

# ПРОХОЖДЕНИЕ ГАММА-ВСПЛЕСКА ЧЕРЕЗ МОЛЕКУЛЯРНОЕ ОБЛАКО: ПОГЛОЩЕНИЕ ПОСЛЕСВЕЧЕНИЯ В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

© 2024 г. А. В. Нестерёнок<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 14.08.2024 г.

После доработки 11.09.2024 г.; принята к публикации 11.09.2024 г.

Исследуется поглощение послесвечения гамма-всплеска в рентгеновском диапазоне длин волн в плотном молекулярном облаке. Представлены результаты численного моделирования распространения излучения гамма-всплеска в облаке для различных плотностей газа, металличности, расстояний от звезды-прародителя гамма-всплеска до облака. Рассмотрена выборка из 45 гамма-всплесков с известным красным смещением, у которых изотропная энергия излучения в гамма-диапазоне соответствует значению, принятому в численном моделировании. Для этих гамма-всплесков проведен анализ энергетических спектров послесвечений, полученных на телескопе Swift/XRT в поздние моменты времени,  $t \geq 4 \times 10^3$  с. Показано, что оценки значений лучевой концентрации водорода, полученные с помощью модели поглощения, в которой не учитывается ионизация ионов металлов и используется солнечное значение металличности, в 1–3 раза меньше действительных значений — в случае, если молекулярное облако находится вблизи звезды-прародителя гамма-всплеска. Если облако газа располагается на расстоянии  $R \geq 10$  пк от источника гамма-всплеска, или металличность газа  $[M/H] \leq -1$ , влияние ионизационной структуры облака на поглощение послесвечения мало.

**Ключевые слова:** гамма-всплески, молекулярные облака.

DOI: 10.31857/S0320010824080038, EDN: LXYNIQ

## ВВЕДЕНИЕ

Гамма-всплески являются результатом взрыва и высвобождения в окружающее космическое пространство колоссального количества энергии излучения в гамма диапазоне порядка  $10^{52}$  эрг и выше (Голдштейн и др., 2016). Благодаря огромному выделению энергии, гамма-всплески занимают центральную роль в исследовании современных астрофизических задач (см., например, Боццо и др., 2024). Классификация гамма-всплесков основывается на свойствах излучения самой первой, активной фазы — излучение в гамма диапазоне со множеством накладывающихся друг на друга пиков. Длительность излучения активной фазы гамма-всплесков обычно определяется как временной интервал, в течение которого интегральный поток возрастает от 5% до 95%. Этот параметр обозначается  $T_{90}$  и варьируется для гамма-всплесков от долей секунды до несколько тысяч секунд. Выделяют два основных класса гамма-всплесков — короткие ( $T_{90} \lesssim 2$  с) и длинные ( $T_{90} \gtrsim 2$  с). Эти два класса гамма-всплесков занимают хорошо разделенные области на диаграмме спектральная жесткость — длительность излучения активной фазы (По-заненко и др., 2021). До недавнего времени было при-

нято считать, что длинные гамма-всплески рождаются в результате коллапса массивных звезд, а короткие гамма-всплески являются результатом слияния двух компактных звезд. Одновременная регистрация короткого гамма-всплеска GRB 170817A и сигнала гравитационных волн GW 170817 предоставила достоверное подтверждение, что короткие гамма-всплески связаны со слиянием двух компактных звезд (Голдштейн и др., 2017). А недавнее открытие излучения килоновой в послесвечении некоторых длинных гамма-всплесков заставило пересмотреть общепринятое представление о происхождении длинных гамма-всплесков (Троха и др., 2022; Леван и др., 2024).

Важным этапом в исследовании гамма-всплесков было открытие послесвечения в оптическом и рентгеновском диапазонах длин волн — это было сделано для гамма-всплеска GRB 970228 (ван Паррадиис и др., 1997; Коста и др., 1997). А для гамма-всплеска GRB 970508 впервые удалось получить оценки красного смещения по абсорбционным линиям в оптическом спектре послесвечения:  $0.835 < z \lesssim 2.3$  (Метцгер и др., 1997). Это открытие подтвердило гипотезу о космологической природе гамма-всплесков. Красное смещение гамма-всплеска также можно определить, если удастся локализовать гамма-всплеск на небе и идентифицировать родительскую галактику (Кулкар-

\*Электронный адрес: alex-n10@yandex.ru

ни и др., 1998). Послесвечение гамма-всплеска испытывает поглощение в межзвездной среде родительской галактики. Энергетический спектр послесвечения со множеством абсорбционных линий ионов металлов, атомов и молекул водорода включает в себе информацию о межзвездной среде галактики (Шади и др., 2017). Красное смещение самых далеких гамма-всплесков, зарегистрированных на сегодня, составляет  $z \approx 8 - 9$  (см., например, Куккьяра и др., 2011; Танвир и др., 2018).

Анализ спектральной плотности потока послесвечения гамма-всплеска в инфракрасном и оптическом диапазонах длин волн позволяет определить визуальную экстинкцию  $A_V$  в родительской галактике. Около 30% послесвечений гамма-всплесков не имеют признаков поглощения в континууме в оптическом диапазоне длин волн,  $A_V \lesssim 0.1$ . В то же время около 25% гамма-всплесков являются “темными”, т.е. излучение в оптическом диапазоне длин волн испытывает сильное поглощение,  $A_V > 1$  (Ковино и др., 2013). Из анализа энергетического спектра послесвечения в рентгеновском диапазоне длин волн можно оценить лучевую концентрацию водорода  $N_{\text{HХ}}$ , через которую прошло излучение гамма-всплеска. Было обнаружено, что лучевые концентрации  $N_{\text{HХ}}$  могут на порядок и более превышать лучевые концентрации водорода  $N_{\text{H}}$ , вычисленные по данным в оптическом диапазоне длин волн — по линиям атомарного водорода, линиям ионов металлов или  $A_V$  (Уотсон и др., 2007; Кампана и др. 2010; Шади и др., 2011). Вопрос об источнике, вызывающем поглощение послесвечения гамма-всплеска в рентгеновском диапазоне длин волн — ионизованный или нейтральный газ, расположение в родительской галактике или в межгалактической среде — остается невыясненным (Шади, 2017; Дальтон, Моррис, 2020).

