

Выпускная квалификационная работа бакалавра

КЛАСТЕРЫ ПЕРВИЧНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР КАК ИСТОЧНИКИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Выполнил: **Васильева Е.В.**

Группа: Б22-102

Научный руководитель: **Кириллов А.А.**



Цель:

Постановка ограничений на параметры кластеров ПЧД, испускающих гамма-излучение за счёт эффекта Хокинга, на основе современных наблюдательных данных гамма-телескопа Fermi LAT

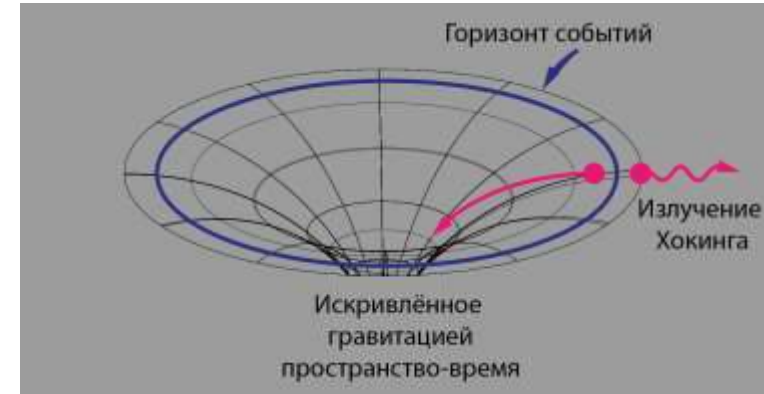
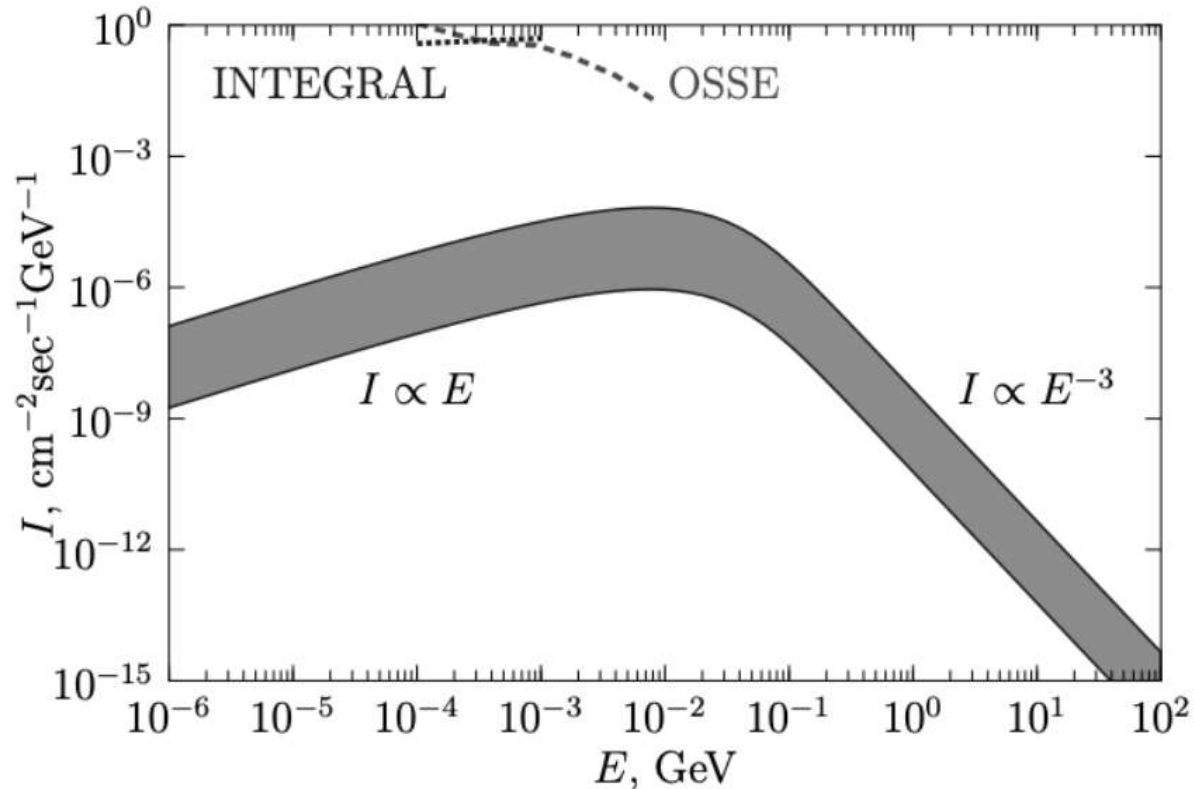
Актуальность:

1. Природа темной материи остается одной из ключевых нерешенных задач современной космологии и физики элементарных частиц.
2. Отсутствие однозначной регистрации слабовзаимодействующих массивных частиц (WIMP) делает актуальным рассмотрение иных моделей, среди которых особое место занимают первичные черные дыры (ПЧД).
3. Способность ПЧД формировать гравитационно связанные кластеры делает их потенциально наблюдаемыми объектами, что открывает возможности для их детектирования современными астрофизическими инструментами.

Первичные черные дыры

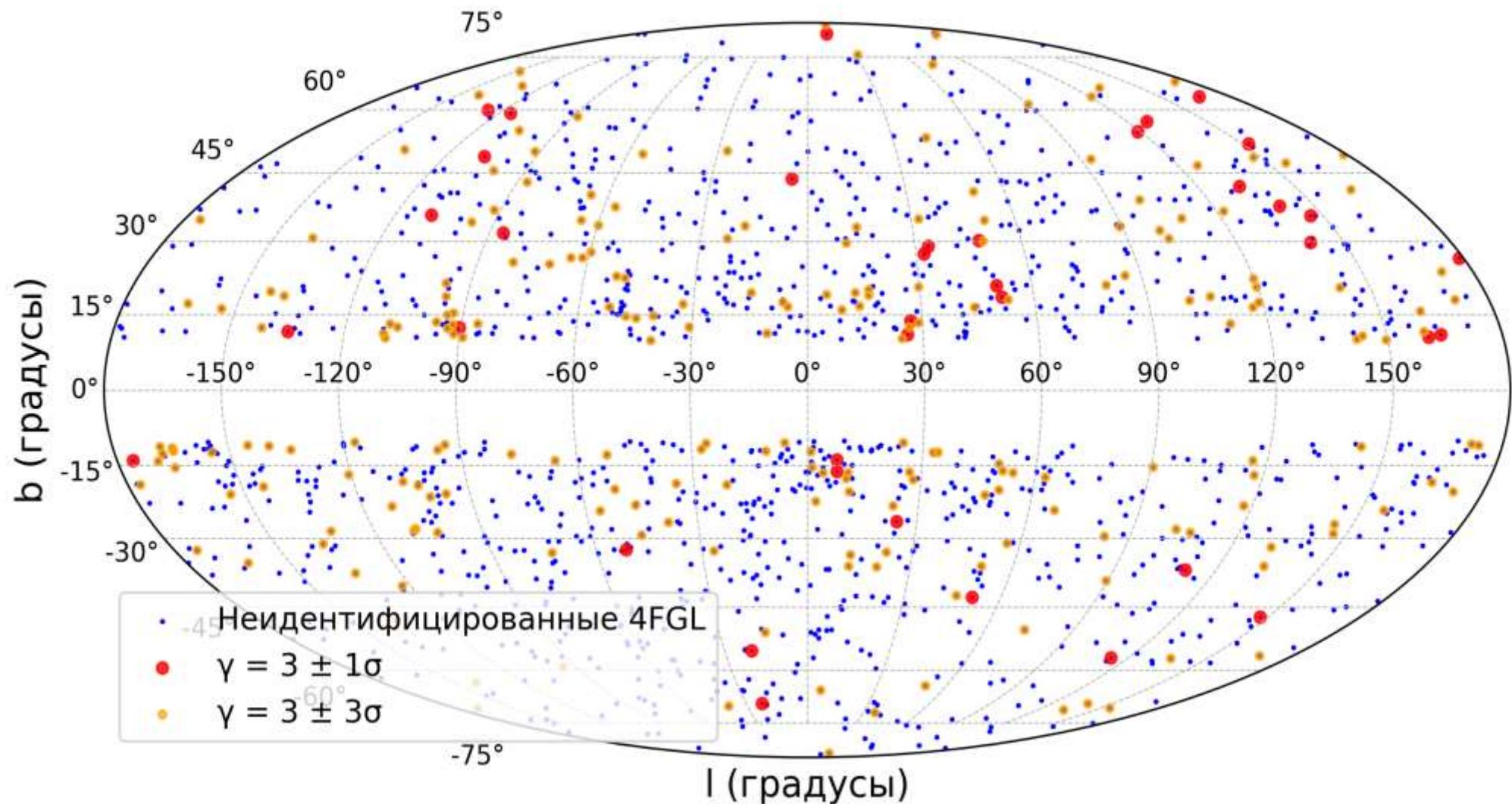
Согласно гипотезе Хокинга, черные дыры рождают и излучают тепловой спектр частиц как абсолютно черное тело:

$$T = \frac{1}{8\pi} \frac{m_{pl}^2}{M}$$



В отличие от известных обнаруженных источников, имеющих спектральный индекс $\Gamma \sim 2$, спектр излучения ПЧД в диапазоне энергий выше 100 МэВ аппроксимируется степенным законом с индексом $\Gamma \sim 3$

