

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

На правах рукописи

ВЕРЗАКОВА ВАЛЕРИЯ ВЛАДИСЛАВОВНА

**СМЕЩЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ НЕИДЕНТИФИЦИРОВАННЫХ
ГАММА-ИСТОЧНИКОВ КАК НАБЛЮДАТЕЛЬНОЕ
ПРОЯВЛЕНИЕ СГУСТКОВ СКРЫТОЙ МАССЫ**

Направление подготовки 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»
Диссертация на соискание степени магистра

Научный руководитель,
к.ф.-м.н.

_____ А. А. Кириллов

Москва 2023

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

**СМЕЩЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ НЕИДЕНТИФИЦИРОВАННЫХ
ГАММА-ИСТОЧНИКОВ КАК НАБЛЮДАТЕЛЬНОЕ
ПРОЯВЛЕНИЕ СГУСТКОВ СКРЫТОЙ МАССЫ**

Студент	_____ В. В. Верзакова
Научный руководитель, к.ф.-м.н.	_____ А. А. Кириллов
Рецензент, д.ф.-м.н.	_____ В. В. Михайлов
Секретарь ГЭК, к.ф.-м.н.	_____ А. А. Кириллов
Зав. каф. №40, д.ф.-м.н., проф.	_____ М. Д. Скорохватов
Рук. учеб. прог., д.ф.-м.н., проф.	_____ М. Д. Скорохватов

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Неидентифицированные гамма-источники	6
1.1 Функция распределения смещенных источников	9
2 Статистический анализ	15
2.1 Отбор кандидатов	15
Список литературы	26

ВВЕДЕНИЕ

Цель работы: Оценка эффекта смещения мелкомасштабных астрофизических объектов новой физики, например, сгустков скрытой массы, и анализ возможности выделения кандидатов в сгустки среди наблюдательных данных по неидентифицированным гамма-источникам.

Существует множество наблюдательных фактов, подтверждающих присутствие во Вселенной скрытой массы (ТМ), однако ее глубинная природа пока неизвестна. Среди наиболее распространенных кандидатов — слабо взаимодействующие массивные частицы (WIMPs¹): частицы, рожденные в ранней Вселенной, как правило, с массами, превышающими 100 ГэВ и на уровне взаимодействия ниже электрослабого [1].

В рамках парадигмы Λ CDM, в нашей Вселенной существует по меньшей мере в шесть раз больше скрытой массы, чем барионной материи: $\Omega_{\text{CDM}} = 0.265$, $\Omega_b = 0.0493$ [2]. Понимание природы скрытой массы является одной из самых важных задач современной фундаментальной физики. В поисках скрытой массы существуют три различных подхода: прямое рождение в коллайдерных экспериментах, прямое обнаружение через рассеяние на обычной материи и косвенное обнаружение, основанное на поиске вторичных частиц, образующихся в результате аннигиляции или распада частиц скрытой массы. Существует множество моделей, предлагающих кандидатуры частиц ТМ, которые могут аннигилировать в фотоны γ -излучения [3].

Субгало [4] и сгустки [5] ТМ являются перспективными объектами для косвенного обнаружения ТМ. Согласно стандартной теории формирования иерархической структуры, частицы скрытой массы накапливаются, превращаясь в небольшие гало, а затем многократно сливаются, образуя более крупные гало. Некоторые из гало, если они выживают после приливного разрушения и вириализации, становятся субгало главного гало. Моделирование N -тел в масштабе гало Млечного Пути показывает, что субгало гораздо больше, чем спутников,

¹WIMP — Weakly Interactive Massive Particle

наблюдаемых на оптической длине волны, что указывает на то, что большинство из них содержат мало звезд или газа. Субгало ТМ, либо достаточно массивные, либо достаточно близкие к Земле, могут быть видны в гамма-диапазоне. Из-за отсутствия звезд и газа субгало ТМ могут быть обнаружены посредством регистрации гамма-излучения или же превышения доли античастиц в космических лучах, а также за счет гравитационных эффектов. В данной работе рассматривается эффект, основанный на регистрации сигналов γ -излучения, которые потенциально являются продуктами распада или аннигиляции частиц скрытой массы. Регистрацией гамма на данный момент занимаются такие эксперименты, как Fermi-LAT, HESS-II, MAGIC, VERITAS, HAWC [6].

Ожидается, что субгало или сгустки ТМ могут являться источниками гамма-излучения, которые не имеют ассоциации в других диапазонах длин волн при более низких энергиях [7].

В данной работе рассматривается возможность смещения таких мелко-масштабных тел (сгустков ТМ) и проявление их как точечные источники гамма-излучения.

1 НЕИДЕНТИФИЦИРОВАННЫЕ ГАММА-ИСТОЧНИКИ

EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope) был высокоэнергетическим гамма-телескопом установленным на Комптоновской обсерватории гамма-лучей (CGRO), функционировавшим с 1991 по 1999 гг [8]. В своих первых каталогах 1EG [9] и 2EG [10] он собрал 31 и 129 событий (из них 39 неидентифицированы), соответственно. События в 3EG [8] основаны на данных, полученных телескопом EGRET на борту в период с 22 апреля 1991 по 3 октября 1995 [11]. В каталоге собран 271 источник гамма-излучения, 170 из них неидентифицированы (рис. 1.1).

Fermi-LAT — эксперимент, пришедший на смену EGRET. Начал свою работу в 2008 году и действует по настоящее время. Каталог 4FGL [12] собран за первые восемь лет работы миссии с августа 2008 года по август 2016 года и включает 5064 источников, для 1336 источников не имеется правдоподобных аналогов на других длинах волн (рис. 1.2). Часть неассоциированных источников, по словам коллаборации, предполагается связана с внегалактическими объектами (пульсарами, блазарами), однако природа остальных не известна до сих пор.

Оба каталога имеют долю неидентифицированных источников, лежащих как в диске Галактики, а так внедисковую компоненту (представлены на рисунке 1.3) При этом среди данных гамма-телескопов имеется ряд проблем, в частности, в экспериментах Fermi-LAT и EGRET имеется большое несоответствие. За время работы Fermi не было подтверждено порядка 60–70% ГИ [11; 13], находящихся в каталоге предшественника, а также Fermi продолжает находить новые источники, которые не были зарегистрированы EGRET ранее. Если вопрос новых ГИ можно объяснить разностью угловых разрешений телескопов, то неподтвержденные источники требуют отдельного рассмотрения.

Для решения этой проблемы ранее была предложена трактовка несоот-

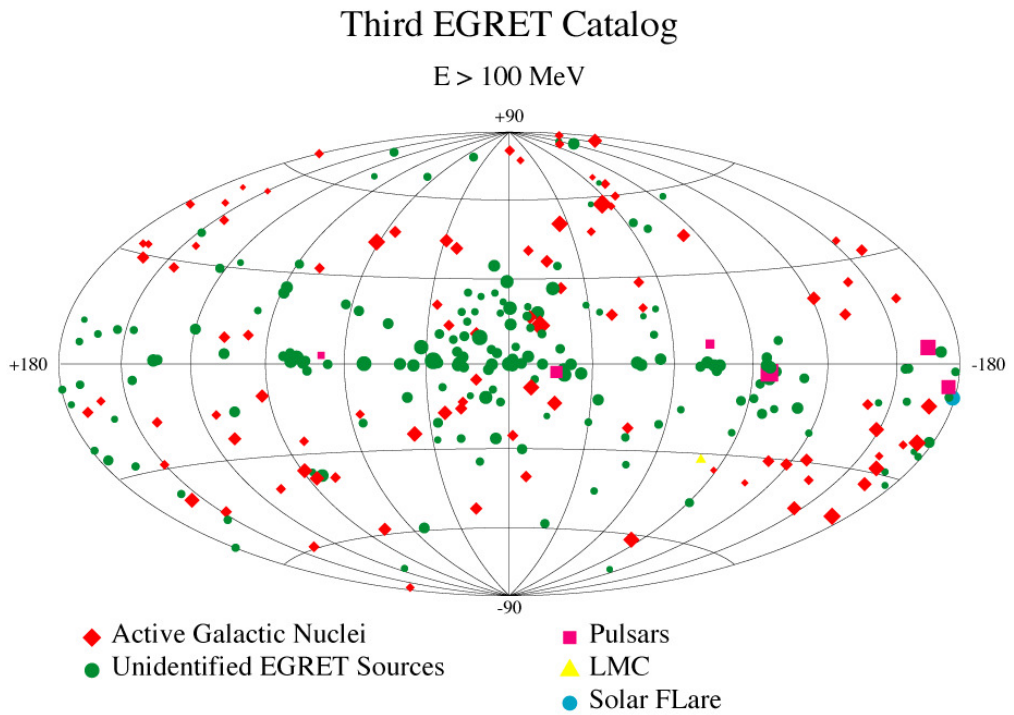


Рисунок 1.1 — Распределение источников в каталоге ЗЕГ. Зеленым кругом обозначены неидентифицированные источники