При анализе энергетического спектра послесвечения в рентгеновском диапазоне длин волн стандартно полагают, что поглощающий газ является нейтральным, имеет солнечную металличность и не испытывает эффектов ионизации от излучения гамма-всплеска (т.е. располагается в родительской галактике на большом расстоянии от источника гамма-всплеска). Исследования родительских галактик гамма-всплесков на красных смещениях  $z \lesssim 1$  указывают на то, что металличность газа в таких галактиках, как правило, меньше солнечной металличности (см., например, Вергани и др., 2015). Теоретические модели эволюции массивных звезд предсказывают, что для сохранения высокой скорости вращения звезды, а это необходимо для формирования массивного аккреционного диска и запуска ультрарелятивистского джета во время коллапса ядра звезды, металличность звезды должна быть меньше солнечной металличности,  $Z < 0.3Z_{\odot}$  (Вусли, Хегер, 2006). Кроме того, интенсивное гамма- и рентгеновское излучение всплеска может ионизовать межзвездный газ на расстоянии десяти парсек и больше

(см., например, Уотсон и др., 2013; Кронгольд, Прочаска, 2013; Нестеренок, 2024). Таким образом, предположения, которые делаются при оценке параметра  $N_{\text{HХ}}$  — солнечная металличность и невозмущенная межзвездная среда — могут не выполняться.

Задача взаимодействия излучения гамма-всплеска с межзвездным газом рассматривалась многими авторами (см., например, Перна и др., 2000; Дрейн, Хао, 2002; Перна, Лаззати, 2002; Барков, Бисноватый-Коган, 2005а,б). В нашей предыдущей работе построена модель прохождения излучения гамма-всплеска через плотное газопылевое облако (Нестеренок, 2024). Было показано, что газ полностью ионизируется излучением гамма-всплеска на расстоянии несколько парсек. При этом граница между полностью ионизованным газом и нейтральным газом, где степень ионизации много меньше единицы, является резкой. В работе Нетерёнка (2024) было показано, что в слое нейтрального газа, расположенного близко к фронту ионизации, ионы металлов имеют большой заряд вследствие ионизации рентгеновским излучением. Чем дальше от фронта ионизации, тем больше доля ионов с малым зарядом. Соответственно можно ожидать, что относительный вклад ионов металлов в поглощение излучения в рентгеновском диапазоне длин волн будет зависеть от лучевой концентрации водорода в газопылевом облаке. В этой работе исследуется влияние ионизационной структуры облака на поглощение послесвечения гамма-всплеска в рентгеновском диапазоне длин волн. Мы используем результаты численного моделирования для аппроксимации энергетических спектров послесвечений гамма-всплесков, полученных на рентгеновском телескопе XRT обсерватории Swift (Барроус и др., 2005).

## ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Подробное описание численной модели прохождения излучения гамма-всплеска через газопылевое облако представлено в работе Нестеренка (2024). В модели учитываются ионизация атомов H, He, ионизация ионов металлов с учетом испускания Оже-электронов, ионизация и фотодиссоциация молекул  $\text{H}_2$ , испарение частиц пыли, а также поглощение ультрафиолетового (УФ) излучения в линиях  $\text{H}_2$  полос Лаймана и Вернера. Далее кратко изложены основные детали численного моделирования, и указаны изменения, которые внесены в модель.

В численной модели облако располагается на некотором расстоянии  $R_{\text{min}}$  от звезды-прародителя гамма-всплеска. Для большей части численных расчетов, которые будут обсуждаться в этой статье, расстояние  $R_{\text{min}}$  выбрано равным 1 пк. В работе также обсуждаются результаты численного моделирования, в которых облако находится на расстоянии  $R_{\text{min}} = 10$  и 100 пк от звезды-прародителя гамма-всплеска. Дру-

**Таблица 1.** Распространенность химических элементов относительно ядер водорода (для солнечной металличности,  $[M/H] = 0$ )

|    |                       |    |                       |
|----|-----------------------|----|-----------------------|
| He | 0.0841                | Mg | $3.47 \times 10^{-5}$ |
| C  | $2.46 \times 10^{-4}$ | Si | $3.31 \times 10^{-5}$ |
| N  | $7.24 \times 10^{-5}$ | S  | $1.38 \times 10^{-5}$ |
| O  | $5.37 \times 10^{-4}$ | Fe | $2.82 \times 10^{-5}$ |
| Ne | $1.12 \times 10^{-4}$ |    |                       |

гим параметром модели является полная концентрация ядер водорода в облаке  $n_{\text{H,tot}}$  — концентрация атомов водорода в молекулярном, атомарном или ионизованном состоянии. Расчеты проводились для трех значений параметра  $n_{\text{H,tot}} = 10^2, 10^3, 10^4 \text{ см}^{-3}$ . Степень молекуляризации газа равна

$$f_{\text{H}_2} = \frac{2n_{\text{H}_2}}{n_{\text{H}} + 2n_{\text{H}_2}}. \quad (1)$$

В начальный момент газ нейтральный, степень молекуляризации газа  $f_{\text{H}_2}$  полагалась равной 0.1 или 1. В расчетах учитываются химические элементы H, He, C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Fe. Распространенности ионов металлов соответствуют распространенностям в Солнечной системе с поправкой на значение металличности  $[M/H] \equiv \log_{10}(Z/Z_{\odot})$ . Распространенность химических элементов в случае  $[M/H] = 0$  приведена в табл. 1 (Лоддерс, 2009; табл. 4 в их работе). В модели учитывается излучение оптической вспышки, активной фазы и послесвечения гамма-всплеска. Полная изотропная энергия излучения активной фазы равна  $E_{\gamma,\text{iso}} = 5 \times 10^{52}$  эрг, а энергия максимума энергетического спектра  $\nu F_{\nu}$  в собственной системе отсчета равна  $E_{\text{peak}} = 350$  кэВ. Эффективность излучения гамма-всплеска  $\eta$  (отношение энергии излучения активной фазы  $E_{\gamma,\text{iso}}$  к полной энергии взрыва) составляет 0.17 в нашей модели. Остальные параметры излучения гамма-всплеска приведены в работе Нестеренка (2024).