Анализ каталога 4FGL-4DR



Среди всех неидентифицированных источников 38 имеют индекс $\Gamma = 3 \pm 1\sigma$ и 222 – $\Gamma = 3 \pm 3\sigma$

Переход от точечных источников к диффузному гамма-фону



[Belotsky et al., Astropart. Phys. 35, 28 (2011)]:

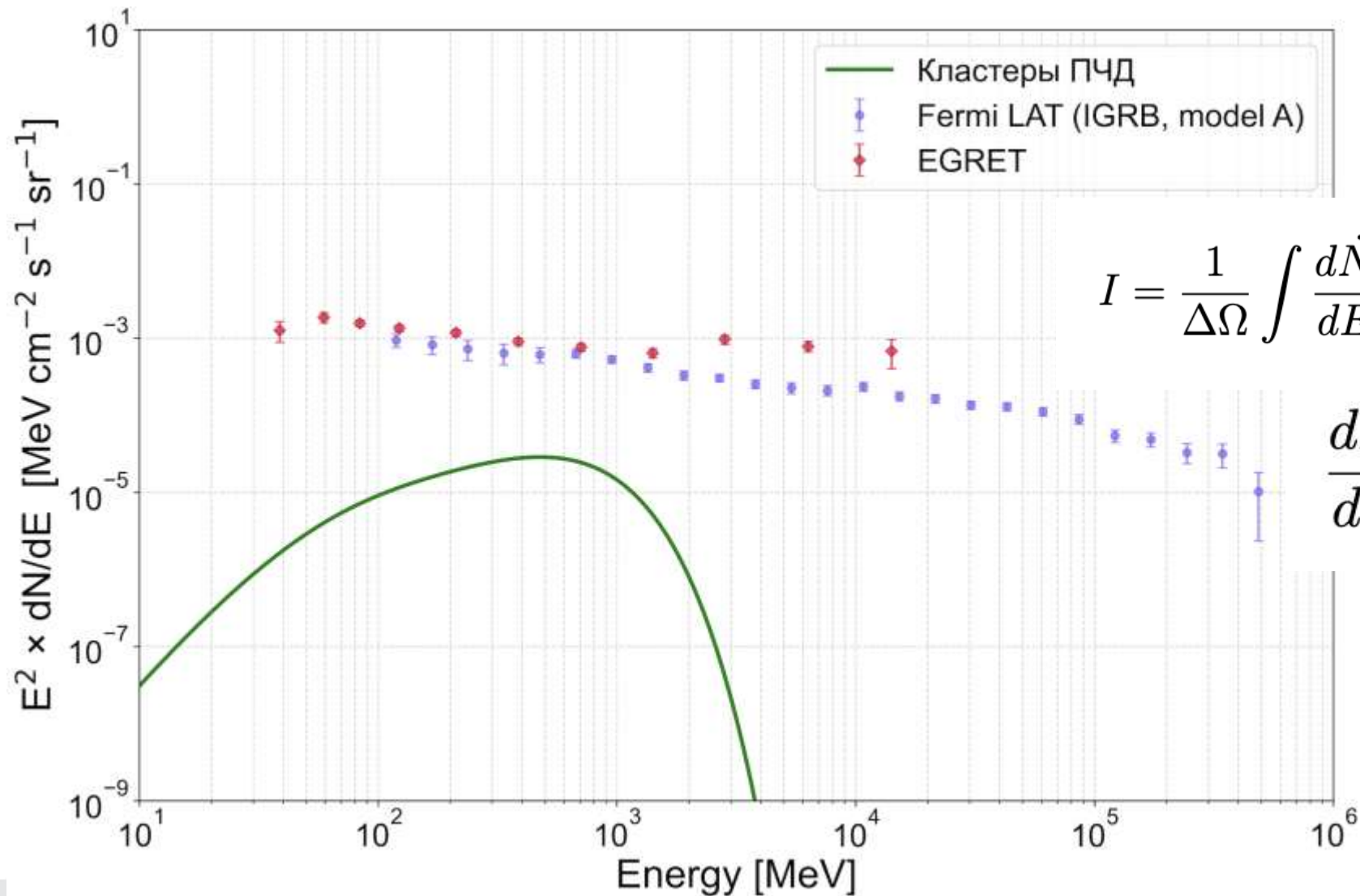
$$R_{\max} < 3 \text{ кпк}$$

Из $N_{cl} = 1400$ как точечные должны наблюдаться ~ 0.03
источника



**Большая часть подобных
источников вносит вклад
в диффузный гамма-фон**

Оценка диффузного гамма-фона. Определение параметров модели



$$I = \frac{1}{\Delta\Omega} \int \frac{d\dot{N}}{dE} \Big|_{cl} n_{cl} r^2 d\Omega dr = \frac{1}{4\pi} \int \frac{d\dot{N}}{dE} \Big|_{cl} n_{cl} dr$$

$$\frac{d\dot{N}}{dE} \Big|_{cl} = \int_{M_{min}}^{M_{max}} \frac{d\dot{N}}{dE} \frac{dN}{dM} dM$$

$$n_{cl} = \frac{3}{4\pi} \frac{N_{cl}}{l_h^3}$$

Получение массового спектра. Определение параметров модели.



ПЧД в составе кластеров в момент своего образования имели массовое распределение вида [Belotsky et al., arXiv:1807.06590 (2018)]:

$$\frac{dN}{dM} = \frac{N_{bh}}{M_*} \left(\frac{M_*}{M_{in}} \right)^{\alpha}$$

За счет испарения Хокинга

$$\frac{dN}{dM} = \frac{N_{bh}}{M_*} \frac{(M/M_*)^2}{\left(1 + (M/M_*)^3\right)^{2/3 + \alpha/3}}$$

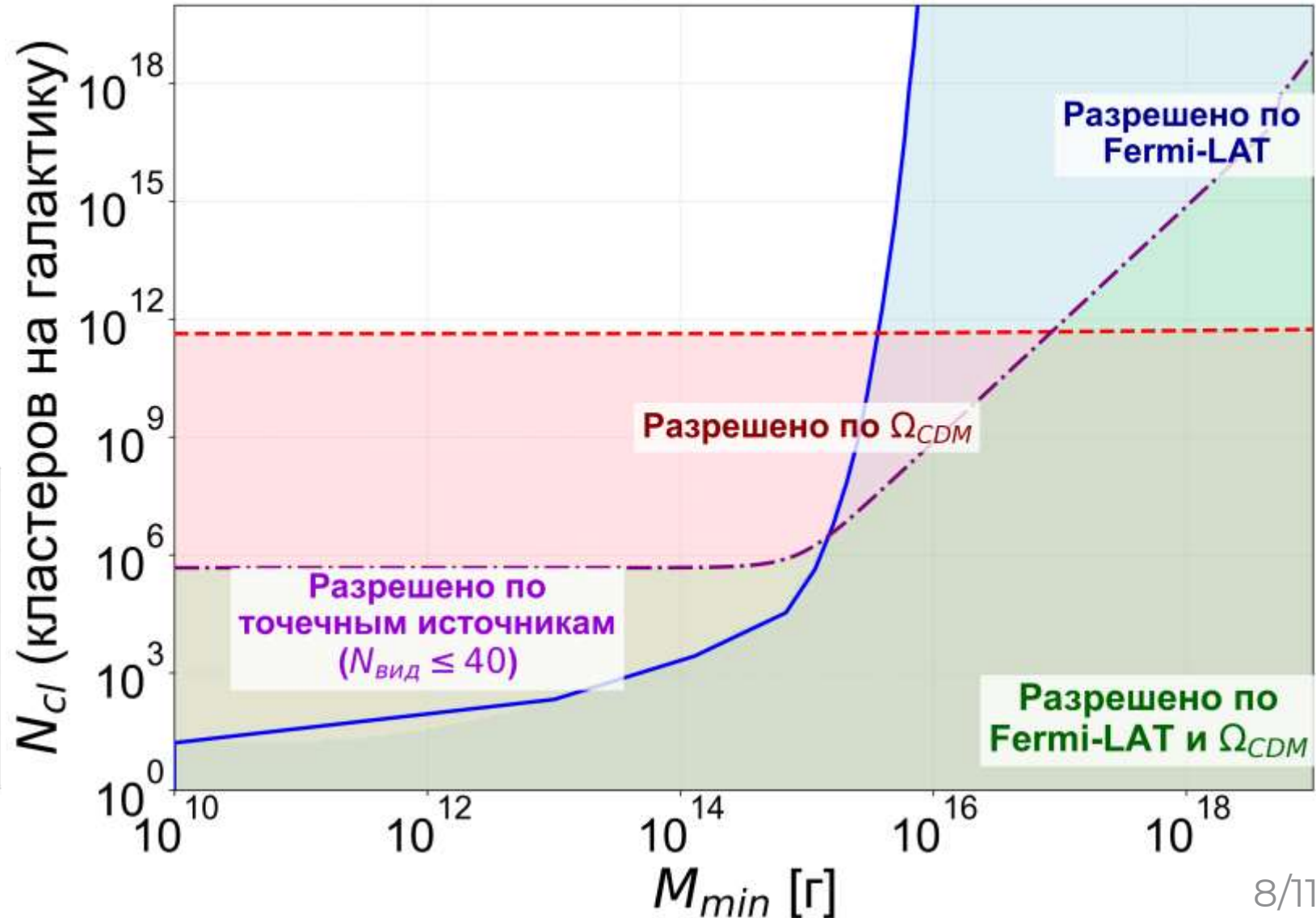
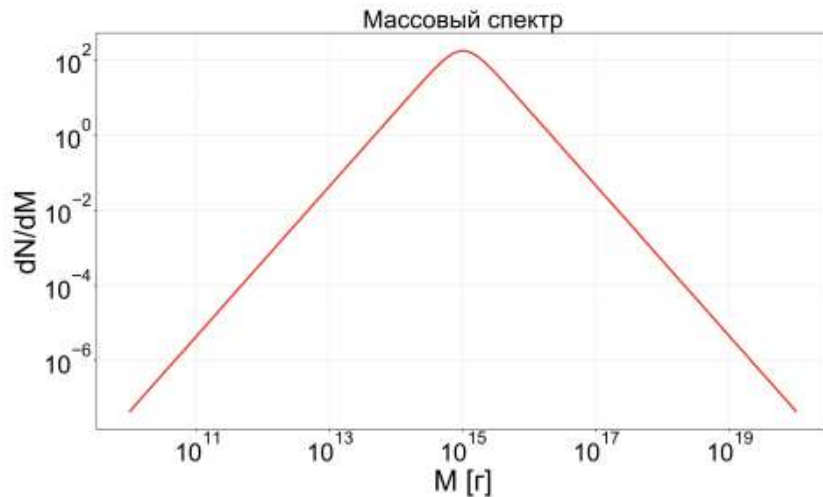
$$M_* = 10^{15} \text{ г.}$$