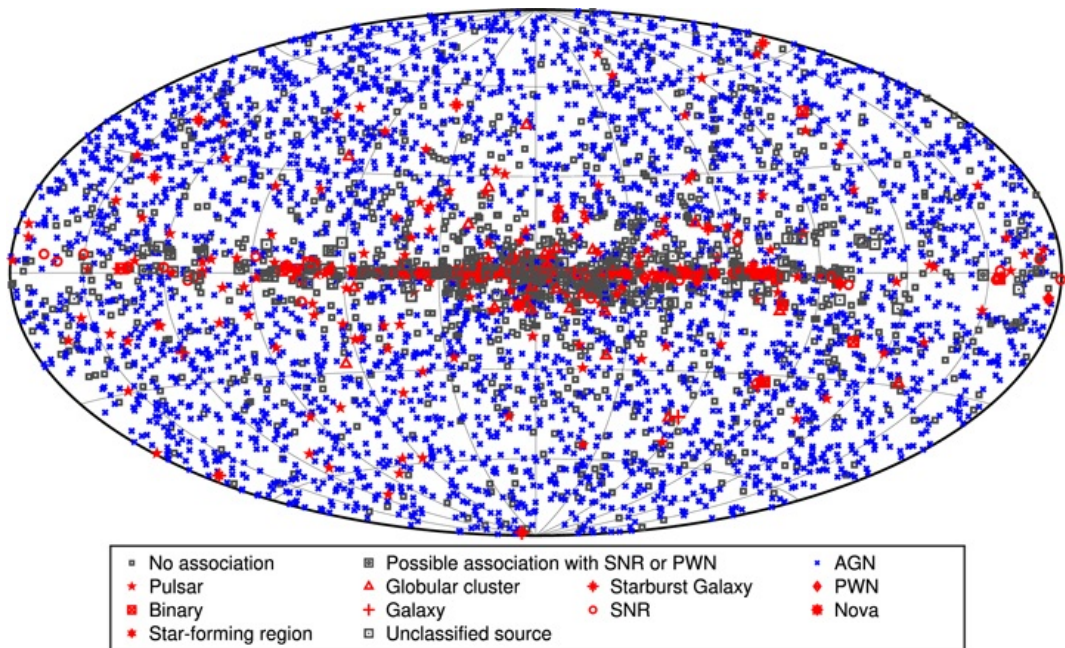


Рисунок 1.2 — Распределение источников в каталоге 4FGL Fermi-LAT. Серой точкой обозначены источники, не имеющие ассоциации на других длинах волн

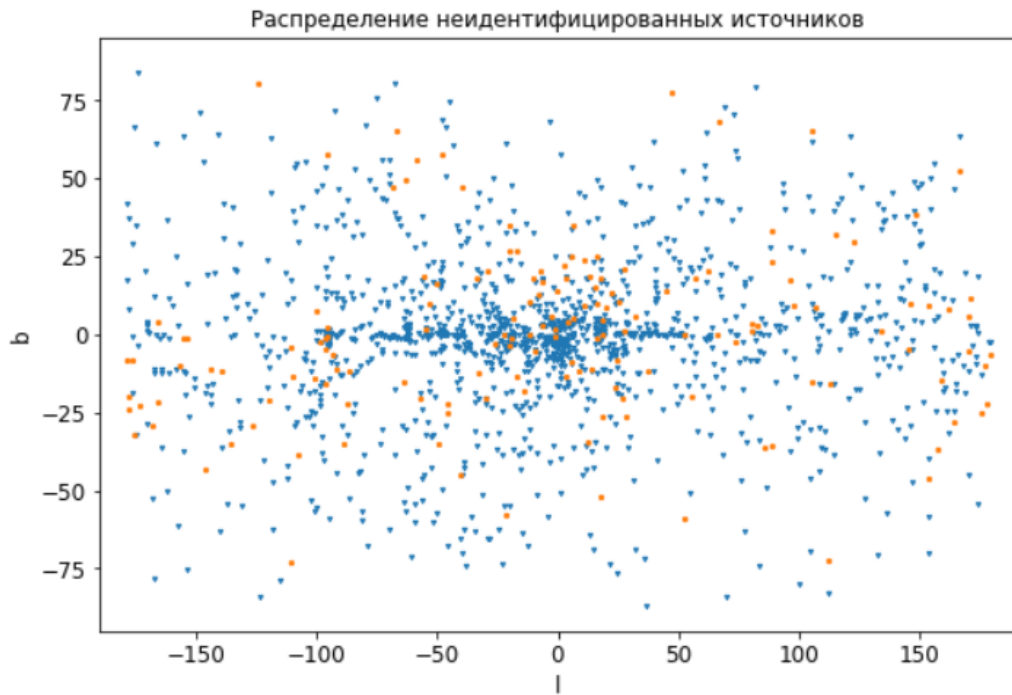


Рисунок 1.3 — Распределение неидентифицированных источников: (○) — источники EGRET, (▽) — источники Fermi-LAT

ветствия данных двух экспериментов за счёт их смещения относительно Солнца [14]. В ней предполагалось, что неидентифицированные источники являются маломассивными сгустками скрытой массы, находящимися на расстоянии до 100 пк от наблюдателя. Повышенная плотность частиц скрытой массы в сгустках приводит к появлению аннигиляционного сигнала в гамма-диапазоне. В работе была построена функция распределения смещенных источников, однако не было учтено движение Солнца вокруг галактического центра.

В данной работе оценивается возможность смещения таких ГИ по небесной сфере за время между сбором данных двух экспериментов с учётом движения Солнца вокруг галактического центра. Альтернативной гипотезой могут выступить компактные кластеры первичных черных дыр [15–17], испускающие гамма-излучение за счёт механизма Хоукинга.

Данная работа применима в последующих экспериментах, регистрирующих гамма-сигналы, таких как GAMMA-400 [18]. Будущий космический гамма-телескоп GAMMA-400 будет работать на борту российской астрофизической обсерватории на высокоэллиптической орбите в течение 7 лет для наблюдения галактической плоскости, центра Галактики, пузырей Ферми, Краба, Веллы, Сигнуса X, Геминги, Солнца и других регионов и измерения потоков гамма- и космического излучения. GAMMA-400 обещает лучшие характеристики, чем

у Fermi, а значит данные по гамма от будущего эксперимента смогут пролить свет на природу кандидатов в смещенные источники.

1.1 ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СМЕЩЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Для проверки гипотезы смещения из общих физических соображений была выбрана максвелловская функция распределения относительного числа источников в системе, связанной с центром Галактики, по скоростям. Тогда доля источников $\frac{dN}{N}$, имеющих скорости в диапазоне $(\vec{v}; \vec{v} + d\vec{v})$ будет задаваться следующим образом:

$$\frac{dN}{N} = \frac{1}{(v_0\sqrt{\pi})^3} \exp\left(-\frac{\vec{v}^2}{v_0^2}\right) d^3v, \quad (1.1)$$

где N — число источников, v_0 — наиболее вероятная скорость движения источника. В связи с тем, что рассматриваемые ГИ смещаются в гало Галактики, движение Солнца вокруг галактического центра будет вносить систематическую поправку в наблюдаемую траекторию движения источника. Тогда переходя в систему, связанную с Солнцем, получим:

$$\frac{dN}{N} = \frac{1}{(v_0\sqrt{\pi})^3} \exp\left(-\frac{(\vec{v} - \vec{v}_\odot)^2}{v_0^2}\right) d^3v,$$

где v_\odot — скорость Солнца. Выберем ось x сонаправленной скорости Солнца, тогда:

$$\frac{dN}{N} = \frac{1}{(v_0\sqrt{\pi})^3} \exp\left(-\frac{(v_x - v_\odot)^2 + v_y^2 + v_z^2}{v_0^2}\right) dv_x dv_y dv_z. \quad (1.2)$$

Будем считать, что в окрестности Солнца скорость источника остается постоянной и задается следующим соотношением:

$$\vec{v} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{t}, \quad (1.3)$$

где \vec{r}_1, \vec{r}_2 — начальное и конечное положения источника. Тогда выражение 1.2 преобразуется следующим образом:

$$\frac{dN}{N} = \frac{1}{(v_0 t \sqrt{\pi})^3} \exp \left(-\frac{(x_2 - x_1 - v_{\odot} t)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}{(v_0 t)^2} \right) dx dy dz.$$

Требуется получить распределение в галактических координатах, для чего удобно предварительно перейти к сферическим, а затем от них, путем простого преобразования, перейти к галактическим.