Плотность материала пыли выбрана равной  $\rho_d = 3.5 \text{ г/см}^3$ , а химический состав вещества пыли —  $\text{MgFeSiO}_4$ . Отношение масс, заключенных в пылевых частицах и в газе, определяется металличностью и долей металлов, заключенных в пыли. Доля ионов Fe, заключенных в пыли, выбрана равной 0.99. Атомы металлов, которые не входят в состав пылевых частиц, находятся в газовой фазе. Для металличности  $[M/H] = 0$ , отношение масс пыли и газа составляет 0.0036 в начальный момент. В отличие от работы Нестеренка (2024) в численном моделировании учитываются сечения поглощения и рассеяния света на частицах пыли для энергий фотонов  $h\nu < 12$  кэВ, рассчитанные в работе Дрейна (2003). Данные по сече-

ниям доступны на интернет-странице проф. Дрейна<sup>1</sup>. Рассеяние фотонов на частицах пыли не учитывается для энергий фотонов  $h\nu > 1$  кэВ (Дрейн, Хао, 2002). В нашей модели учитывается сублимация частиц пыли в результате нагрева оптическим и УФ-излучением гамма-всплеска, другие механизмы разрушения частиц пыли не рассматриваются (Дрейн, Хао, 2002; Лу и др., 2021).

Облако разбивается на сферические слои. Внутренний радиус слоя  $j$  равен  $R_j$ , а толщина  $\Delta R$  одинакова для всех слоев. Значение параметра  $\Delta R$  выбирается в диапазоне  $2.5 \times 10^{16} - 10^{17} \text{ см}$  в зависимости от плотности газа. Оптическая толщина на пыли для слоя  $\Delta R$  много меньше единицы. Последовательно для каждого слоя облака решается система дифференциальных уравнений для населенностей энергетических уровней молекулы  $\text{H}_2$ , концентраций ионов и химических соединений, для радиуса и температуры частиц пыли. Решение системы дифференциальных уравнений осуществляется с помощью численного кода SUNDIALS CVODE v5.7.0 (Хиндмарш и др., 2005; Гарднер и др., 2022). Результатом решения системы уравнений является зависимость физических величин от запаздывающего времени  $t_r$  для каждого слоя облака (момент времени  $t_r = 0$  соответствует моменту, когда фронт излучения гамма-всплеска доходит до слоя облака). В табл. 2 и 3 приведены параметры численных моделей. Модели 1, 2, 3 отличаются полной концентрацией ядер водорода в облаке. Дополнительные модели 4 и 5 отличаются от других моделей тем, что металличность газа в них принята равной  $[M/H] = -0.5$  и  $-1$  соответственно. В моделях 6 и 7 расстояние от облака до источника гамма-всплеска равно  $R_{\text{min}} = 10$  и  $100$  пк соответственно. При этом полагается, что излучение не испытывает никакого поглощения на расстоянии от источника всплеска до  $R_{\text{min}}$ .

Оптическая толщина, которую проходит излучение до внутренней границы слоя облака  $j$ , равна сумме вкладов в оптическую толщину всех слоев облака, предшествующих слою  $j$ :

$$\tau_{j-1}(E, t_r) = \sum_{i=1}^{j-1} \Delta\tau_i(E, t_r), \quad (2)$$

где  $E$  — энергия фотонов,  $t_r$  — момент запаздывающего времени, один и тот же для всех слоев облака. Результатом численного моделирования является двумерная таблица  $\tau(E, N_{\text{H,tot}})$  — оптическая толщина в зависимости от энергии фотонов  $E$  и от лучевой концентрации ядер водорода в облаке  $N_{\text{H,tot}}$ . Значение параметра  $N_{\text{H,tot}}$  на расстоянии  $R_j$  равно

$$N_{\text{H,tot}} = n_{\text{H,tot}}(R_j - R_{\text{min}}). \quad (3)$$

<sup>1</sup><https://www.astro.princeton.edu/~draine/dust/dust.diel.html>, файл callindex.out\_silD03

Таблица 2. Основные численные модели

| Модель                                                           | 1               | 2               | 3               |
|------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Расстояние от звезды-прародителя гамма-всплеска, $R_{\min}$ [пк] | 1               | 1               | 1               |
| Плотность газа, $n_{\text{H,tot}}$ [см <sup>-3</sup> ]           | 10 <sup>2</sup> | 10 <sup>3</sup> | 10 <sup>4</sup> |
| Степень молекуляризации, $f_{\text{H}_2}$                        | 0.1             | 1               | 1               |
| Металличность, $[M/H]$                                           | 0               | 0               | 0               |

Таблица 3. Дополнительные численные модели

| Модель                                                           | 4               | 5               | 6               | 7               |
|------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Расстояние от звезды-прародителя гамма-всплеска, $R_{\min}$ [пк] | 1               | 1               | 10              | 100             |
| Плотность газа, $n_{\text{H,tot}}$ [см <sup>-3</sup> ]           | 10 <sup>3</sup> | 10 <sup>3</sup> | 10 <sup>3</sup> | 10 <sup>3</sup> |
| Степень молекуляризации, $f_{\text{H}_2}$                        | 1               | 1               | 1               | 1               |
| Металличность, $[M/H]$                                           | -0.5            | -1              | 0               | 0               |

Шаг сетки по лучевой концентрации водорода равен лучевой концентрации водорода в одном слое облака:

$$\Delta N_{\text{H,tot}} = n_{\text{H,tot}} \Delta R. \quad (4)$$

В численном моделировании таблица  $\tau(E, N_{\text{H,tot}})$  сохраняется для значения запаздывающего времени  $t_r = 10^5$  с. Спектральная плотность потока излучения от источника равна

$$F(E, N_{\text{H,tot}}) = F_0(E) \exp(-\tau(E, N_{\text{H,tot}})), \quad (5)$$

где  $F(E, N_{\text{H,tot}})$  — мощность излучения в единицу телесного угла для энергий фотонов  $E$  после прохождения газопылевого облака.

Излучение гамма-всплеска обуславливает полную ионизацию газа вблизи источника. При этом граница между областью, где газ полностью ионизован, и областью, где газ преимущественно нейтрален, имеет размер  $\approx 0.05$  пк для плотности газа  $n_{\text{H,tot}} = 10^3$  см<sup>-3</sup> (Нестеренок, 2024). Так как слой полностью ионизованного газа почти не оказывает никаких эффектов на спектр послесвечения, мы переносим точку отсчета значений лучевой концентрации на границу ионизованный–нейтральный газ:

$$N_{\text{HX}} = N_{\text{H,tot}} - N_0, \quad (6)$$

где  $N_0$  — лучевая концентрация водорода полностью ионизованного слоя облака. Именно значения  $N_{\text{HX}}$  определяются из анализа энергетических спектров послесвечений гамма-всплесков. Значения  $\tau(E, N_{\text{HX}})$ , полученные в численных расчетах, записываются в виде двумерной таблицы в формате FITS<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>Для записи данных в формате FITS использовался код, который написан на языке программирования python. Код доступен по электронному адресу <https://github.com/mbursa/xspec-table-models> и распространяется под лицензией MIT.