Постановка ограничений на параметры модели. Учет возможности существования точечных источников.



Ограничения параметров модели ($\alpha = 2.0$)

Ограничения параметров модели при $\alpha = 2.0$. Количество наблюдаемых точечных источников – 40.

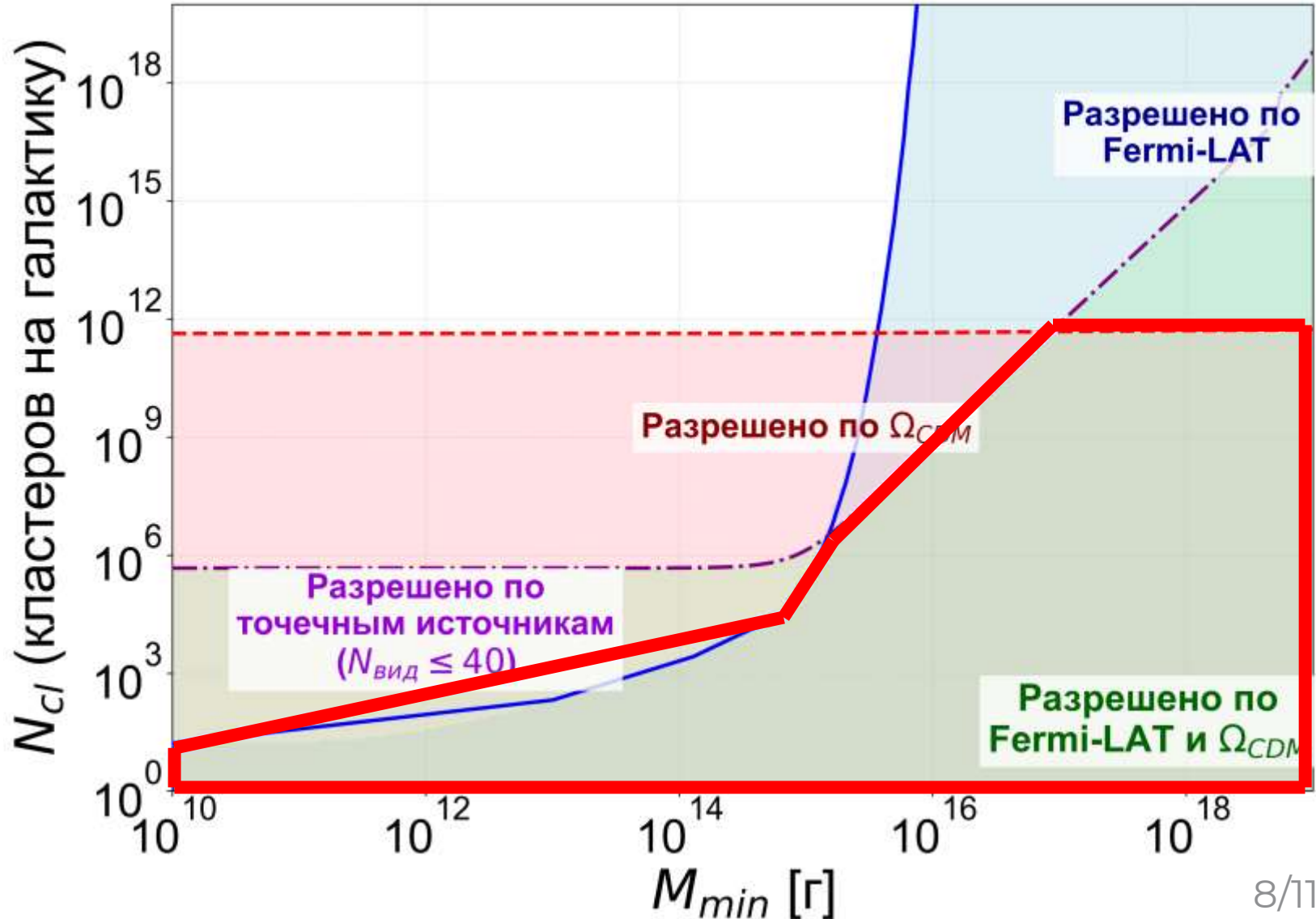
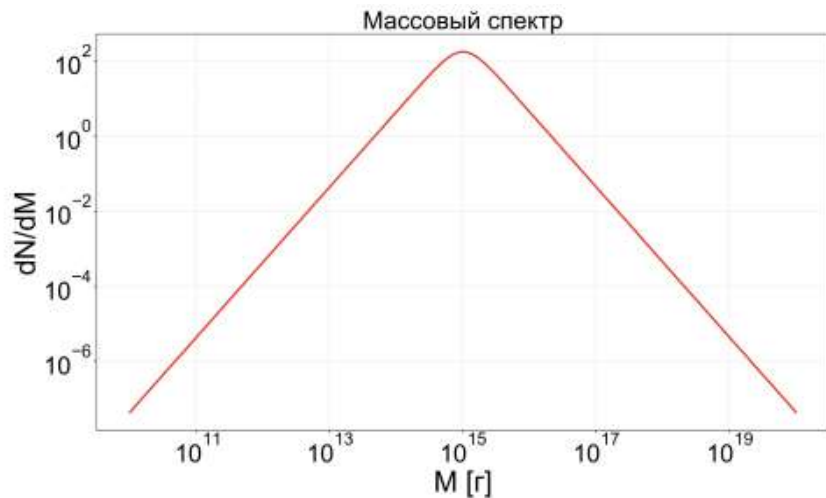


Постановка ограничений на параметры модели. Учет возможности существования точечных источников.



Ограничения параметров модели ($\alpha = 2.0$)

Ограничения параметров модели при $\alpha = 2.0$. Количество наблюдаемых точечных источников – 40.