Переход к сферическим координатам будет осуществляться следующим образом:

$$\begin{cases} x = r \sin \theta \cos \varphi, \\ y = r \sin \theta \sin \varphi, \\ z = r \cos \theta. \end{cases}$$

Якобиан преобразования:

$$J = r^2 \sin \theta. \quad (1.4)$$

Имеем:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{N} = \frac{r_2^2 \sin \theta_2}{(v_0 t \sqrt{\pi})^3} \exp \left[-\frac{1}{(v_0 t)^2} \left((r_2 \sin \theta_2 \cos \varphi_2 - r_1 \sin \theta_1 \cos \varphi_1 - v_{\odot} t)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + (r_2 \sin \theta_2 \sin \varphi_2 - r_1 \sin \theta_1 \sin \varphi_1)^2 + (r_2 \cos \theta_2 - r_1 \cos \theta_1)^2 \right) \right] dr_2 d\theta_2 d\varphi_2. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Перейдем теперь в галактические координаты $b = 90^\circ - \theta$, $l = 90^\circ - \varphi$ (рис. 1.4). Галактическая широта b отсчитывается от галактической плоскости к объекту, используя Солнце в качестве вершины, галактическая долгота l отсчитывается в плоскости Галактики, от оси, соединяющей Солнце и галактический центр.

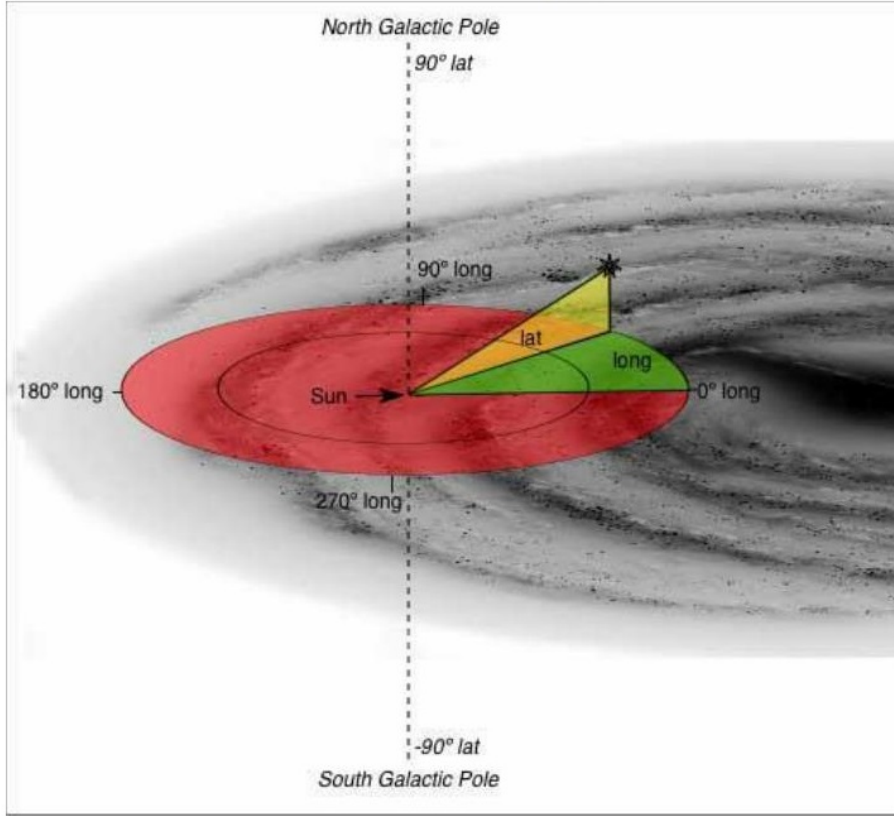


Рисунок 1.4 — Отсчет галактических координат

$$\begin{cases} x = -r \cos b \sin l, \\ y = r \cos b \cos l, \\ z = r \sin b. \end{cases}$$

Получим:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{N} &= \frac{r_2^2 \cos b_2}{(v_0 t \sqrt{\pi})^3} dr_2 db_2 dl_2 \times \\ &\times \exp \left[-\frac{1}{(v_0 t)^2} \left((-r_2 \cos b_2 \sin l_2 + r_1 \cos b_1 \sin l_1 - v_\odot t)^2 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (r_2 \cos b_2 \cos l_2 - r_1 \cos b_1 \cos l_1)^2 + (r_2 \sin b_2 - r_1 \sin b_1)^2 \right) \right]. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Так как мы рассматриваем источники вблизи Солнечной системы, будем считать $v_0 = v_\odot$. Проинтегрируем выражение 1.6 по всем возможным расстояниям r_2 . В результате остается один неопределенный параметр r_1 , поэтому проведем усреднение интеграла, полученного ранее, по максимальному расстоянию $r_0 = 50$ пк, выбранному таким образом, что вне заданного r_0 интеграл

плотности вероятности стремится к нулю.

$$\begin{aligned} \frac{dN}{N} &= \frac{\cos b_2 db_2 dl_2}{r_0(R_0\sqrt{\pi})^3} \int_0^{r_0} dr_1 \int_0^{r_0} dr_2 \times \\ &\times r_2^2 \exp \left[-\frac{1}{R_0^2} \left((-r_2 \cos b_2 \sin l_2 + r_1 \cos b_1 \sin l_1 - R_0)^2 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (r_2 \cos b_2 \cos l_2 - r_1 \cos b_1 \cos l_1)^2 + (r_2 \sin b_2 - r_1 \sin l_1)^2 \right) \right]. \end{aligned}$$

Для удобства дальнейших вычислений перейдем к безразмерным координатам $\rho_i = r_i/R_0$, $i = \overline{1,2}$. После усреднения получим плотность вероятности обнаружения источника в диапазоне координат от $(b_2; l_2)$ до $(b_2 + db_2; l_2 + dl_2)$,

обозначив $df(b_2, l_2) = \frac{dN}{N}$.

Окончательно получаем плотность вероятности $p = \frac{df(b_2, l_2)}{db_2 dl_2}$:

$$\begin{aligned} p &= \frac{R_0 \cos b_2}{r_0(\sqrt{\pi})^3} \int_0^{r_0/R_0} d\rho_1 \int_0^{r_0/R_0} d\rho_2 \times \\ &\times \rho_2^2 \exp \left[-\left((-\rho_2 \cos b_2 \sin l_2 + \rho_1 \cos b_1 \sin b_1 - 1)^2 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (\rho_2 \cos b_2 \cos l_2 - \rho_1 \cos b_1 \cos l_1)^2 + (\rho_2 \sin b_2 - \rho_1 \sin b_1)^2 \right) \right]. \end{aligned} \tag{1.7}$$

При этом интеграл плотности вероятности по всем возможным координатам дает верную нормировку 1.8:

$$\iint p db_2 dl_2 = 1. \tag{1.8}$$

Найдем линии уровня полученной функции распределения. Примеры распределений, которые показывают как смещается его плотность в зависимости от начального положения источника представлены на рисунке 1.5. Можно оценить правильность работы выведенной функции, зная что Солнце вращается относительно ГЦ в сторону уменьшения долготы (см. рис. 1.4): при нахождении источника, например, в долготе 270° , мы будем наблюдать смещение плотности

в область увеличения модуля широты и обратную ситуацию при нахождении источника в долготе 90. Таким образом, ожидается смещение плотности вероятности как раз в области представленные на рисунке 1.5.