## ОБРАБОТКА ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

В работах Цветковой и др. (2017, 2021) опубликованы каталоги гамма-всплесков с измеренным красным смещением, которые наблюдались гамма-спектрометром Конус, установленном на спутнике Wind (NASA). В работе Цветковой и др. (2017) опубликован каталог из 150 гамма-всплесков (из них 138 длинных гамма-всплесков), зарегистрированных в триггерном режиме в эксперименте Конус–Винд в период с 1997 по июнь 2016 г. В работе Цветковой и др. (2021) опубликован каталог из 167 гамма-всплесков (из них 160 длинных гамма-всплесков), зарегистрированных одновременно телескопом ВАТ космической обсерватории Swift и гамма-спектрометром Конус в режиме ожидания в период с 2005 по 2018 г. В каталогах Цветковой и др. (2017, 2021) приведены оценки полной изотропной энергии излучения активной фазы гамма-всплесков. Из обоих каталогов нами были выбраны 45 длинных гамма-всплесков, у которых полная изотропная энергия излучения  $E_{\gamma,\text{iso}}$  лежит в диапазоне от  $3.33 \times 10^{52}$  эрг до  $7.5 \times 10^{52}$  эрг — в 1.5 раза меньше и в 1.5 раза больше значения  $E_{\gamma,\text{iso}}$ , принятого в численном моделировании.

В нашей работе проводится анализ энергетических спектров послесвечений выбранных гамма-всплесков, которые были получены на рентгеновском телескопе XRT обсерватории Swift (Барроус и др., 2005). Энергетический диапазон телескопа Swift/XRT составляет 0.2–10 кэВ. Энергетические спектры гамма-всплесков построены в результате автообработки данных наблюдений командой Swift и доступны на сайте обсерватории<sup>3</sup> (Эванс и др., 2009). Для анализа мы взяли спектры, полученные в поздние моменты времени  $t \geq 4 \times 10^3$  с в режиме счета фотонов (режим PC). В этом случае среднее время прихо-

<sup>3</sup>[https://www.swift.ac.uk/xrt\\_spectra/](https://www.swift.ac.uk/xrt_spectra/)

да фотонов, как правило,  $t > 10^4$  с. Программа XSpec версии 12.13.1, входящая в пакет программ HEASoft<sup>4</sup>, использовалась для анализа энергетических спектров послесвечений гамма-всплесков (Арnaud, 1996; Дорман, Арnaud, 2001). Энергетические спектры аппроксимировались степенной функцией с учетом поглощения в межзвездной среде в родительской галактике на красном смещении  $z$  и в нашей Галактике. Аппроксимация спектров осуществлялась с помощью следующих составных моделей:

- 1) `tbabs * ztbabs * powerlaw`,
- 2) `tbabs * etable{model_name.fits} * powerlaw`, (7)

где `tbabs` и `ztbabs` — это модель поглощения излучения в межзвездной среде Тюбинген–Боулдер из работы Вилмса и др. (2000) на нулевом красном смещении и на заданном красном смещении  $z$  соответственно. Модель `etable{model_name.fits}` использует файл с расширением FITS, в котором записаны в виде таблицы результаты численного моделирования из нашей работы. Первый компонент в каждой из составных моделей в (7) отвечает за поглощение излучения межзвездным газом в нашей Галактике. Единственным параметром этой модели является лучевая концентрация водорода  $N_{\text{H,Gal}}$ . Значения  $N_{\text{H,Gal}}$  для каждого всплеска определялись с помощью онлайн-приложения на сайте обсерватории Swift<sup>5</sup> (Виллингейл и др., 2013). Второй компонент в каждой из составных моделей в (7) отвечает за поглощение излучения в родительской галактике на заданном красном смещении  $z$ . Последний компонент в моделях (7) задает степенной спектр излучения. Сечения фотоионизации ионов металлов используются из работ Вернера, Яковлева (1995) и Вернера и др. (1996). Распространенности химических элементов были приняты равными распространенностям элементов в фотосфере Солнца из работы Лоддерс и др. (2009) — этот выбор осуществляется с помощью команды `abund lprg` в XSpec. Также аппроксимация спектров осуществлялась с помощью моделей поглощения (на красном смещении родительской галактики), в которых металличность газа принималась равной  $[M/H] = -0.5$  и  $-1$ . Лучевая концентрация водорода  $N_{\text{H}}$  в родительской галактике на красном смещении  $z$ , показатель степени и нормировочный множитель энергетического спектра являются свободными параметрами. В аппроксимации спектров предполагалось, что сигнал от источника и фон подчиняются распределению Пуассона. Выбор этой статистики задается командой `statistic cstat` в программе XSpec. Ошибки параметров определялись с помощью команды `errgr`. Доверительные интервалы для параметров оценивались с помощью статистики  $\chi^2$ . Параметр `delta fit statistic` был вы-

бран равным 2.706, что соответствует уровню доверия 90%.

## МОДЕЛЬ ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЮБИНГЕН–БОУЛДЕР (TBABS)

Модель поглощения излучения из работы Вилмса и др. (2000) описывает поглощение рентгеновского излучения в межзвездной среде. В их модели предполагается, что поглощающий газ является нейтральным, степень молекуляризации газа  $f_{\text{H}_2}$  составляет 20%. Заметим, что отношение сечений фотоионизации  $\text{H}_2$  и  $\text{H}$  равно 2.95 для энергий фотонов  $E = 1$  кэВ. В модели поглощения Вилмса и др. (2000) учитываются химические элементы Na, Al, P, Cl, Ar, Ca, Ti, Cr, Mn, Co, Ni (дополнительно к тем, что рассматриваются в нашей модели). Вклад фотоионизации этих металлов в оптическую толщину, обусловленную фотоионизацией более распространенных ионов металлов (C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Fe), составляет около 3% для энергий фотонов 1 кэВ. Модель Вилмса и др. (2000) не учитывает процесс комптоновской ионизации  $\text{H}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{He}$ , который вносит основной вклад в оптическую толщину для энергий фотонов  $\geq 10$  кэВ. Однако оптическая толщина мала для таких энергий фотонов:  $\tau < 0.1$  для лучевых концентраций  $N_{\text{H}} < 10^{23} \text{ см}^{-2}$ . Еще одно отличие между моделью поглощения Вилмса и др. (2000) и нашей моделью заключается в том, что в нашей модели рассматривается химический состав пыли  $\text{MgSiFeO}_4$ . В то время как в модели Вилмса и др. (2000) гораздо больше элементов входят в состав пылевых частиц, при этом у каждого элемента свой фактор деплеции на пыли. Отношение масс, заключенных в пыли и в газе, равно 0.005 в модели Вилмса и др. (2000).