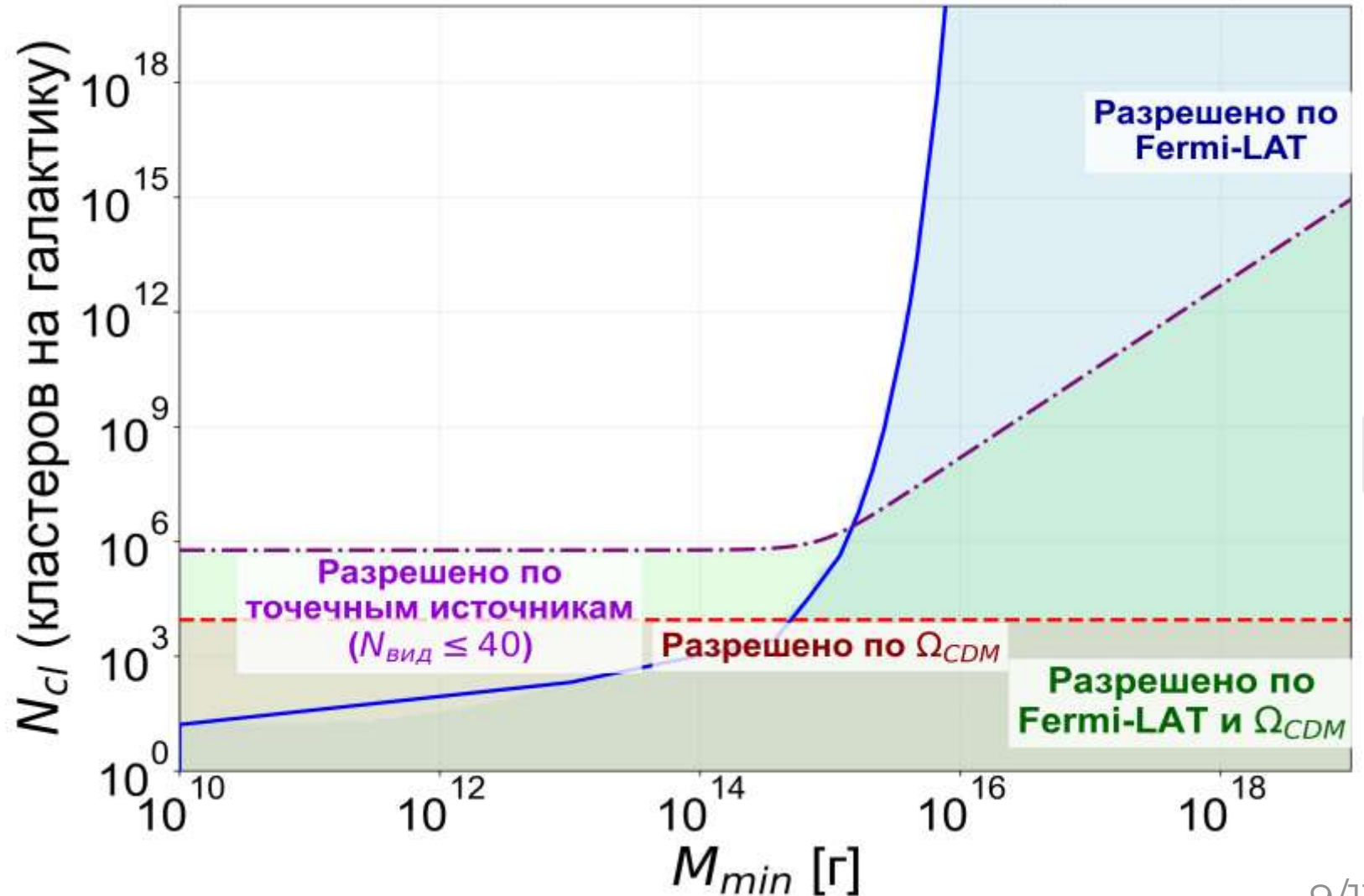
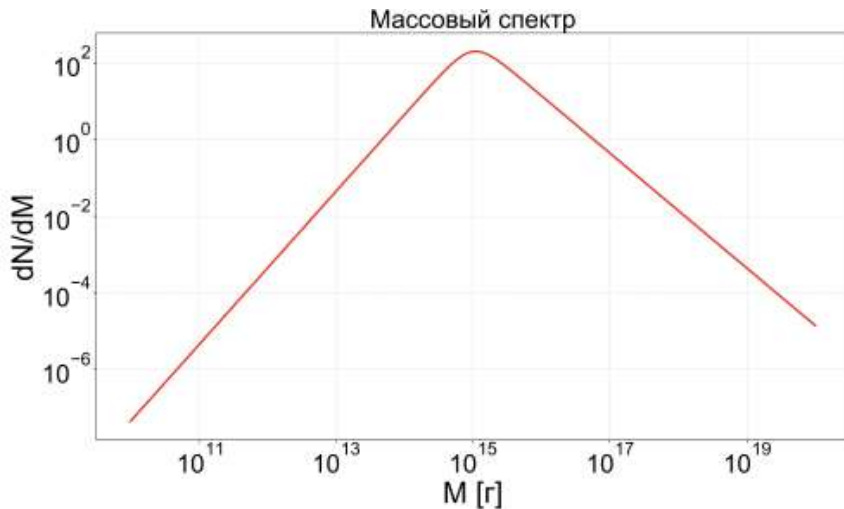


Постановка ограничений на параметры модели. Учет возможности существования точечных источников.



Ограничения параметров модели ($\alpha = 1.5$)

Ограничения параметров модели при $\alpha = 2.0$.
Количество наблюдаемых точечных источников – 40.

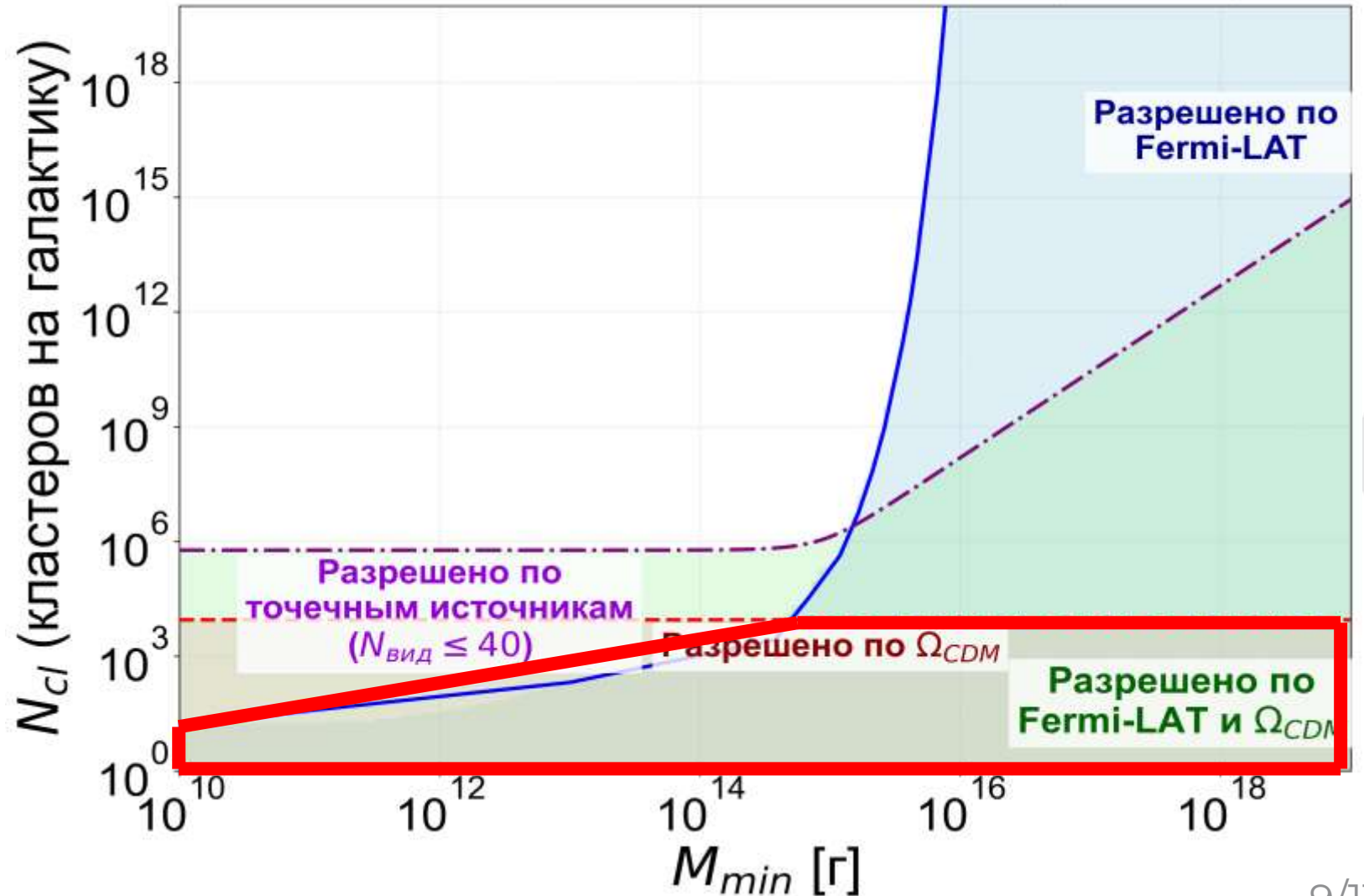
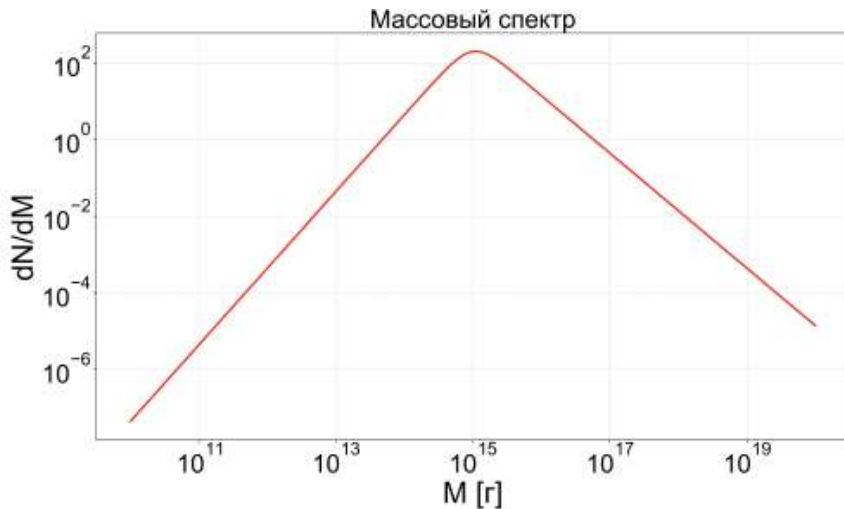


Постановка ограничений на параметры модели. Учет возможности существования точечных источников.



Ограничения параметров модели ($\alpha = 1.5$)

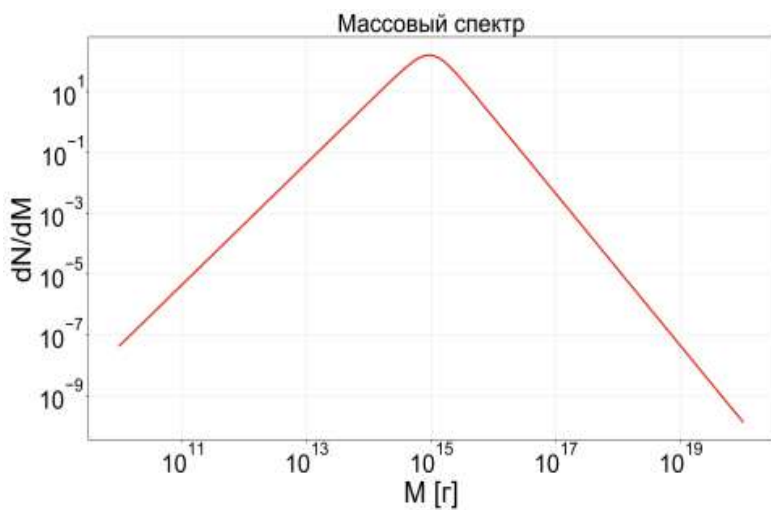
Ограничения параметров модели при $\alpha = 2.0$.
Количество наблюдаемых точечных источников – 40.