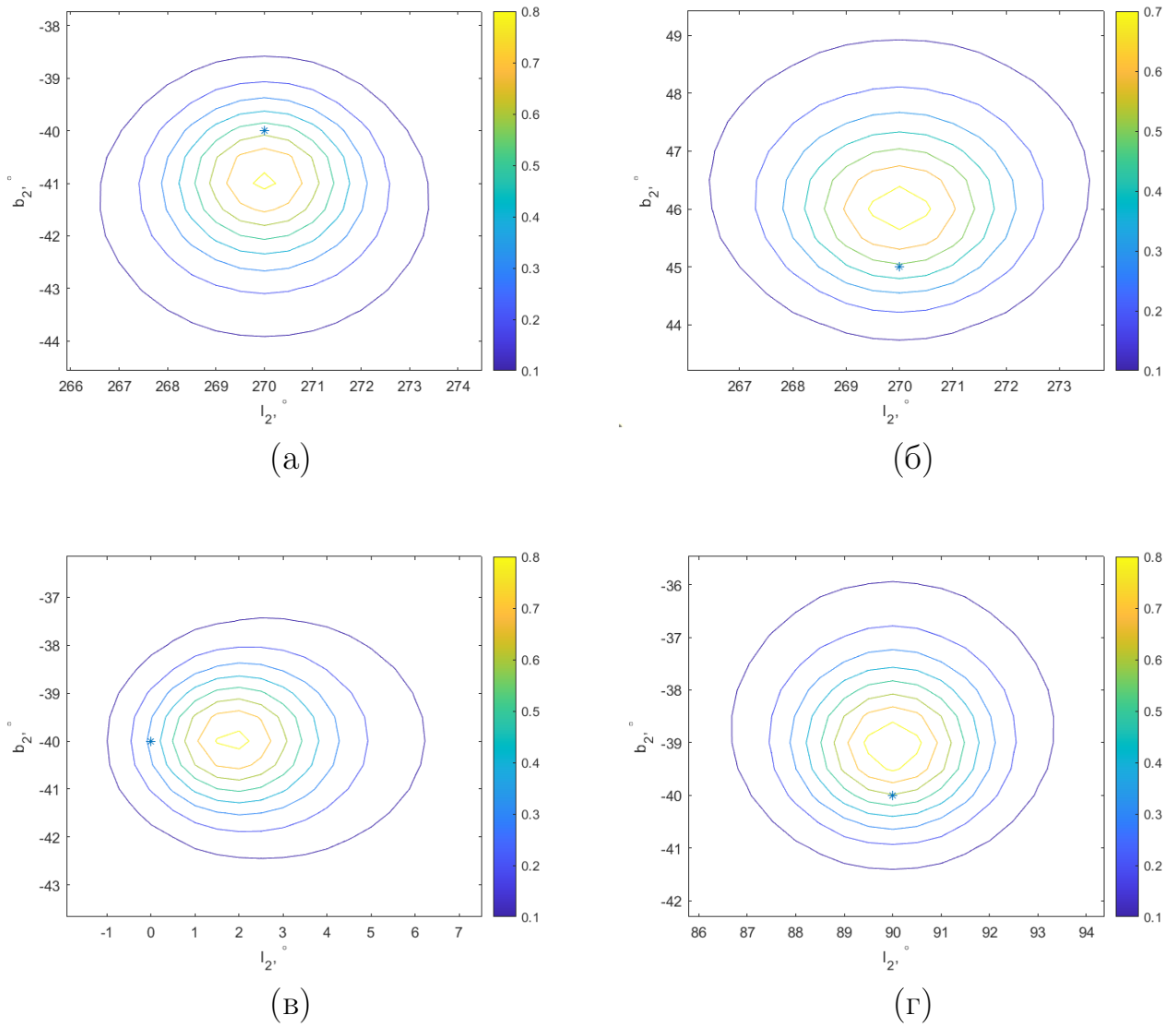


Рисунок 1.5 — Распределение вероятности сместившегося источника: (а) соответствует начальному положению ГИ ($l_1 = 270^\circ, b_1 = -40^\circ$), (б) соответствует ($l_1 = 270^\circ, b_1 = 40^\circ$), (в) — ($l_1 = 0^\circ, b_1 = -40^\circ$), (г) — ($l_1 = 90^\circ, b_1 = -40^\circ$). (*) обозначено начальное положение источника

2 СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

2.1 ОТБОР КАНДИДАТОВ

Дальнейшей задачей было выделение кандидатов в смещенные источники, которые послужат выборкой для проведения статистического анализа функции распределения. В качестве данных были использованы точечные ГИ из каталогов 4FGL (Fermi LAT) [12] и ЗЕГ (EGRET) [8]. Отбор пар смещенных источников (источник Fermi LAT — источник EGRET) производился по совпадению спектральных индексов в соответствии с формулой 2.1.

$$|I_{\text{LAT}} - I_{\text{EGRET}}| \leq \sqrt{(\Delta I_{\text{LAT}})^2 + (\Delta I_{\text{EGRET}})^2} \quad (2.1)$$

Было отобрано 158 пар источников из каталога ЗЕГ. Из дальнейшего анализа были исключены также источники, лежащие в плоскости Галактики ($|b| \leq 15^\circ$), в связи с тем, что они имеют, в основном, галактическое происхождение. Таким образом, остается 74 источника из каталога EGRET [19], каждому из которых соответствует множество источников из каталогов Fermi.

В таблице 2.1 представлены имена, положения (координаты b и l), а так-

Таблица 2.1 — Примеры источников из каталогов ЗЕГ (EGRET) и 4FGL (Fermi-LAT)

ЗЕГ name	l_E	b_E	I_E	ΔI_E	4FGL name	l_F	b_F	I_F	ΔI_F
ЗЕГ J0215+1123	153.75	-46.37	2.03	0.62	4FGL J0000.3-7355	307.70	-42.74	2.119	0.146
ЗЕГ J0215+1123	153.75	-46.37	2.03	0.62	4FGL J2351.4-2818	24.37	-76.69	2.374	0.176
ЗЕГ J0426+1333	181.98	-23.82	2.17	0.25	4FGL J0000.3-7355	307.70	-42.74	2.119	0.146
ЗЕГ J1631-1018	5.55	24.94	2.2	0.27	4FGL J0031.0-2327	70.33	-84.11	2.194	0.133
ЗЕГ J1347+2932	47.31	77.5	2.51	0.61	4FGL J2326.5+8555c	121.32	23.32	2.811	0.158
ЗЕГ J0329+2149	164.9	-27.88	2.61	0.33	4FGL J0112.0+3442	127.72	-27.98	2.337	0.167
ЗЕГ J1527-2358	342.97	26.5	2.67	0.99	4FGL J0017.1-4605	320.39	-69.87	2.801	0.157
ЗЕГ J1733+6017	89.12	32.94	3.0	0.38	4FGL J0934.5+7223	139.73	37.62	2.987	0.137
ЗЕГ J1822+1641	44.84	13.84	3.06	0.68	4FGL J1912.2+3621	67.89	11.83	2.582	0.140
ЗЕГ J1308+8744	122.74	29.38	3.17	0.66	4FGL J0934.5+7223	139.73	37.62	2.987	0.137

же спектральные индексы и их ошибки (I и ΔI) для кандидатов в смещенные источники из каталогов ЗЕГ (первые 5 колонок) и 4FGL (6–10 колонки). Остальные пары можно найти перейдя в [19].

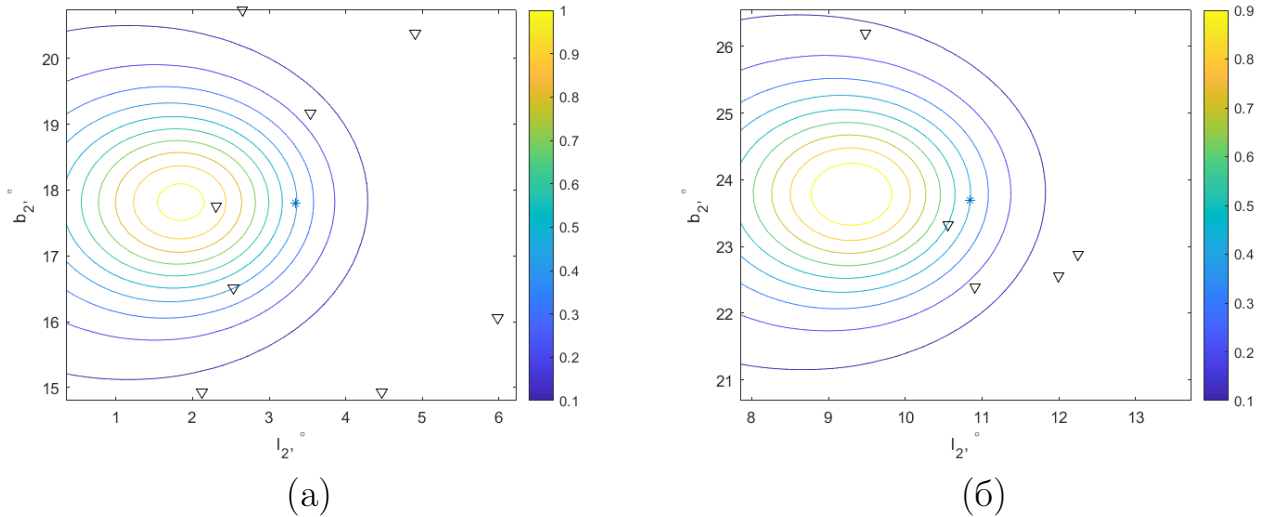


Рисунок 2.1 — Линии уровня плотности вероятности сместившегося источника. (*) обозначено начальное положение источника из ЗЕГ, (∇)- положения источников 4FGL

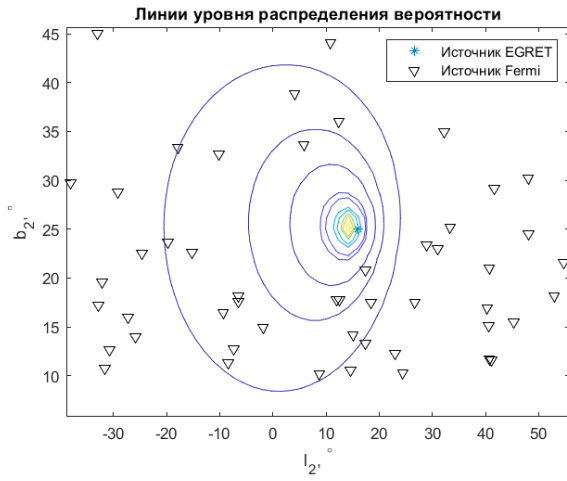
На рисунке 2.1 представлены примеры распределений для 2-х источников EGRET. Данные линии уровня плотности распределения носят случайный характер, поэтому технической задачей было определить такие линии уровня, вероятность между которыми примерно равна.