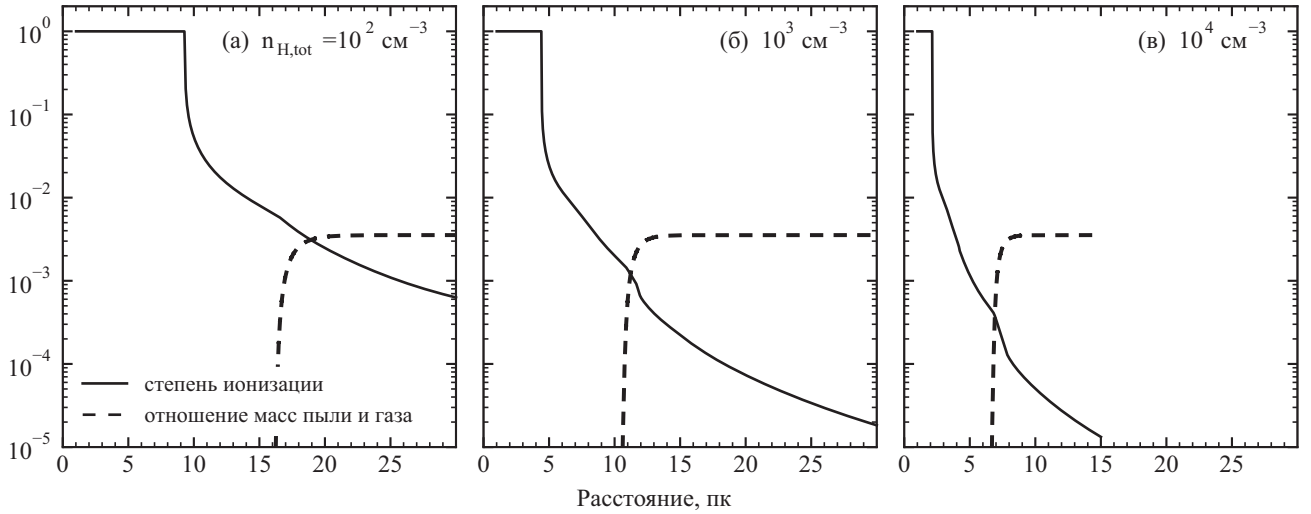
## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Ионизационная структура молекулярного облака

На рис. 1 показаны степень ионизации газа и отношение масс пыли и газа в зависимости от расстояния от звезды-прародителя гамма-всплеска (в один и тот же момент запаздывающего времени  $10^5$  с после начала гамма-всплеска). Представлены результаты расчетов для численных моделей 1, 2, 3, в которых полная концентрация ядер водорода полагалась равной  $n_{\text{H,tot}} = 10^2, 10^3$  и  $10^4 \text{ см}^{-3}$ , соответственно (см. табл. 2). Граница перехода между областью, где газ полностью ионизован, и областью, где газ преимущественно нейтрален, является резкой — степень ионизации падает от значения, близкого к 1, до значения порядка 0.1 на расстоянии (в единицах лучевой концентрации водорода)  $\sim 10^{20} \text{ см}^{-2}$ . Радиус испарения пыли  $R_d$  равен около 17, 11, и 7 пк для значений плотности газа  $n_{\text{H,tot}} = 10^2, 10^3$  и  $10^4 \text{ см}^{-3}$ , соответственно. Лучевая концентрация ядер водорода  $N_{\text{H}}$  от границы ионизованный–нейтральный газ

<sup>4</sup><https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/heasoft/>

<sup>5</sup><https://www.swift.ac.uk/analysis/nhtot/index.php>



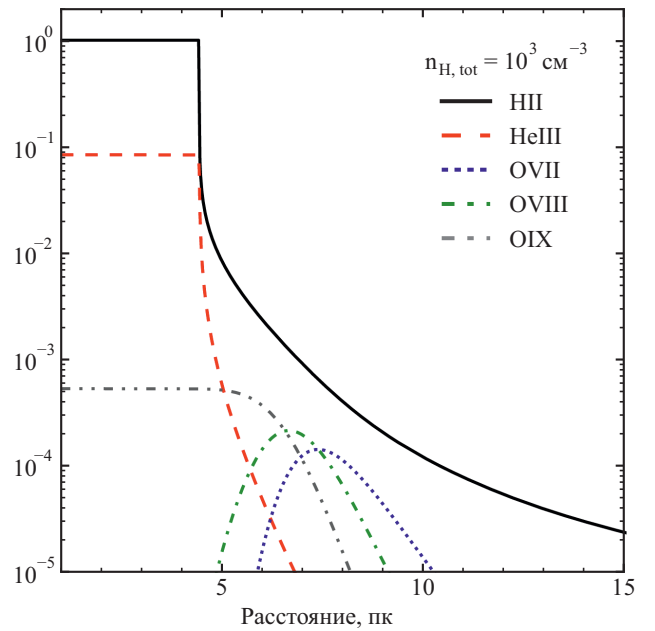
**Рис. 1.** Степень ионизации газа и отношение масс пыли и газа в зависимости от расстояния. Показаны результаты расчетов для трех моделей: (а) — модель 1, полная концентрация ядер водорода в облаке в этом случае равна  $n_{\text{H,tot}} = 10^2 \text{ см}^{-3}$ ; (б) — модель 2,  $n_{\text{H,tot}} = 10^3 \text{ см}^{-3}$ ; (в) — модель 3,  $n_{\text{H,tot}} = 10^4 \text{ см}^{-3}$ . Численное моделирование распространения излучения гамма-всплеска проводилось до расстояний 100, 30, и 15 пк в моделях 1, 2 и 3 соответственно.