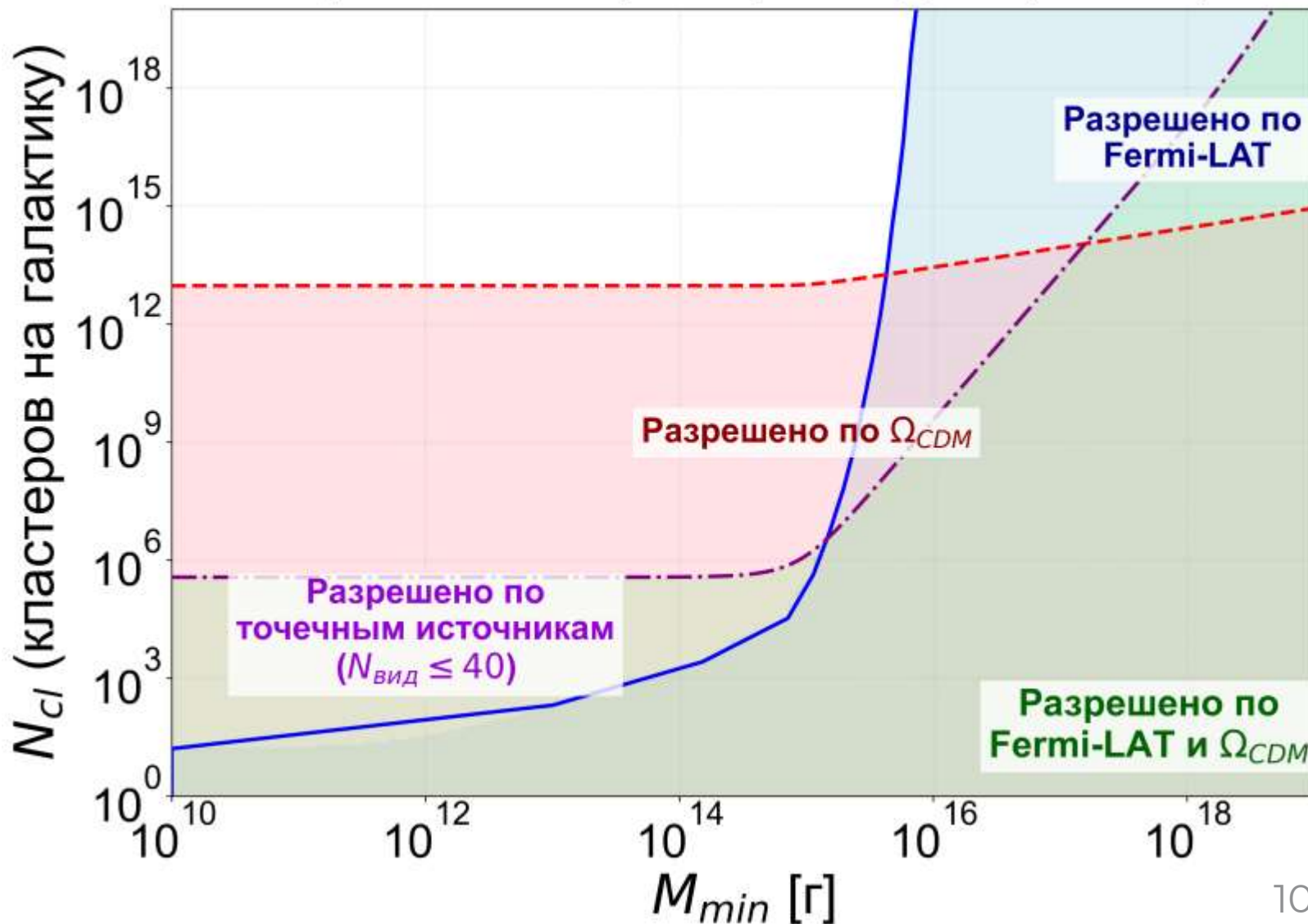
Постановка ограничений на параметры модели. Учет возможности существования точечных источников.



Ограничения параметров модели при $\alpha = 1.5$.
Количество наблюдаемых точечных источников – 40.



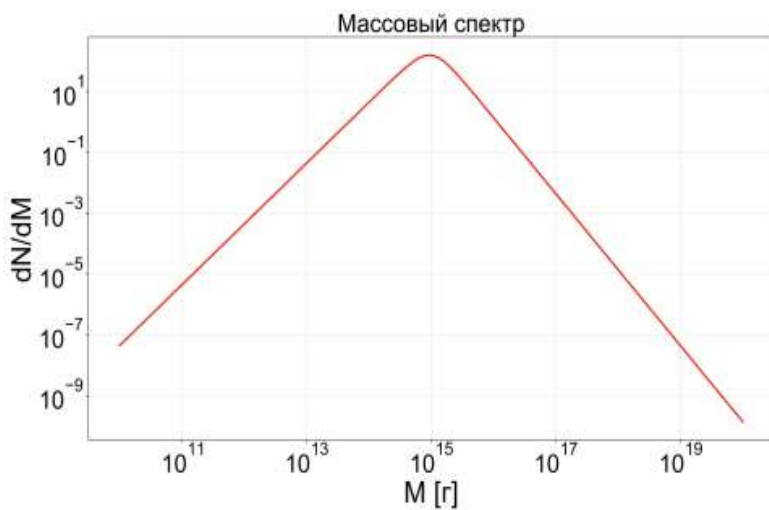
Ограничения параметров модели ($\alpha = 2.5$)



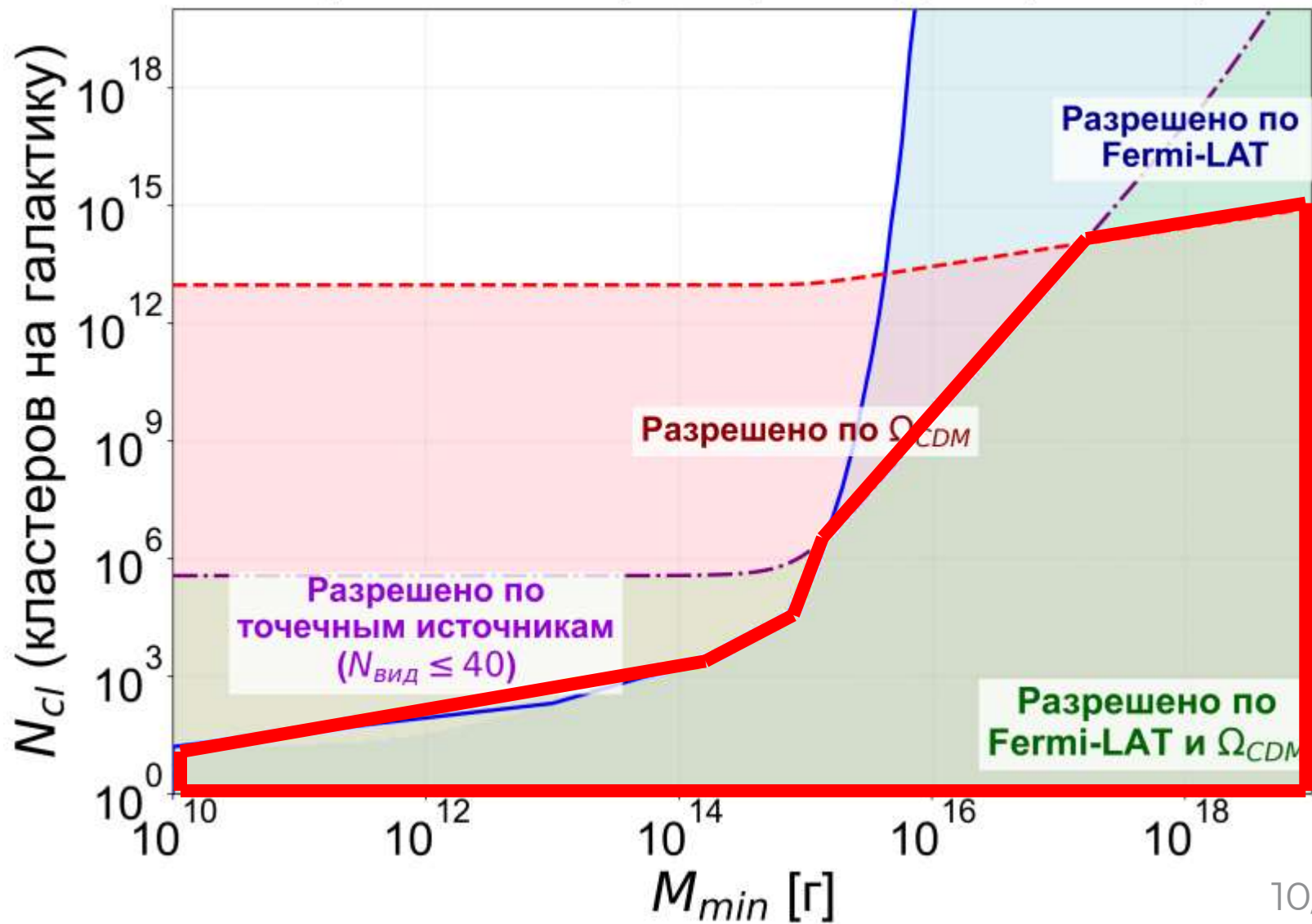
Постановка ограничений на параметры модели. Учет возможности существования точечных источников.



