегалактических источников космических лучей (КЛ) с энергией выше  $4 \cdot 10^{19}$  эВ, зарегистрированных на Якутской установке широких атмосферных ливней (ШАЛ). Корреляция направлений прихода ливней с объектами из каталога Веронов, находящихся на расстояниях ближе 100 Мпк, подтверждает наблюдения, выполненные в Обсерватории им. Пьера Оже (РАО), а также вывод об обрезании спектра космических лучей из-за эффекта Грейзена–Зацепина–Кузьмина (ГЗК). Детальный анализ данных позволил уточнить, какие из классов объектов, относящихся к ядрам активных галактик, являются более вероятными источниками космических лучей сверхвысоких энергий (СВЭ).

PACS: 96.40.Pq, 98.54.Cm, 98.70.Sa

Проблема происхождения космических лучей (КЛ) сверхвысоких энергий (СВЭ) остается нерешенной, несмотря на многолетние усилия исследователей. Это связано с изотропией наблюдаемого распределения направлений их прихода из-за искривления траекторий заряженных частиц в магнитных полях в Галактике и вне ее. Только при самых высоких энергиях,  $E > 4 \cdot 10^{19}$  эВ (=40 ЭэВ), когда отклонение протонов, наиболее вероятных частиц КЛ, сопоставимо или меньше углового разрешения детекторов, были получены указания на возможную корреляцию направлений прихода КЛ с некоторыми наиболее активными внегалактическими объектами.

Так, авторы [1] нашли корреляцию наиболее высокоэнергичных событий (ШАЛ), зарегистрированных к тому времени ( $E > 10^{19.9}$  эВ), с компактными радио-кварами с большими красными смещениями; а Глушков [2], напротив, указывал на корреляцию с квазарами, расположенными ближе  $z = 2.5$ . Но эти результаты не были подтверждены дальнейшими наблюдениями.

Другой тип внегалактических объектов, который может генерировать КЛ СВЭ – гамма-всплески [3]. Здесь ситуация с поисками корреляции усложняется тем, что это – кратковременные вспышки, длящиеся от силы несколько минут. Тем не менее, в работе [4] предпринято сравнение данных Обсерватории им. Пьера Оже (РАО) (609161 ШАЛ) с наблюдениями миссий Swift, HETE, INTEGRAL и др. (284 гамма-всплеска, детектированных с угловым разрешением

лучше  $1^\circ$ ). Для выявления корреляции направлений прихода с координатами всплесков в пределах углового интервала  $5^\circ$  и  $30^\circ$  для каждого всплеска выбран период времени 100 дней до и после события. Сравнивая частоту КЛ до и после события как функцию разности времен, автор приходит к заключению, что здесь нет значимого различия частот.

Станев с соавторами [5] заметили, что имеющееся множество КЛ в области энергии  $E > 40$  ЭэВ, зарегистрированных всеми установками ШАЛ к 1995 г., имеет тенденцию к выстраиванию вдоль плоскости Сверхгалактики (ПСГ), где плотность галактик относительно высока. Однако анализ 2000 г. [6] данных 5 установок северного полушария (114 ливней,  $E > 40$  ЭэВ) не обнаружил значимого избытка частиц со стороны ПСГ, но в то же время авторы отметили, что количество дублетов и триплетов (совпадения направлений прихода двух и трех частиц в пределах  $4^\circ$ ) в полосе  $\pm 10^\circ$  около ПСГ выше, чем ожидается в изотропном распределении. Они расценили это как возможность, по крайней мере для части КЛ с энергией выше  $4 \cdot 10^{19}$  эВ, коррелирования с ПСГ.