до фронта испарения пыли равна  $0.25 \times 10^{22}$ ,  $2.2 \times 10^{22}$ ,  $16 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$  для трех рассматриваемых моделей, соответственно. На рис. 2 показаны распространения ионов в зависимости от расстояния от звезды-прародителя гамма-всплеска. Представлены результаты расчетов для численной модели 2 ( $n_{\text{H,tot}} = 10^3 \text{ см}^{-3}$ ). Резкое падение концентраций ионов водорода и гелия на расстоянии около 4.4 пк формирует границу ионизованный–нейтральный газ. Однако, для атомов металлов такой резкой границы нет — распространность ионов металлов с большим зарядом плавно уменьшается с расстоянием. Например, кислород находится в ультра-ионизованном состоянии (OVII–OIX) на расстоянии до 7–8 пк (рис. 2).

Лучевая концентрация ионов на заданном расстоянии от источника гамма-всплеска рассчитывается следующим образом (Нестеренок, 2024):

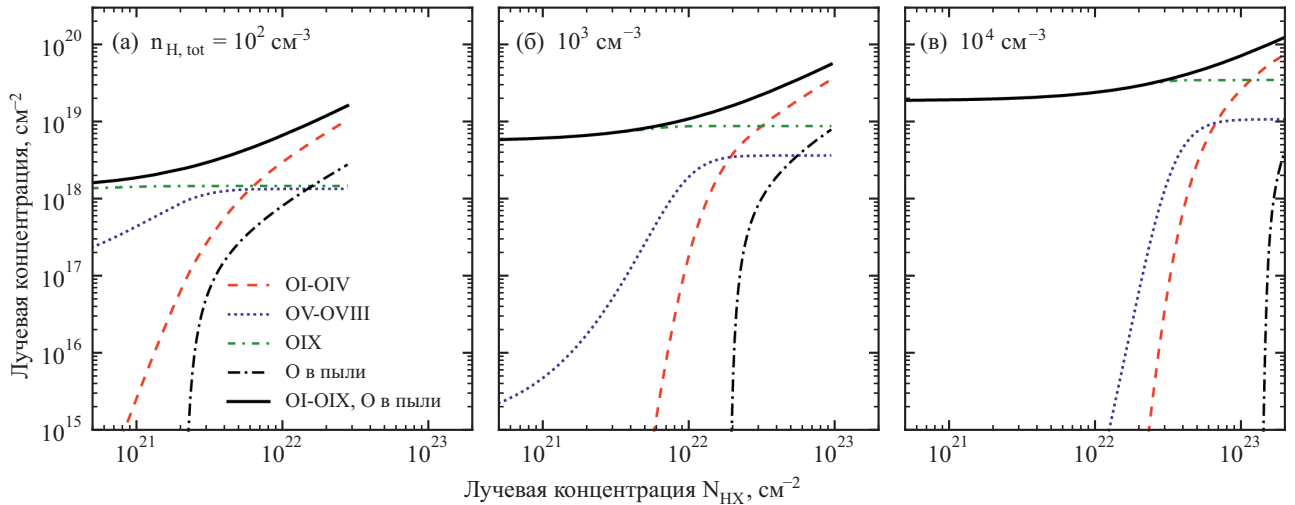
$$N_A(R_j) = \sum_{i=1}^{j-1} n_A^i(t_r) \Delta R, \quad (8)$$

где  $n_A^i$  — концентрация ионов  $A$  в слое облака  $i$  в один и тот же момент запаздывающего времени  $t_r$ ,  $R_j$  — внутренний радиус слоя облака  $j$ . Поглощение послесвечения гамма-всплеска в момент времени  $t_r$  после начала всплеска определяется лучевой концентрацией ионов  $N_A$ . Самым распространенным химическим элементом после водорода и гелия является кислород. На рис. 3 показана лучевая концентрация ионов кислорода в зависимости от параметра  $N_{\text{Hx}}$  в момент времени  $t_r = 10^5 \text{ с}$ . Основной вклад в поглощение излучения в рентгеновском диапазоне длин волн вносит фотоионизация внутренних электронных оболочек ионов металлов. Порог иони-



**Рис. 2.** Распространенности иона водорода, дважды ионизованного гелия и ионов кислорода с большим зарядом в зависимости от расстояния. Показаны результаты для модели 2, полная концентрация ядер водорода в облаке  $n_{\text{H,tot}} = 10^3 \text{ см}^{-3}$ .

зации электронной К-оболочки ионов кислорода равен 538 эВ для OI и 871 эВ для OVIII (Вернер, Яковлев, 1995). Сечение фотоионизации электронной К-оболочки OVIII приблизительно в 2 раза меньше сечения фотоионизации OI для энергий фотонов больше порога ионизации OVIII. В поглощение излучения



**Рис. 3.** Лучевая концентрация ионов кислорода в зависимости от параметра  $N_{\text{HX}}$  для моделей 1 (а), 2 (б) и 3 (в). Приведены результаты для группы ионов с низким зарядом OI–OIV, для группы ионов с большим зарядом OV–OVIII, для иона без электронов OIX, а также для атомов кислорода, заключенных в частицах пыли. Значение  $N_{\text{HX}} = 0$  соответствует границе ионизованный–нейтральный газ.

в рентгеновском диапазоне длин волн вносят вклад все ионы кислорода OI–OVIII. В случае концентрации ядер водорода в облаке  $n_{\text{H,tot}} = 10^2 \text{ см}^{-3}$  (рис. 3а), кислород полностью ионизован в приповерхностном слое за границей ионизованный–нейтральный газ, лучевая концентрация водорода этого слоя  $N_{\text{HX}} \approx 10^{20} \text{ см}^{-2}$ . В случае концентрации ядер водорода в облаке  $n_{\text{H,tot}} = 10^4 \text{ см}^{-3}$  (рис. 3в), лучевая концентрация нейтрального слоя облака, где кислород полностью ионизован гораздо больше —

$$N_{\text{HX}} \approx 2.5 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}.$$

В нейтральном слое облака, где ионы металлов находятся в ультра-ионизованном состоянии, основной вклад в поглощение излучения в рентгеновском диапазоне длин волн вносят атомы гелия, атомы и молекулы водорода.