Ограничения параметров модели при $\alpha = 1.5$.
Количество наблюдаемых точечных источников – 40.



Ограничения параметров модели ($\alpha = 2.5$)



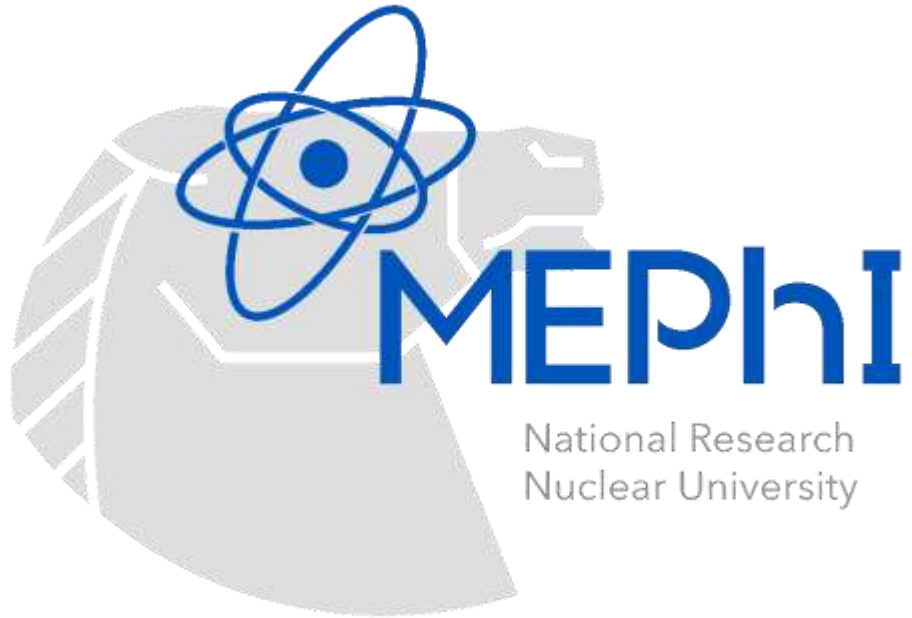
Получено аналитическое выражение для спектра с 4 параметрами: N_{cl} , M_{min} , N_{bh} , α

Проанализирован каталог 4FGL-DR4: из 1387 неидентифицированных источников лишь 38 имеют спектральный индекс $\Gamma = 3 \pm 1\sigma$ — это указывает на их вклад в диффузный фон

Получены ограничения на (N_{cl}, M_{min}) из трёх независимых условий:

- поток Fermi-LAT
- космологическое $\Omega_{bh} \leq \Omega_{CDM} \approx 0.27$
- число видимых точечных источников $N_{vis} \leq 40$

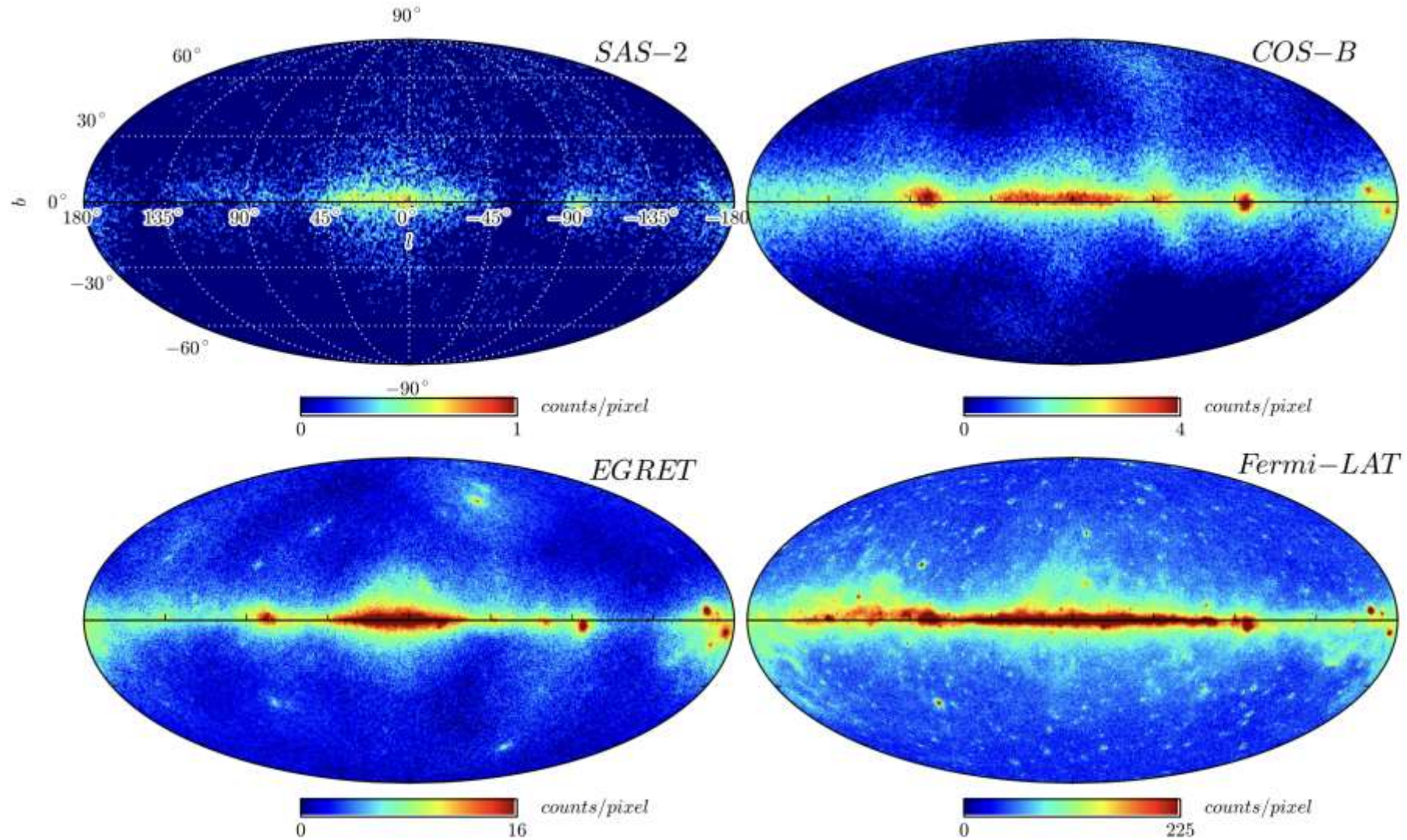
Вывод: кластеры ПЧД с параметрами из допустимой области могут вносить существенный вклад в диффузный гамма-фон, не противореча наблюдениям