Блазары (включающие BL Lacertae (BL Lacs) и OVV квазары) считаются активными ядрами галактик (АЯГ), имеющими релятивистские джеты, направленные в сторону Земли. Тиняков и Ткачев [7] обнаружили значимую угловую корреляцию КЛ СВЭ, зарегистрированных установками AGASA (39 ШАЛ,  $E > 48$  ЭэВ) и Yakutsk (26 ШАЛ,  $E > 24$  ЭэВ), с объектами BL Lacs ( $m < 18$ ) из 10 редакции Каталога Веронов [8]. Анализ данных установки HiRes [9] не подтвердил этот результат относительно объектов BL, но зато они нашли значимую корреляцию (об-

<sup>1)</sup> e-mail: ivanov@ikfia.ysn.ru. От имени группы, работающей на Якутской установке ШАЛ, <<http://eas.ysn.ru>>.

наруженную Горбуновым и др. [10]) КЛ с энергией выше  $10^{19}$  эВ, и всех событий без отбора по энергии, с объектами НР (high polarization), а также с комбинированной выборкой VL+НР из того же каталога. Авторы интерпретируют это как возможность существования потока нейтральных частиц, генерированных лацертидами.

Другой класс АЯГ, а именно сейфертовские галактики, удаленные от нас не более чем на 40 Мпк, рассматривались в качестве вероятных источников КЛ СВЭ в работах Урысон [11]. Она нашла угловую корреляцию ливней с энергиями  $3.2 \cdot 10^{19} < E < 3 \cdot 10^{20}$  эВ, зарегистрированных на установках Akeno, AGASA, Naverah Park и Yakutsk, с сейфертовскими галактиками с красными смещениями  $z \leq 0.0092$ , слабо излучающими в рентгеновском и радиодиапазонах. Впоследствии корреляция направлений прихода КЛ СВЭ с этими же объектами, наряду с другими вероятными источниками, была проанализирована в работе [12]. Было показано, что корреляция с сейфертовскими галактиками обнаруживается только в данных установки AGASA и только при учете отклонения частиц в магнитном поле Галактики, то есть при условиях, отличных от принятых в [11].

В недавней работе коллаборации РАО [13] проанализирована выборка из 81 события ШАЛ с энергиями выше 40 ЭэВ, зарегистрированных за период времени с 1.01.04 по 31.08.07. Они использовали часть данных (до 27.05.2006), чтобы найти параметры, обеспечивающие максимальную корреляцию направлений прихода КЛ СВЭ с активными ядрами галактик; затем вторая часть данных использована для проверки полученной гипотезы.

В результате обнаружено, что наблюдаемое распределение направлений прихода частиц КЛ СВЭ не изотропно, имеется значимая корреляция для событий ШАЛ с энергией выше 56 ЭэВ, в пределах угла  $\psi = 3.1^\circ$ , с АЯГ из Каталога [8], 12 редакции, находящихся на расстоянии  $z \leq 0.018$  (ближе 75 Мпк, если принять постоянную Хаббла равной  $71 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ ). Во второй части данных (после 27.05.2006) 8 из 13 событий ШАЛ коррелируют с АЯГ при тех же условиях, которые найдены в первой части, при ожидаемом числе совпадений 2.7 события в изотропном случае. Это соответствует вероятности  $P = 1.7 \cdot 10^{-3}$  случайной реализации для равномерно распределения.

В настоящей работе проанализированы данные Якутской установки ШАЛ, принимая за исходную гипотезу результат коллаборации РАО с целью подтвердить или опровергнуть ее на основе независимой выборки ливней, зарегистрированных в Якутске.

Для анализа использованы 51 ШАЛ с энергией выше 40 ЭэВ, с зенитными углами меньше  $60^\circ$ , опубликованные Правдиным с соавторами [14]. Ошибка определения углов прихода этих ливней меньше  $5^\circ$ ; определение энергии первичной частицы, образующей ШАЛ, основано на измерении полного потока черенковского света и числа электронов и мюонов на уровне наблюдения. Методика описана в работах [15–17]; ошибка оценки энергии составляет  $\sim 30\%$  для ливней с осями внутри периметра установки, и  $\delta E/E < 50\%$  – в эффективной области за ее пределами.