При помощи метода Монте-Карло были определены линии уровня плотности вероятности таким образом, чтобы интеграл плотности вероятности — полное значение вероятности обнаружить смещенный источник внутри области, ограниченной соседними линиями уровня составило 0.1 или же 10%.

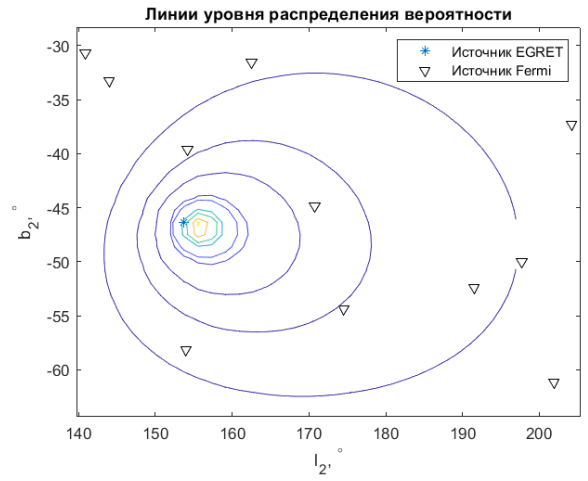
Для анализа полученных распределений, линии уровня функции плотности были разбиты на области с заданным шагом (значение вероятности $\approx 10\%$). Это необходимо для того, чтобы проверить принадлежность полученных распределений к одной из гипотез: H_0 — «фоновая гипотеза», согласно которой источники попали в область случайно, H_1 — среди выделенных событий имеются «сигнальные», отвечающие за смещение.

Ожидается, что распределение «фоновых» событий будет таково, количество источников, попавших в каждую область, будет пропорционально площади данной области. Чтобы получить данное распределение, были рассчитаны

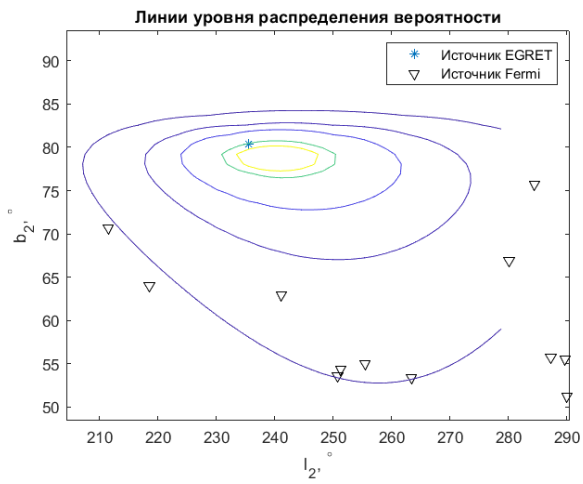
площади областей, представленных на рисунке 2.2, а также остальных распределениях для источников EGRET, которые не показаны на данном рисунке, и рассчитано ожидаемое количество событий в каждой области.



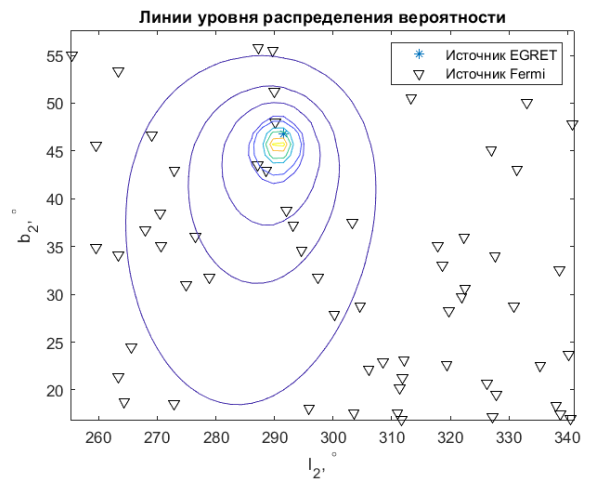
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 2.2 — Распределение вероятности сместившегося источника, вероятность между соседними линиями уровней 0.1. (*) обозначено положение источника EGRET, (▽) – положение источников Fermi

Для каждого источника EGRET с номером a может наблюдаться лишь одно сигнальное событие, тогда распределение источников, попавших в каждую i -ю область будет отличаться от «фонового». Можно составить ожидаемое количество источников в каждом кольце в рамках гипотезы H_1 :

$$N_i^a = (N_{\text{tot}}^a - \theta) \cdot \frac{S_i}{S_{\text{tot}}} + 0.1 \cdot \theta. \quad (2.2)$$

Здесь N_i^a — количество источников, попавших в каждый i -й бин распределения, N_{tot}^a — количество кандидатов в смещенные источники из каталога Fermi для a -го источника из каталога EGRET, S_i — площадь i -й области, ограниченной линией уровня, S_{tot} — суммарная площадь всех колец. Для проверки гипотезы смещения к полученной функции распределения добавляется параметр θ . Величина параметра такова, что $0 \leq \theta \leq 1$. При равенстве 0, получаем «фоновую гипотезу» и отсутствие «сигнальных событий», тогда как при $\theta = 1$ получаем, что каждое отобранное событие является сигнальным. При некотором промежуточном значении имеем долю источников, которые содержат сигнал.

Ввиду низкой статистики в центральных областях, для проведения анализа сгруппируем все данные вместе и построим общее распределение источников по областям, представленной гистограммой (рисунок 2.3), в связи с упрощением на то, что площади колец для распределений отдельных источников примерно равны, суммируя по всем источникам из ЗЕГ ожидаемое количество источников, попавших в i -й бин примет вид:

$$N_i = \sum_a N_i^a = \frac{S_i}{S_{\text{tot}}} \cdot (N_{\text{tot}} - a \cdot \theta) + 0.1 \cdot a \cdot \theta, \quad (2.3)$$

где a — число отобранных источников из ЗЕГ, N_{tot}^a — суммарное количество кандидатов в смещенные источники из каталога Fermi для всех источников из каталога EGRET, S_{tot} — суммарная площадь всех колец одного распределения.

По рисунку 2.4 можно подобрать значение параметра θ , наилучшим образом описывающее экспериментальные данные. Для этого была использована функция из библиотеки scipy языка программирования Python. На рисунке 2.4 обозначены: наименьшее значение хи-квадрат, деленное на число степеней свободы — $n = 8$, θ , при котором оно достигается, p -value данного хи-квадрат, N_E — количество источников EGRET из распределения, N — количество источников