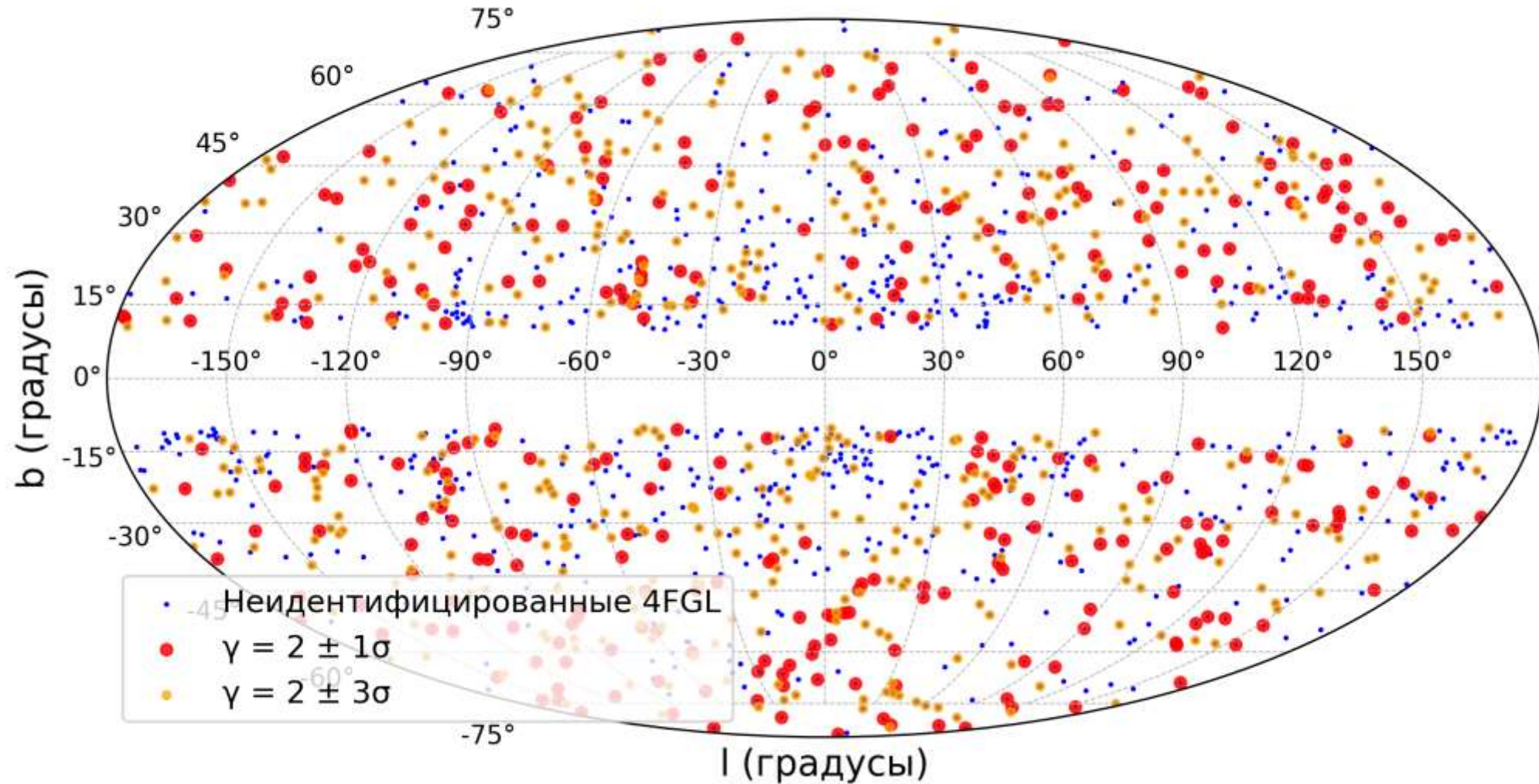
**Спасибо за
внимание!**

Москва, 2026

Сравнение каталогов точечных источников гамма-излучения

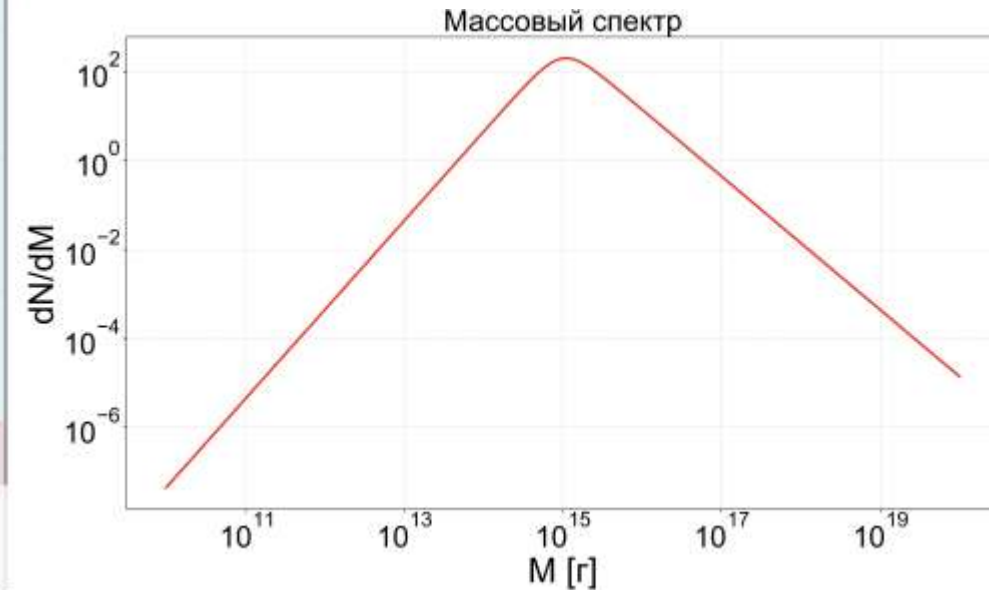
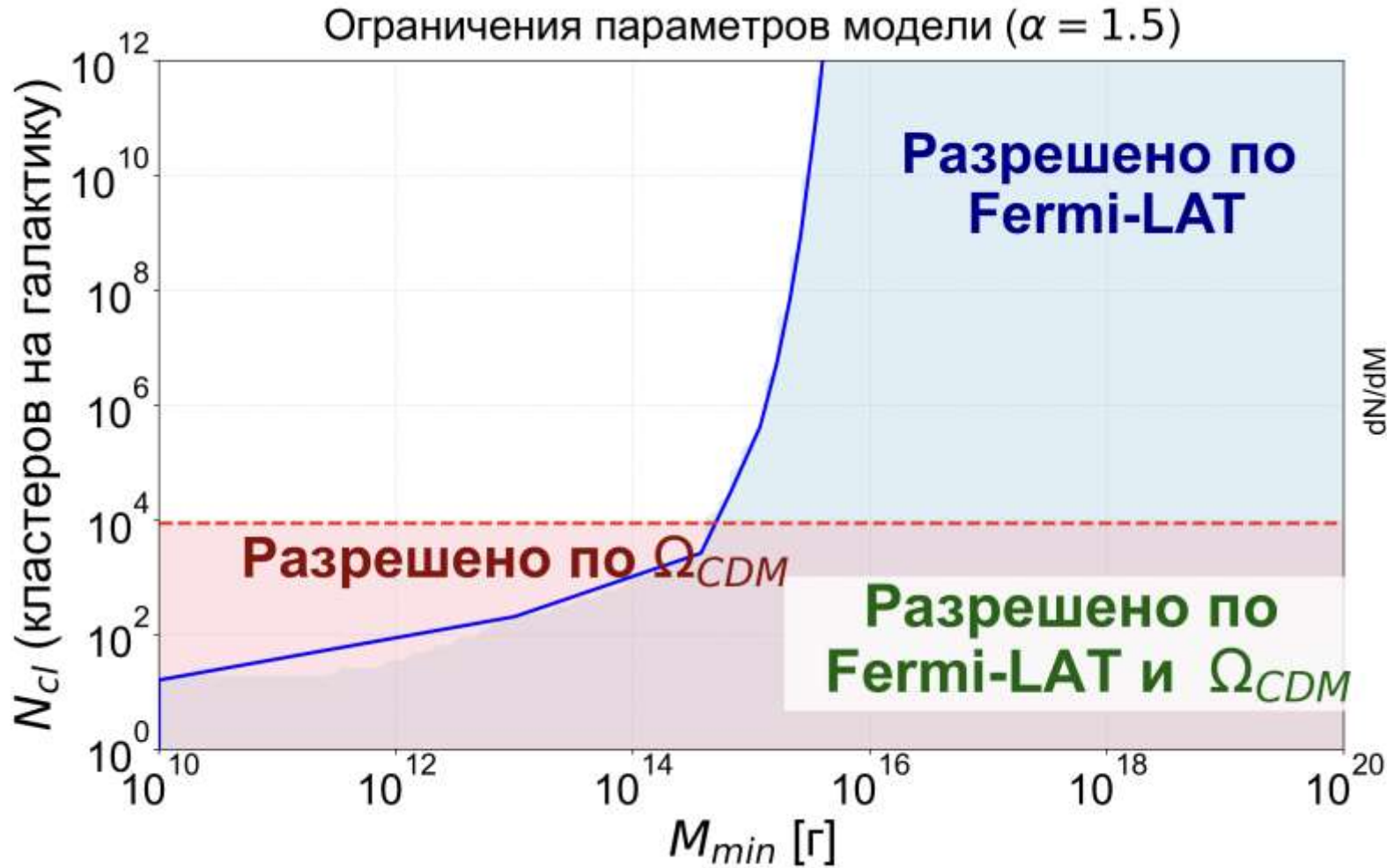