Галактические координаты активных ядер галактик из 12 редакции Каталога Веронов [8], находящиеся на расстоянии  $z < 0.015$ , показаны на рис.1

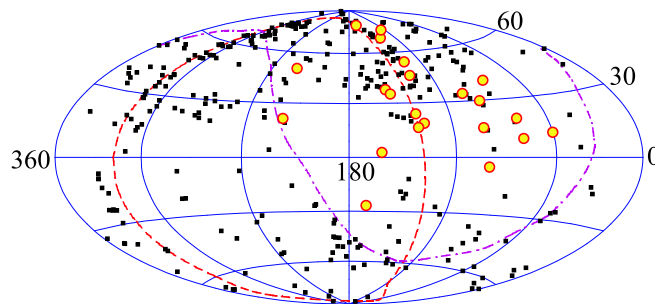


Рис.1. Распределение направлений прихода ШАЛ (кружки) и активных ядер (квадратики) в галактических координатах. Пунктирной линией показана плоскость Сверхгалактики, а штрих-пунктирной - область обзора Якутской установки

проекции Хаммера-Айтоффа вместе с углами прихода 22 событий ШАЛ с энергиями выше 60 ЭэВ. Области обзора нашей установки и РАО дополняют друг друга из-за расположения в разных полушариях – они смотрят в сторону центра Галактики, а мы – в противоположную сторону. Поэтому, в частности, нами обозреваются разные сегменты ПСГ. Из рисунка видно, что ливни, детектированные в Якутске, как будто тяготеют к ПСГ – плотность КЛ СВЭ в окрестности этой плоскости выше.

Чтобы проверить эту гипотезу Станева и др. [5] на расширенной базе данных Якутской установки ШАЛ, мы подсчитали избыток КЛ  $R = (n_{SGP} - n_{other}) / (n_{SGP} + n_{other})$ , наблюдаемых в окрестности  $\pm 10^\circ$  ПСГ ( $= n_{SGP}$ , и соответственно,  $n_{other}$  – все остальные) по сравнению с числом  $R_0 = -0.555$ , получающимся в случае изотропного распределения КЛ, с учетом разной экспозиции участков неба над установкой (рис.2). Экспозиция вычислялась по алгоритму, описанному в [18]. Как следует из рисунка, имеется тенденция к росту  $R$  с энергией, но статис-

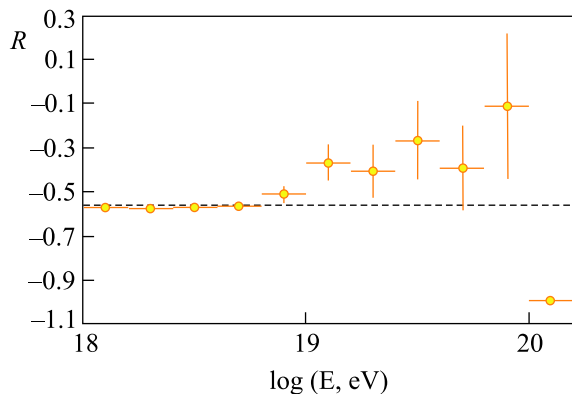


Рис.2. Избыток КЛ СВЭ ( $R$ ) со стороны плоскости Сверхгалактики как функция энергии. Статистические ошибки показаны вертикальными черточками, интервалы энергии – горизонтальными. Пунктирной линией показано значение, ожидаемое для изотропного распределения

тически значимого избыточного потока КЛ со стороны ПСГ в данных Якутской установки нет ни в одном из интервалов энергии. Глушков и Правдин показали ранее [19], что, подбирая ширину интервала углов около плоскости Сверхгалактики и энергии для выборки данных Якутской установки, можно получить наблюдаемый поток частиц со стороны ПСГ, заметно превышающий поток, ожидаемый в изотропном распределении. В частности, избыток до  $(4 - 5)\sigma$  для узкого интервала углов  $1^\circ - 2^\circ$  для частиц с энергией выше 8 ЭэВ. Однако при этом остается неясной величина поправки в полученный избыток, которая необходима для учета апостериорной оптимизации условий отбора данных.