#### Результаты расчетов $N_{\text{HX}}$

Аппроксимация энергетических спектров послесвечений 45 длинных гамма-всплесков осуществлялась в программе XSpes с помощью двух составных моделей (7). Для 18 гамма-всплесков аппроксимация спектров дает либо верхние пределы на параметр  $N_{\text{HX}}$ , либо ошибка в определении  $N_{\text{HX}}$  равна наиболее вероятному значению этой величины. Далее результаты для этих гамма-всплесков не приводятся. Для остальных 27 гамма-всплесков значения рассчитанных лучевых концентраций  $N_{\text{HX}}$  приведены в табл. 4 и показаны на рис. 4. На рис. 4 по оси абсцисс отложены значения лучевой концентрации водорода  $N_{\text{HX,tbabs}}$ , вычисленные с помощью модели tbabs — первая составная модель в (7). По оси ординат отложены значения  $N_{\text{HX}}$ , полученные с помощью второй составной

модели в (7). В этой модели используются результаты численного моделирования данной работы (численные модели 1, 2 и 3 из табл. 2). Для полной концентрации ядер водорода  $n_{\text{H,tot}} = 10^2 \text{ см}^{-3}$  (рис. 4а), отличие между моделями существенно только для гамма-всплесков с малыми значениями  $N_{\text{HX}} \leq 3 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ . В этом случае, разность значений лучевой концентрации водорода, полученных с помощью двух моделей, меньше ошибок определения этого параметра.

Для полной концентрации ядер водорода  $n_{\text{H,tot}} = 10^4 \text{ см}^{-3}$  (рис. 4в), лучевые концентрации  $N_{\text{HX}}$ , полученные на основе результатов численного моделирования, значительно превышают  $N_{\text{HX,tbabs}}$ . Среднее отношение лучевых концентраций  $N_{\text{HX,tbabs}}/N_{\text{HX}}$  равно около 0.3 для  $N_{\text{HX,tbabs}} \leq 2 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ . Это отношение  $N_{\text{HX,tbabs}}/N_{\text{HX}}$  приблизительно равно вкладу атомов гелия и молекул водорода в поглощение излучения в рентгеновском диапазоне длин волн в невозмущенном межзвездном газе — около 0.25 для энергий фотонов  $E = 1 \text{ кэВ}$ . Согласно нашим расчетам, ионы металлов находятся в ультра-ионизованном состоянии за границей ионизованный–нейтральный газ, и не вносят заметный вклад в поглощение излучения, см. рис. 3в. В то время как модель tbabs не учитывает ионизацию металлов, и описывает поглощение излучения в невозмущенном межзвездном газе (Вилмс и др., 2000). При заданной лучевой концентрации водорода в облаке, газ располагается ближе к источнику излучения при больших плотностях газа в облаке. Поэтому эффект ионизации металлов на поглощение излучения более выражен для больших плотностей газа в облаке (см. рис. 4в).