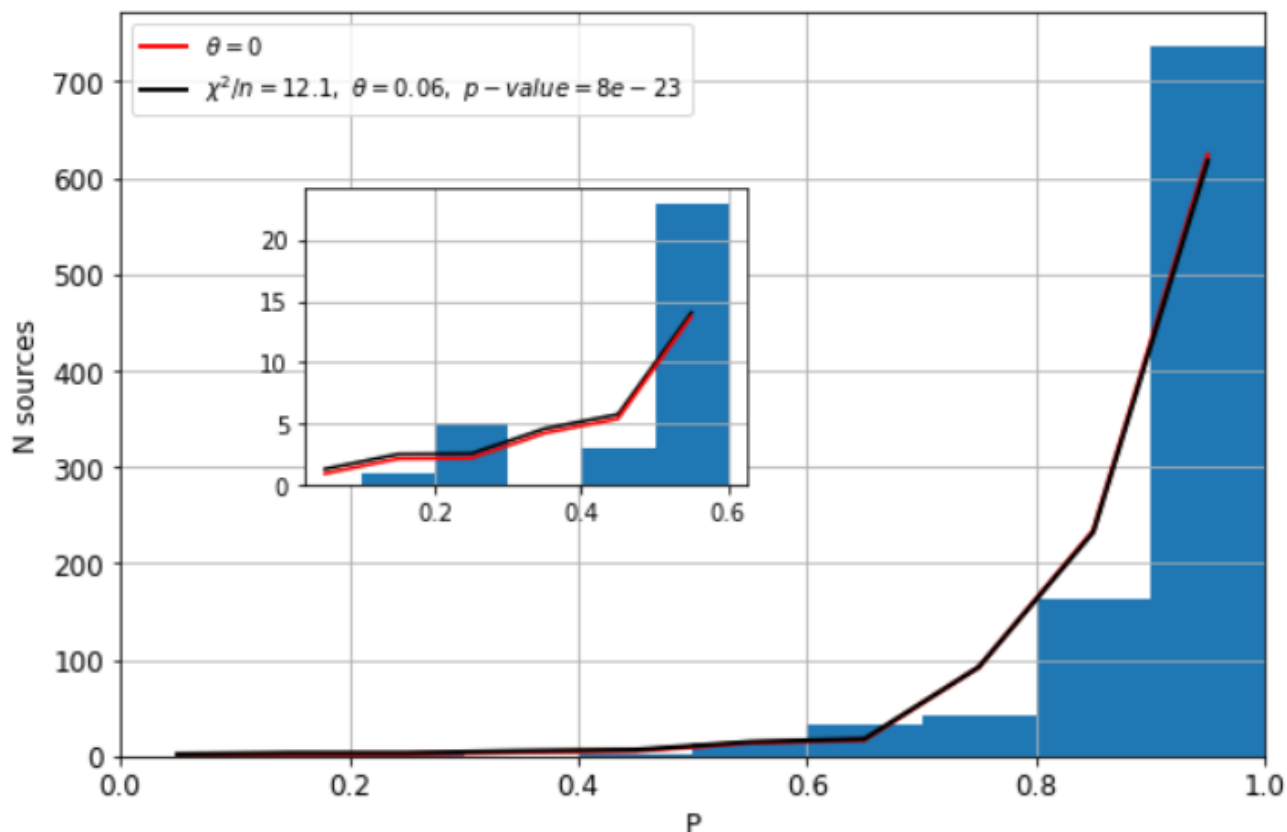


Рисунок 2.3 — На гистограмме представлено распределение кандидатов в смещенные источники из каталога Fermi по областям, ограниченным линиями уровня, красной линией обозначено «фоновое» распределение, черной — «фон»+«сигнал»

из числа N_E , которые могут проявлять смещение.

Число степеней n было выбрано по количеству бинов распределения — 10 минус один ввиду того, что это не генеральная совокупность, а также еще минус один по количеству параметров. Для заданного числа степеней свободы критическое значение $\chi^2/n = 15.5$. При значении меньше критического нулевая гипотеза не может быть принята.

Распределение 2.3 показывает, что среди отобранных в секции 2.1 74-х источников примерно 16% могут проявлять смещение. Однако линии двух распределений практически накладываются друг на друга и на графике сложно различить «фоновую» и «сигнальную гипотезы». Поэтому далее источники были разделены на группы по спектральному индексу и для каждой группы были построены схожие общие распределения (рисунки 2.5, 2.6 (а, в, д)). Учитывая, что источники со схожим наклоном спектра могут иметь схожую природу происхождения, это также позволит выделить группы, проявляющие в большей

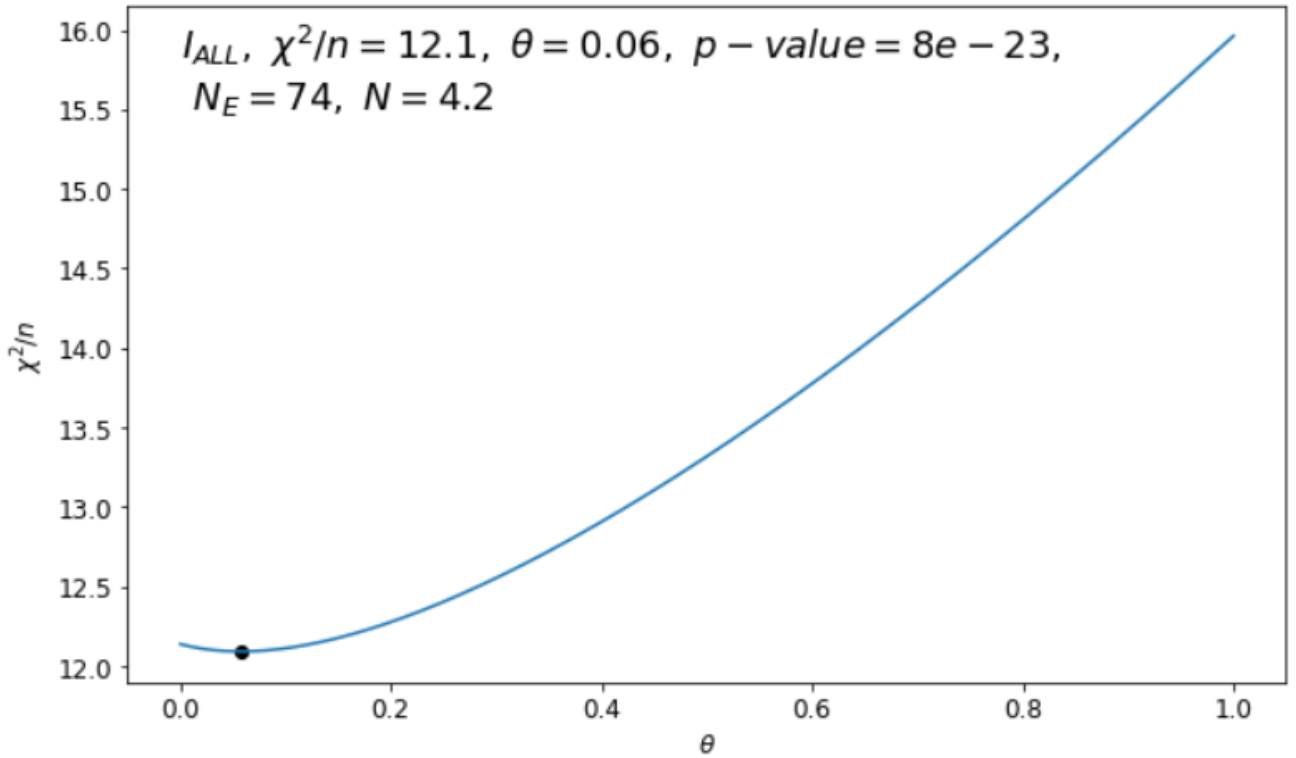


Рисунок 2.4 — График зависимости значения χ^2 от величины параметра θ (синяя линия); черной точкой обозначено наименьшее значение. На рисунке представлены наименьшее значение хи-квадрат, деленное на число степеней свободы — $n = 8$; θ , при котором оно достигается; p -value для хи-квадрат; N_E — количество источников EGRET из распределения 2.3; N — количество источников из числа N_E , которые могут проявлять смещение

мере данный эффект. Можно заметить, что для источников со спектральным индексом $I > 2.6$ находятся большая доля смещенных.

Также на рисунках 2.5, 2.6 (б, г, е) представлены изменения величины критерия хи-квадрат для данных групп источников. На графике представлены: наименьшее значение хи-квадрат, деленное на число степеней свободы, — $n = 8$, значение параметра θ , при котором оно достигается, p -value для рассчитанного значения χ^2 , N_E — количество источников EGRET из распределений 2.5, 2.6 (а, в, д), N — количество источников из числа N_E , которые могут проявлять смещение.

Результат представлен в таблице 2.2. Видно, что для источников со спектральным индексом $I \leq 2.5$ не находятся кандидаты в смещенные среди данных Fermi-LAT. При этом для $I \approx 3$ из 10 кандидатов каталога EGRET смещение могут проявлять 3 источника, такие спектральные индексы являются характерными для небольших кластеров маломассивных черных дыр, излучающих

Таблица 2.2 — Примеры источников из каталогов 3EG (EGRET) и 4FGL (Fermi-LAT)

I_E	θ	χ^2/n	p -value	N_E	N
$I_E = 2$	0.08	0.7	0.014	5	0.4
$2.1 < I_E \leq 2.4$	0.05	4.8	10^{-9}	20	1
$I_E = 2.5$	0	1.8	0.0001	16	0
$2.6 < I_E \leq 2.9$	0.19	1.7	0.0002	18	3.5
$I_E = 3$	0.31	1.9	0.0001	10	3.1
$I_E > 3$	0.23	0.5	0.0495	5	1.1
Без отбора по I	0.06	12.1	10^{-22}	74	4.2

за счет механизма Хокинга [20]. Для остальных групп $I > 2.5$ при критическом значении $\chi^2/n = 15.507$ или же при p -value < 0.05 невозможно принять «фоновую» гипотезу.