Теперь о корреляции КЛ СВЭ, зарегистрированных Якутской установкой [14], с внегалактическими объектами. Проверка гипотезы коллаборации РАО с рекомендованными параметрами ( $E > 56$  ЭэВ,  $z < 0.018$ ,  $\psi = 3.1^\circ$ ) показала, что направления прихода 12 из 24 ШАЛ коррелируют с АЯГ из Каталога [8] при ожидаемом в изотропном случае числе совпадений 5.6. Вероятность случайной реализации 12 и больше в последнем случае равна  $P = 4 \cdot 10^{-3}$ . То есть данные Якутской установки подтверждают результат РАО, хотя и с меньшей значимостью.

Из-за различия в области обзора установок, а также в методике оценки энергии и углов первичных частиц, образующих ШАЛ, “оптимальные” параметры корреляции могут быть другими для наших данных. Поэтому было выполнено сканирование в интервалах изменения энергии ( $E > 40$  ЭэВ), красного смещения ( $0.001 < z < 0.03$ ) и углового расстояния ( $1^\circ < \psi < 6^\circ$ ) с тем, чтобы найти максимум отноше-

ния (наблюдаемое число совпадений – ожидаемое в изотропном случае)/с.к.о. Получено, что максимум достигается для 22 событий ШАЛ с энергией выше 60 ЭэВ, из которых 12 находятся в пределах  $\psi = 3^\circ$  от АЯГ (при ожидаемом 4.1), удаленных от нас не далее  $z = 0.015$  (63 Мпк). Вероятность случайной реализации  $P = 2 \cdot 10^{-4}$ . В этом случае также нужна некая “штрафная” поправка к вероятности из-за подбора параметров задним числом. Или же выбранные параметры могут быть использованы в качестве нулевой гипотезы при проверке на других, независимых данных.

На рис.3 приведено отношение наблюдаемого числа совпадений угловых координат КЛ (здесь и да-

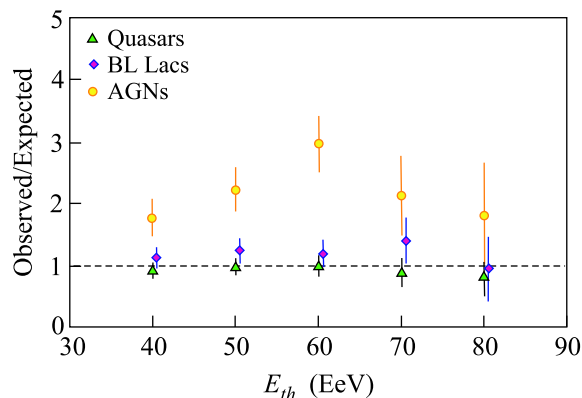


Рис.3. Отношение наблюдаемого числа совпадений углов прихода КЛ СВЭ с внегалактическими объектами к ожидаемому числу случайных совпадений в изотропном распределении (Observed/Expected) в зависимости от пороговой энергии частиц ( $E > E_{th}$ ). Вертикальными черточками показаны статистические ошибки

нее в пределах  $3^\circ$ ) с квазарами, лацертидами и АЯГ из Каталога [8] к ожидаемому числу случайных совпадений в изотропном распределении с учетом экспозиции Якутской установки. Активные ядра были выбраны те, которые находятся на расстоянии  $z < 0.015$ , для квазаров выбраны расстояния  $z < 0.3$ , а BL Lacs отбирались по светимости  $m < 18$ , как в [7]. Из рисунка видно, что не наблюдается значимого отклонения числа совпадений от изотропного ожидания для лацертидов и квазаров. Вариация интервалов красного смещения для квазаров не выявила значимого отклонения. Поиск корреляции для объектов НР и комбинации BL+НР из второй таблицы Каталога [8] также не дал значимой корреляции.