Анализ каталога 4FGL-4DR



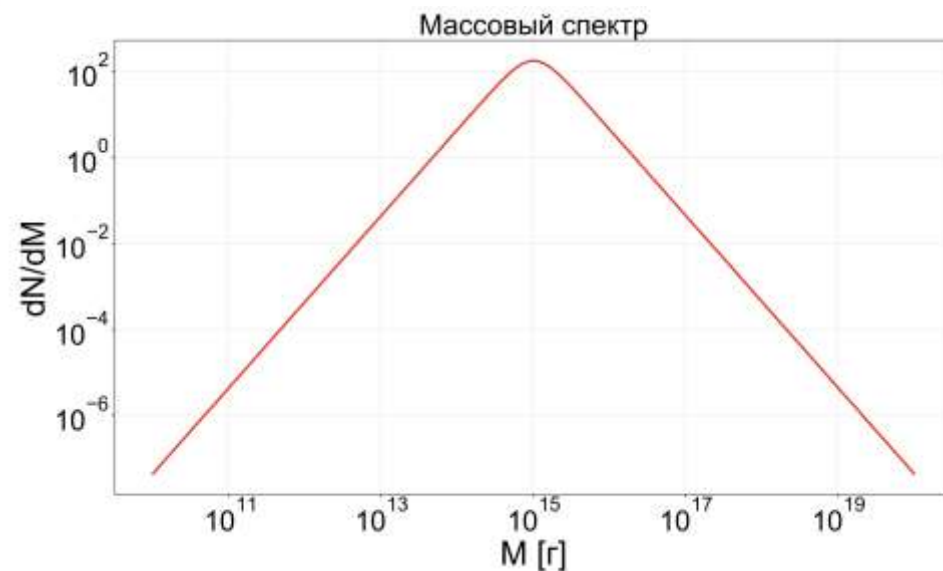
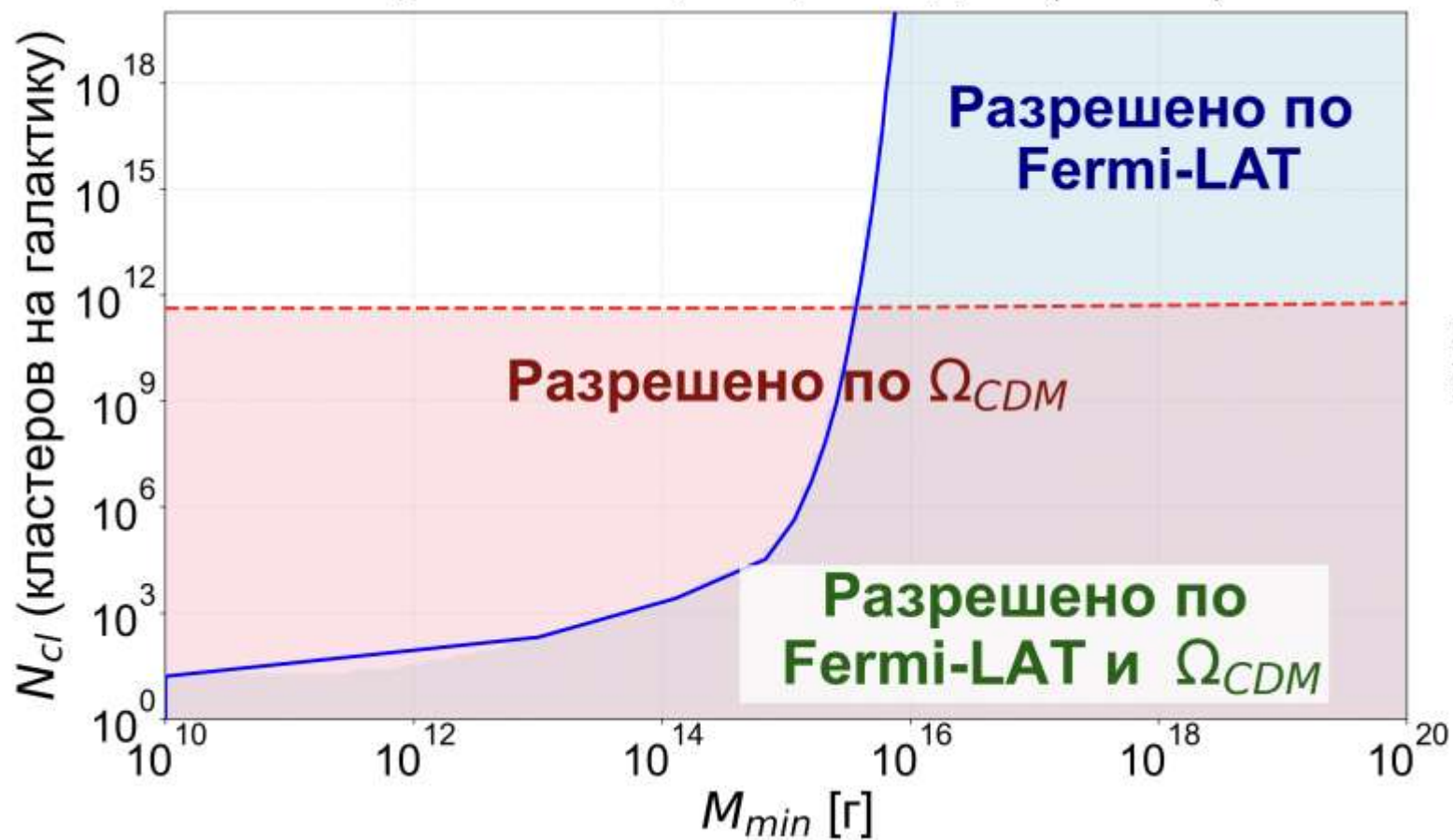
Карта неидентифицированных источников со спектральным индексом равным 2. Таких объектов в каталоге 4FGL-DR4 насчитывается 443.

Постановка ограничений на параметры модели



Постановка ограничений на параметры модели

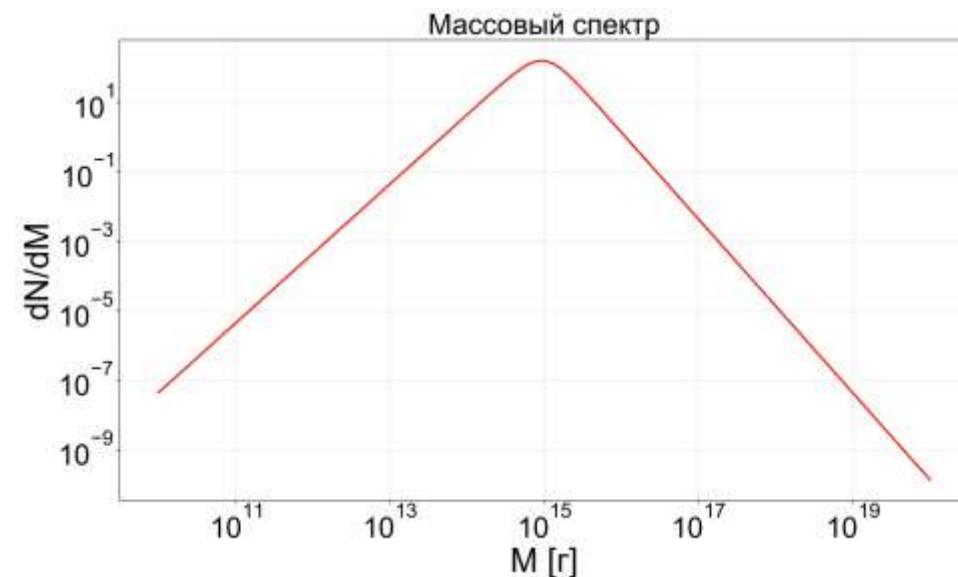
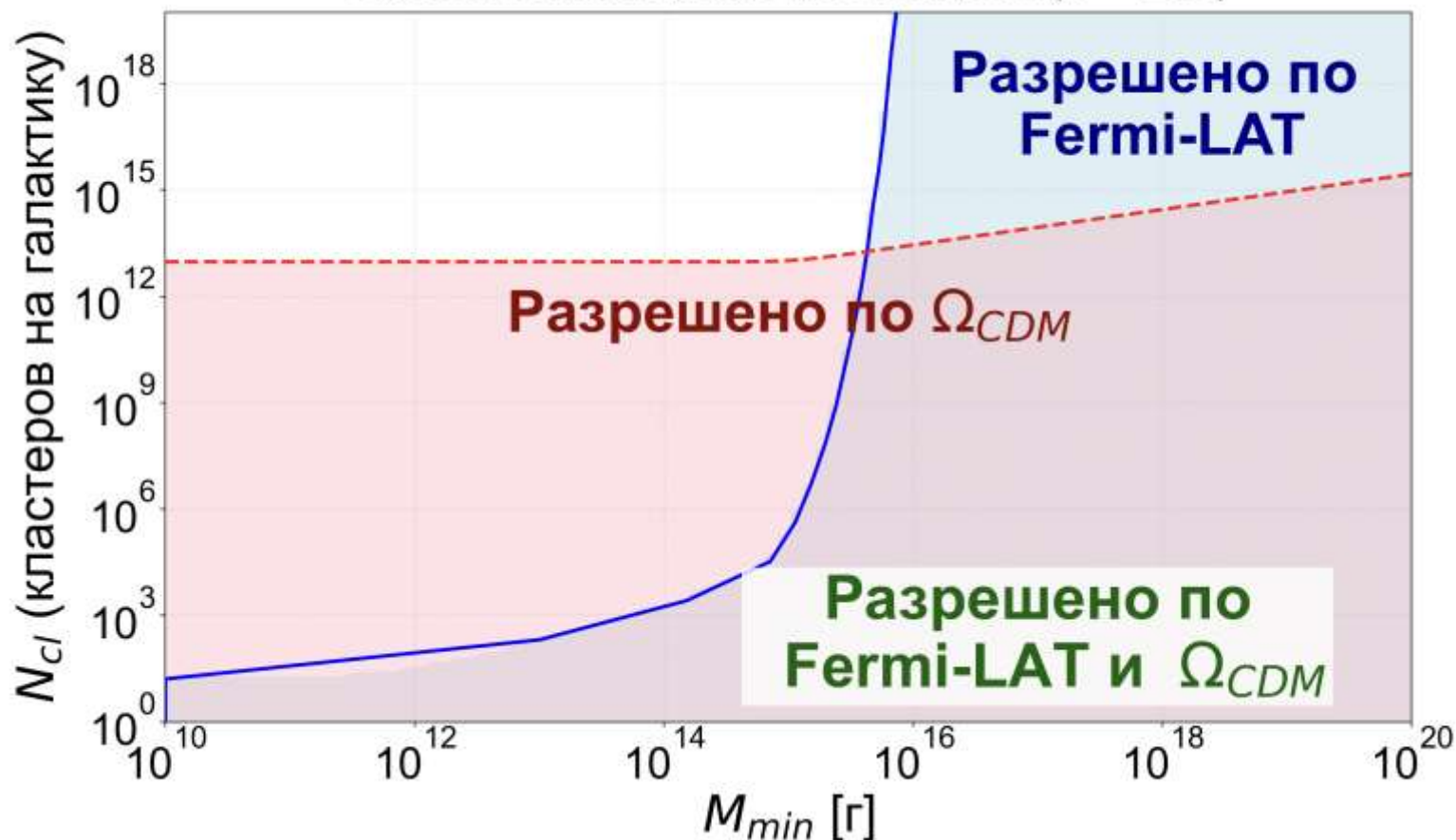
Ограничения параметров модели ($\alpha = 2.0$)



Постановка ограничений на параметры модели



Ограничения параметров модели ($\alpha = 2.5$)



Постановка ограничений на параметры модели

Ограничения для разных N_{bh} ($\alpha = 2.0$)