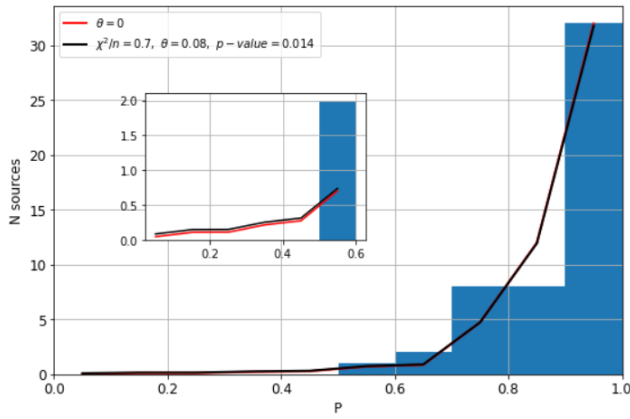
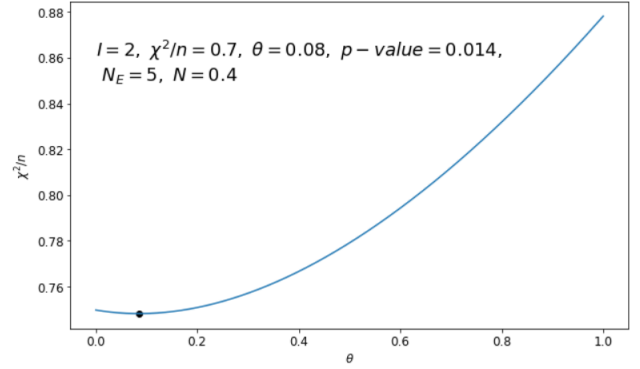
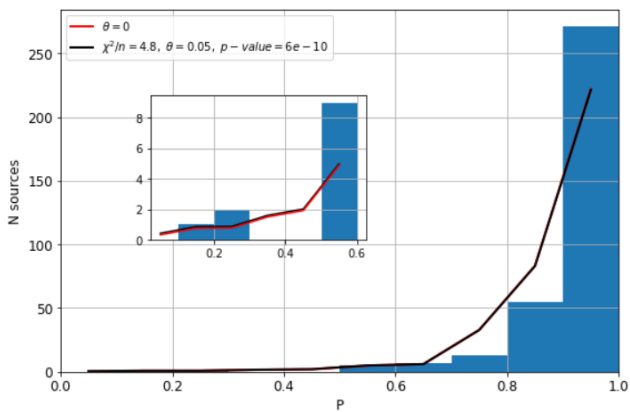
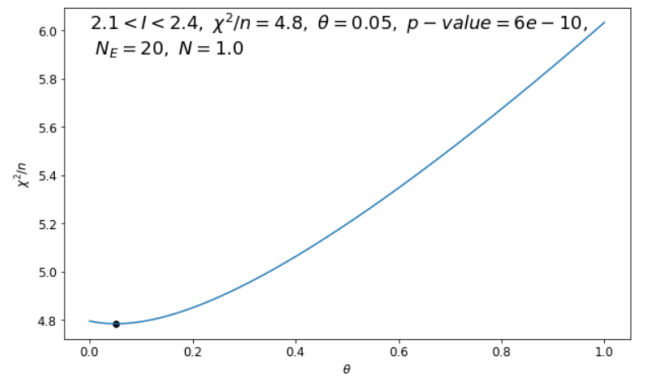
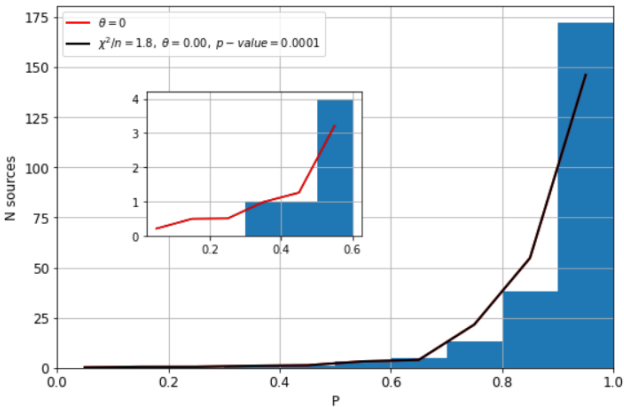
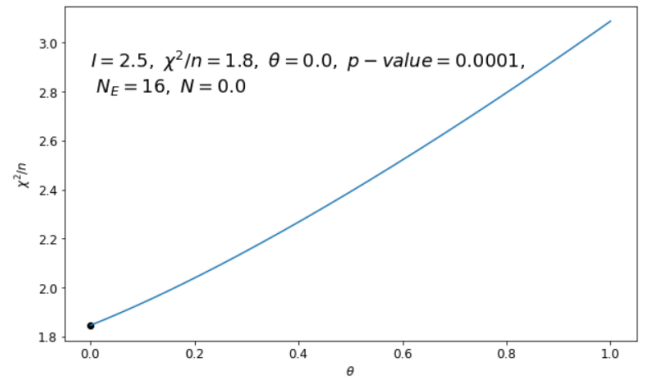
(a) $I = 2$ (б) $I = 2$ (в) $2.1 < I < 2.4$ (г) $2.1 < I < 2.4$ (д) $I = 2.5$ (е) $I = 2.5$

Рисунок 2.5 — На гистограммах рисунков (а, в, д) представлены распределения источников для групп источников; красная линия — «фоновое» распределение; черная — «фон»+«сигнал». На рисунках (б, г, е) изображены зависимости значения χ^2 от величины параметра θ (синяя линия); черная точка — наименьшее значение, деленное на число степеней свободы — $n = 8$; θ , при котором оно достигается; p -value для хи-квадрат; N_E — количество источников EGRET из распределения 2.3; N — число источников, которые могут проявлять смещение

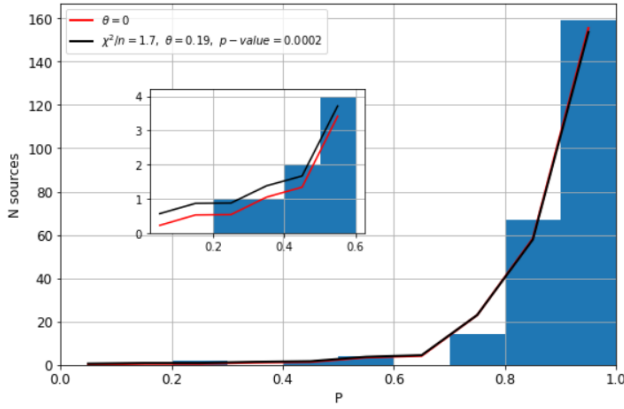
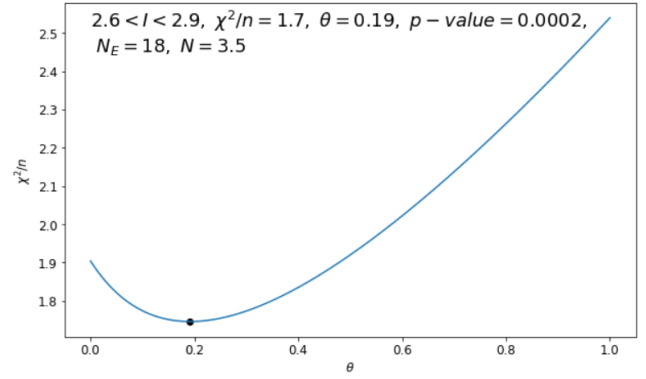
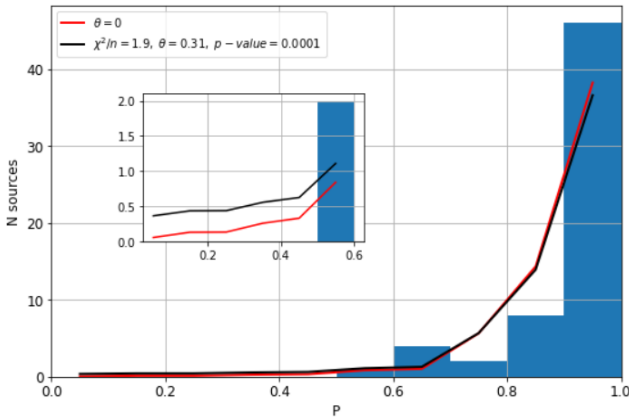
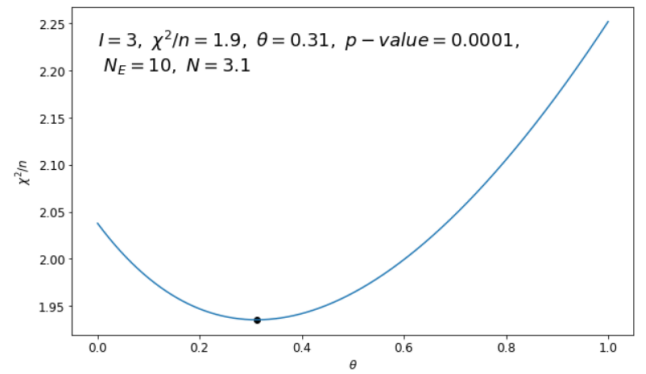
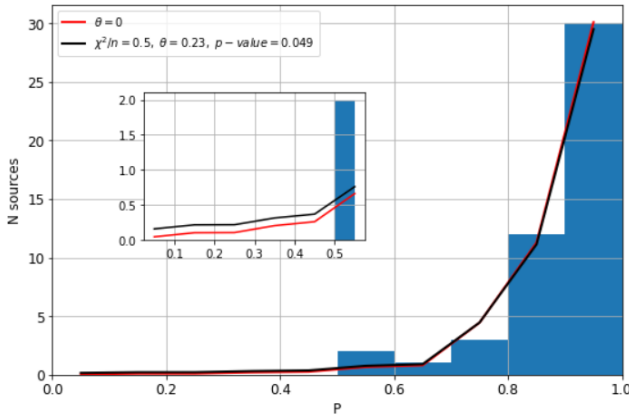
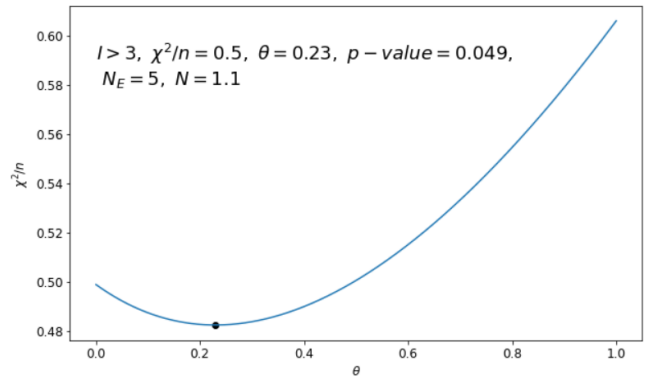
(а) $2.6 < I < 2.9$ (б) $2.6 < I < 2.9$ (в) $I = 3$ (г) $I = 3$ (д) $I > 3$ (е) $I > 3$