Корреляции с АЯГ найдены в данных РАО и Якутска практически при одном и том же угловом расстоянии ( $3.1^\circ$  и  $3^\circ$ ). Неясно, может ли это быть случайным совпадением. Оценка ошибки определе-

ния углов прихода для ливней с осями внутри периметра установки, приведенная в [14], равна  $3^\circ$ , но для ливней за пределами установки  $5^\circ$ . В то же время, с ростом энергии угловая ошибка должна уменьшаться благодаря увеличению числа сработавших в ливне станций наблюдения. Поэтому реальная точность определения углов для Якутской установки может быть равна или меньше  $3^\circ$ .

Примерное совпадение пороговой энергии, при которой наблюдается максимум для двух установок, на самом деле может быть случайным. Сравнение энергетических спектров, полученных на гигантских установках ШАЛ, показывает схожесть формы этих спектров: если ввести поправки на оценки энергии первичных частиц, порождающих ШАЛ, спектры почти совпадают и по форме, и по интенсивности [20]. Систематические поправки на энергию, вводимые таким образом, могут отличаться для РАО и Якутской установки от полутора до двух раз, так что пороговая энергия, при которой достигается максимальная корреляция для РАО, должна была бы быть от 90 до 120 ЭэВ, если предположение о поправочных коэффициентах справедливо.

Другая часть гипотезы РАО состоит в том, что КЛ коррелируют с направлениями на АЯГ, находящимися на расстояниях  $z < 0.018$  из-за эффекта Грейзена-Зацепина-Кузьмина (ГЗК) [21], резко уменьшающего поток КЛ с энергией  $E > 60$  ЭэВ с дальних расстояний. С тем, чтобы проверить этот эффект на данных Якутской установки ШАЛ, было построено отношение наблюдаемого числа совпадений угловых координат КЛ ( $E > 60$  ЭэВ) с АЯГ из разных интервалов красного смещения, к ожидаемому числу случайных совпадений в изотропном распределении (рис.4). Получено, что, в самом деле, значимая корреляция КЛ СВЭ с АЯГ имеется в единственном интервале  $z \in (0.001, 0.015)$ . Ни в каком другом интервале расстояний наблюдаемое число совпадений не отличается (в пределах ошибок) от ожидаемого в изотропном случае. Таким образом, это может рассматриваться как одно из независимых подтверждений эффекта ГЗК.

Как и в случае данных коллаборации РАО, необходимо сделать оговорку, что, возможно, данные Якутской установки коррелируют не только с АЯГ, но и с другими астрофизическими объектами, не рассмотренными здесь, со схожим пространственным распределением. Кроме того, в комментарии [22] оспаривается гипотеза РАО: утверждается, что на уровне значимости 99% можно отвергнуть объяснение, что большая часть КЛ СВЭ является протонами из ближних внегалактических источников (АЯГ). Пред-

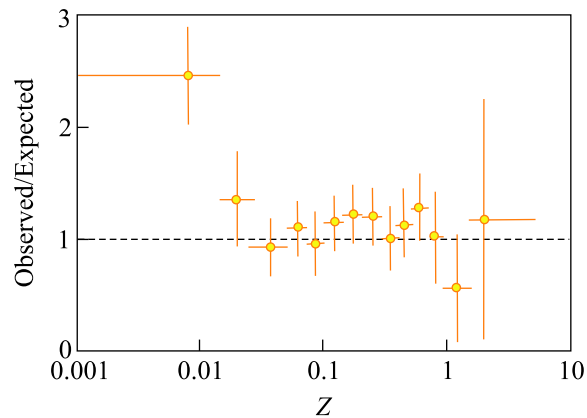


Рис.4. Отношение наблюдаемого и ожидаемого чисел совпадений КЛ СВЭ с АЯГ в разных интервалах красного смещения  $z$ . Вертикальными черточками показаны статистические ошибки. Границы интервалов  $z$  (обозначены горизонтальными черточками): 0.001, 0.015, 0.025, 0.05, 0.075, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 0.9, 1.5, 5.4

лагается другое объяснение данных [13] – существование мощного источника в направлении сверхскопления Centaurus A. Другая интерпретация результатов [13] предложена в статье [23] – частицы КЛ являются ядрами со средним  $\langle \ln A \rangle = 2.2 \pm 0.8$ , генерированными в ближних (порядка десятков Мпк) радиогалактиках.