Рисунок 2.6 — На гистограммах рисунков (а, в, д) представлены распределения источников для групп источников; красная линия — «фоновое» распределение; черная — «фон» + «сигнал». На рисунках (б, г, е) изображены зависимости значения χ^2 от величины параметра θ (синяя линия); черная точка — наименьшее значение, деленное на число степеней свободы — $n = 8$; θ , при котором оно достигается; p -value для хи-квадрат; N_E — количество источников EGRET из распределения 2.3; N — число источников, которые могут проявлять смещение

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассматривалась возможность изучения эффекта смещения близких к Солнцу экзотических мелкомасштабных астрофизических объектов и их возможному последующему проявлению в наблюдательных данных по неидентифицированным гамма-источникам.

Для этого построена ожидаемая функция распределения плотности вероятности для смещенных источников в зависимости от галактических координат. Построена модель, позволяющая провести статистический анализ на основе предварительно отобранных кандидатов из данных двух гамма-телескопов EGRET и Fermi LAT. На основе модели проверялась принадлежность данных с экспериментов либо к «фоновой» гипотезе, либо к гипотезе, предполагающей смещение доли кандидатов среди отобранных. Для разных спектральных индексов I предсказано количество смещенных источников среди данных EGRET методом нахождения наименьшего хи-квадрат. Отмечено, что по полученным значениям гипотезу о «фоновом» распределении принять нельзя. Были выделены перспективные области $I > 2.6$, для которых смещение проявляется в большей мере. Так, для источников EGRET со спектральным индексом $I = 3$ ожидается, что кандидатами в смещённые окажутся 3 неидентифицированных ГИ из 10.

Данный результат позволяет косвенно искать экзотические объекты новой физики среди данных по неидентифицированным гамма-источникам как в последующих каталогах Fermi LAT, так и среди данных будущих гамма-обсерваторий (например, GAMMA-400 [18] и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Search for Dark Matter Annihilation Signals from Unidentified Fermi-LAT Objects with H.E.S.S. / H. Abdalla [et al.] // *Astrophysics Journal*. — 2021. — Vol. 918, no. 1. — P. 17.
2. Review of Particle Physics / P. Zyla [et al.] // *Progress of Theoretical and Experimental Physics*. — 2020. — Vol. 2020, no. 8. — P. 083C01.
3. Unidentified Fermi Objects in the view of H.E.S.S. - Possible Dark Matter Clumps / D. Glawion [et al.] // *36th International Cosmic Ray Conference*. Vol. 36. — 2019. — P. 518.
4. Testing the dark matter subhalo hypothesis of the gamma-ray source 3FGL J 2212.5 +0703 / Y.-P. Wang [et al.] // *Physical Review D*. — 2016. — Vol. 94, no. 12. — P. 123002. — arXiv: [1611.05135](https://arxiv.org/abs/1611.05135) [[astro-ph.HE](#)].
5. *Belotsky K., Kirillov A., Khlopov M.* Gamma-ray Evidence for Dark Matter Clumps // *Gravitation and Cosmology*. — 2014. — Vol. 20, no. 4. — P. 291–295.
6. Combined dark matter searches towards dwarf spheroidal galaxies with Fermi-LAT, HAWC, H.E.S.S., MAGIC, and VERITAS / H. Abdalla [et al.] // — 2021. — P. 528.
7. *Zechlin H.-S., Horns D.* Unidentified sources in the Fermi-LAT second source catalog: the case for DM subhalos // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. — 2012. — Vol. 2012, no. 11. — P. 050–050.
8. The Third EGRET Catalog of High-Energy Gamma-Ray Sources / R. C. Hartman [et al.] // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 1999. — Vol. 123, no. 1. — P. 79–202.
9. The first energetic gamma-ray experiment telescope (EGRET) source catalog / C. Fichtel [et al.] // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 1994. — Vol. 94. — P. 551–581.

10. The Second EGRET Catalog of High Energy Gamma-Ray Sources / J. Esposito [et al.] // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 1995. — Vol. 101. — P. 820.
11. *Casandjian J.-M., Grenier I. A.* A revised catalogue of EGRET γ -ray sources // Astronomy & Astrophysics. — 2008. — Vol. 489, no. 2. — P. 849–883.
12. Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog / S. Abdollahi [et al.] // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2020. — Vol. 247, no. 1. — P. 33.
13. *Kifune T.* Recent Status Of Very High Energy Gamma Ray Astronomy And Prospects // New Worlds in Astroparticle Physics. — 2001. — P. 66–75.
14. *Белоцкий К., Кириллов А., Хлопов М.* Астрофизические проявления сгустков холодной скрытой массы // Ядерная физика. — 2013. — Т. 76, № 4. — С. 506–512.
15. Clusters of Primordial Black Holes / K. M. Belotsky [et al.] // European Physical Journal C. — 2019. — Vol. 79, no. 3. — P. 246. — arXiv: [1807.06590](https://arxiv.org/abs/1807.06590) [[astro-ph.CO](#)].
16. *Rubin S., Sakharov A., Khlopov M.* The Formation of Primary Galactic Nuclei during Phase Transitions in the Early Universe // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2001. — Vol. 92. — P. 921–929.
17. *Rubin S. G., Khlopov M. Y., Sakharov A. S.* Primordial black holes from nonequilibrium second order phase transition // Gravitation & Cosmology. — 2000. — Vol. 6. — P. 51–58. — arXiv: [hep-ph/0005271](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0005271).
18. Gamma- and Cosmic-Ray observations with the GAMMA-400 Gamma-Ray telescope / N. P. Topchiev [et al.] // Advances in Space Research. — 2022. — Vol. 70, no. 9. — P. 2773–2793.
19. Отобранные источники. — <https://plotly.com/~VValery/2/import-pandas-as-pd-sources-pdread-cs/>.
20. Clusters of black holes as point-like gamma-ray sources / K. M. Belotsky [et al.] // Astroparticle Physics. — 2011. — Vol. 35, no. 1. — P. 28–32. — arXiv: [1212.2524](https://arxiv.org/abs/1212.2524) [[astro-ph.HE](#)].