Анализ данных мюонных детекторов Якутской установки [24] показывает, что при энергии выше 10 ЭэВ данные можно объяснить двухкомпонентной моделью состава КЛ, состоящего из протонов и заметной доли тяжелых ядер. Это трудно согласовать с корреляцией направлений прихода таких частиц в пределах  $3^\circ$  с АЯГ. В отличие от данных РАО в ливнях, детектированных Якутской установкой, явно не выделены кластеры, связанные со скоплениями (радио)галактик.

Если все же принять гипотезу, что АЯГ являются источниками КЛ СВЭ, то возникает вопрос – все ли классы объектов, относящихся к активным галактикам, являются такими источниками или, к примеру, справедливо предположение Урысон [11] о том, что только сейфертовские галактики генерируют КЛ. Для ответа на этот вопрос можно проанализировать корреляцию направлений прихода КЛ отдельно с каждым классом объектов. Результаты такого анализа данных показаны на рис.5. Здесь АЯГ разбиты на четыре класса в соответствии с предложением авторов Каталога [8]: S1 – сейфертовские галактики первого типа с широкими балмеровскими линиями, в отличие от S2 – сейфертовских галактик второго типа;

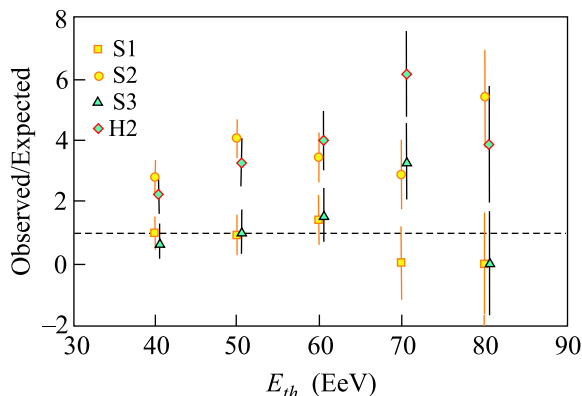


Рис.5. Наблюдаемое/ожидаемое число совпадений КЛ СВЭ с классами АЯГ

S3 – так называемые LINERы (low-ionization nuclear emission-line regions) галактики со слабыми эмиссионными линиями ядер; H2 – галактики, у которых спектр эмиссионных линий ядер схож с туманностями, ионизованными горячими звездами. Для каждого класса объектов подобраны границы красного смещения, обеспечивающие максимум корреляции с данными Якутской установки:  $z < 0.015$  для S1 и S3;  $z < 0.016$  для S2;  $z < 0.024$  для H2.

Сейфертовские галактики первого типа и LINERы не демонстрируют корреляцию с КЛ, превышающую ту, которая ожидается в изотропном распределении. Только объекты S2 и H2 коррелируют с КЛ СВЭ (с максимумом в  $E > 50$  ЭэВ для S2 и  $E > 70$  ЭэВ для H2). Превышение наблюдаемого числа совпадений над ожидаемым в изотропном распределении составляет  $4.7\sigma$  и  $3.7\sigma$  в максимумах. Отсюда можно заключить, что вероятными источниками КЛ СВЭ являются сейфертовские галактики второго типа и/или H2 объекты, находящиеся ближе 100 Мпк.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 06-02-16973) и Президента РФ (грант # НШ-7514.2006.2).

1. G. R. Farrar and P. L. Biermann, Phys. Rev. Lett. **81**, 3579 (1998).
2. А. В. Глушков, ЯФ **68**, 262 (2005).
3. E. Waxman, Phys. Rev. Lett. **75**, 386 (1995); M. Vietri, Astrophys. J. **453**, 883 (1995).
4. L. Anchordoqui for the P. Auger collaboration, Proc. 30<sup>th</sup> ICRC, Merida (2007) icrc1041; arXiv:astro-ph/0706.0989.

5. T. Stanev, P. Biermann, J. Lloyd-Evans et al., Phys. Rev. Lett. **75**, 3056 (1995).
6. Y. Uchihori et al., Astropart. Phys. **13**, 151 (2000).
7. P. G. Tinyakov and I. I. Tkachev, JETP Lett. **74**, 445 (2001); P. G. Tinyakov and I. I. Tkachev, Astropart. Phys. **18**, 165 (2002); D. S. Gorbunov, P. G. Tinyakov, I. I. Tkachev, and S. V. Troitsky, Astrophys. J. **577**, L93 (2002).
8. M.-P. Véron-Cetty and P. Véron, Astron. Astrophys. **374**, 92 (2001) - 10<sup>th</sup> edition; M.-P. Véron-Cetty and P. Véron, Astron. Astrophys. **455**, 773 (2006) - 12<sup>th</sup> edition.
9. R. U. Abbasi et al., Astrophys. J. **636**, 680 (2006).
10. D. S. Gorbunov, P. G. Tinyakov, I. I. Tkachev, and S. V. Troitsky, JETP Lett. **80**, 145 (2004).
11. А. В. Урысон, Письма в ЖЭТФ **64**, 71 (1996); А. В. Урысон, ЖЭТФ **113**, 385 (1998); А. В. Урысон, ЖЭТФ **116**, 1121 (1999).
12. D. S. Gorbunov and S. V. Troitsky, arXiv:astro-ph/0410741.
13. The Pierre Auger Collaboration, Science **318**, 938 (2007).
14. M. I. Pravdin, A. V. Glushkov, A. A. Ivanov et al., Proc. 29<sup>th</sup> ICRC, Pune, **7**, 243 (2005).
15. М. Н. Дьяконов, Т. А. Егоров, Н. Н. Ефимов и др., Космическое излучение предельно высокой энергии, Н.: Наука, 1991.
16. V. P. Egorova, A. V. Glushkov, A. A. Ivanov et al., Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **136**, 3 (2004).
17. С. П. Кнуренко, А. А. Иванов, И. Е. Слепцов, А. В. Сабуров, Письма в ЖЭТФ **83**, 563 (2006); С. П. Кнуренко, А. А. Иванов, А. В. Сабуров, Письма в ЖЭТФ **86**, 709 (2007); А. А. Иванов, С. П. Кнуренко, И. Е. Слепцов, ЖЭТФ **131**, 1001 (2007).
18. А. А. Иванов, А. Д. Красильников, М. И. Правдин, Письма в ЖЭТФ **78**, 1207 (2003); А. А. Иванов, Диссертация, ЯГУ, 2005.
19. А. В. Глушков, М. И. Правдин, ЖЭТФ **119**, 1029 (2001); А. В. Глушков, М. И. Правдин, Письма в Астрон. журн. **27**, 577 (2001).
20. А. А. Иванов, ДАН, **415**, 1 (2007); V. Berezhinsky, Proc. 30<sup>th</sup> ICRC, Merida, 2007.
21. Г. Т. Зацепин, В. А. Кузьмин, Письма в ЖЭТФ **4**, 78 (1966); K. Greisen, Phys. Rev. Lett. **16**, 748 (1966).
22. D. Gorbunov, P. Tinyakov, I. Tkachev, and S. Troitsky, arXiv:astro-ph/0711.4060.
23. T. Wibig and A. W. Wolfendale, arXiv:astro-ph/0712.3403.
24. A. V. Glushkov, D. S. Gorbunov, I. T. Makarov et al., arXiv:astro-ph/0710.5508.