Таблица 4. Результаты аппроксимации спектров послесвечений гамма-всплесков

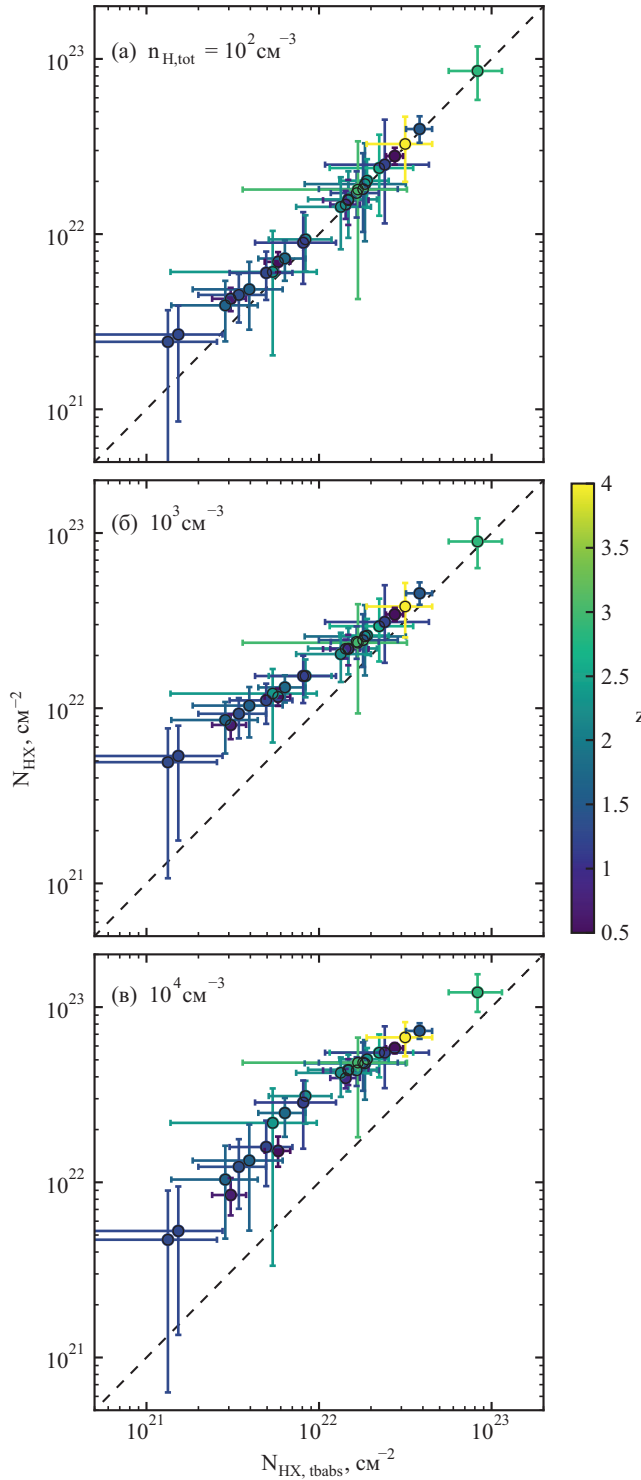
| гамма-всплеск | красное<br>смещение, $z$ | $N_{\text{НХ}}, \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ |                        |                        |                        |
|---------------|--------------------------|-------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|               |                          | tbabs                                           | модель 1               | модель 2               | модель 3               |
| 050802        | 1.71                     | $0.29^{+0.16}_{-0.15}$                          | $0.39^{+0.15}_{-0.15}$ | $0.86^{+0.23}_{-0.31}$ | $1.0^{+0.6}_{-0.6}$    |
| 060111A       | 2.32                     | $1.5^{+0.7}_{-0.6}$                             | $1.6^{+0.7}_{-0.6}$    | $2.2^{+0.7}_{-0.6}$    | $4.4^{+1.0}_{-1.1}$    |
| 060306        | 1.55                     | $3.8^{+0.7}_{-0.6}$                             | $4.0^{+0.7}_{-0.7}$    | $4.5^{+0.7}_{-0.6}$    | $7.3^{+0.8}_{-0.7}$    |
| 060908        | 1.88                     | $1.9^{+1.3}_{-1.0}$                             | $1.9^{+1.4}_{-1.0}$    | $2.6^{+1.3}_{-1.0}$    | $4.8^{+1.7}_{-1.8}$    |
| 071021        | 2.45                     | $1.9^{+0.6}_{-0.6}$                             | $2.0^{+0.7}_{-0.6}$    | $2.6^{+0.6}_{-0.6}$    | $5.0^{+0.8}_{-0.8}$    |
| 071117        | 1.33                     | $1.7^{+0.6}_{-0.5}$                             | $1.7^{+0.6}_{-0.5}$    | $2.4^{+0.5}_{-0.5}$    | $4.4^{+0.8}_{-0.8}$    |
| 080210        | 2.64                     | $2.2^{+1.3}_{-1.1}$                             | $2.4^{+1.3}_{-1.1}$    | $2.9^{+1.3}_{-1.1}$    | $5.5^{+1.5}_{-1.5}$    |
| 080310        | 2.43                     | $0.5^{+0.4}_{-0.4}$                             | $0.6^{+0.4}_{-0.4}$    | $1.2^{+0.5}_{-0.6}$    | $2.2^{+1.3}_{-1.9}$    |
| 080805        | 1.50                     | $1.8^{+1.1}_{-0.8}$                             | $1.8^{+1.1}_{-0.8}$    | $2.5^{+1.0}_{-0.7}$    | $4.8^{+1.5}_{-1.5}$    |
| 080928        | 1.69                     | $0.39^{+0.22}_{-0.21}$                          | $0.48^{+0.21}_{-0.20}$ | $1.0^{+0.3}_{-0.4}$    | $1.3^{+0.8}_{-0.8}$    |
| 081109A       | 0.98                     | $1.4^{+0.3}_{-0.3}$                             | $1.5^{+0.3}_{-0.3}$    | $2.2^{+0.3}_{-0.3}$    | $3.9^{+0.5}_{-0.5}$    |
| 090424        | 0.54                     | $0.58^{+0.10}_{-0.10}$                          | $0.70^{+0.10}_{-0.09}$ | $1.16^{+0.13}_{-0.13}$ | $1.5^{+0.3}_{-0.3}$    |
| 090926B       | 1.24                     | $2.4^{+1.9}_{-1.3}$                             | $2.5^{+2.0}_{-1.3}$    | $3.1^{+1.9}_{-1.3}$    | $5.5^{+2.3}_{-2.1}$    |
| 091109A       | 3.08                     | $1.68^{+1.6}_{-1.3}$                            | $1.8^{+1.6}_{-1.4}$    | $2.4^{+1.6}_{-1.4}$    | $4.8^{+1.9}_{-3.0}$    |
| 100621A       | 0.54                     | $2.75^{+0.3}_{-0.3}$                            | $2.8^{+0.3}_{-0.3}$    | $3.4^{+0.3}_{-0.3}$    | $5.8^{+0.4}_{-0.4}$    |
| 100901A       | 1.41                     | $0.34^{+0.15}_{-0.14}$                          | $0.45^{+0.14}_{-0.14}$ | $0.93^{+0.21}_{-0.26}$ | $1.2^{+0.5}_{-0.5}$    |
| 110715A       | 0.82                     | $1.5^{+0.5}_{-0.4}$                             | $1.6^{+0.5}_{-0.4}$    | $2.2^{+0.5}_{-0.4}$    | $4.4^{+0.7}_{-0.8}$    |
| 120118B       | 2.94                     | $8^{+3}_{-3}$                                   | $9^{+3}_{-3}$          | $9^{+3}_{-3}$          | $12^{+3}_{-3}$         |
| 120326A       | 1.80                     | $0.63^{+0.20}_{-0.19}$                          | $0.73^{+0.20}_{-0.18}$ | $1.31^{+0.23}_{-0.24}$ | $2.5^{+0.5}_{-0.7}$    |
| 121024A       | 2.30                     | $1.3^{+0.7}_{-0.6}$                             | $1.4^{+0.7}_{-0.6}$    | $2.0^{+0.7}_{-0.6}$    | $4.2^{+1.0}_{-1.1}$    |
| 130420A       | 1.30                     | $0.49^{+0.21}_{-0.19}$                          | $0.6^{+0.19}_{-0.18}$  | $1.1^{+0.3}_{-0.3}$    | $1.6^{+0.7}_{-0.6}$    |
| 140512A       | 0.72                     | $0.31^{+0.07}_{-0.07}$                          | $0.43^{+0.07}_{-0.06}$ | $0.80^{+0.12}_{-0.14}$ | $0.85^{+0.21}_{-0.20}$ |
| 140629A       | 2.28                     | $0.8^{+0.4}_{-0.3}$                             | $0.9^{+0.4}_{-0.3}$    | $1.5^{+0.4}_{-0.4}$    | $3.1^{+0.7}_{-1.0}$    |
| 140907A       | 1.21                     | $0.8^{+0.4}_{-0.4}$                             | $0.9^{+0.4}_{-0.4}$    | $1.5^{+0.5}_{-0.5}$    | $2.9^{+1.0}_{-1.3}$    |
| 150910A       | 1.36                     | $0.13^{+0.12}_{-0.12}$                          | $0.24^{+0.13}_{-0.20}$ | $0.5^{+0.3}_{-0.4}$    | $0.5^{+0.4}_{-0.4}$    |
| 151112A       | 4.1                      | $3.2^{+1.4}_{-1.3}$                             | $3.3^{+1.4}_{-1.3}$    | $3.8^{+1.4}_{-1.3}$    | $6.7^{+1.5}_{-1.5}$    |
| 170604A       | 1.33                     | $0.15^{+0.12}_{-0.12}$                          | $0.27^{+0.12}_{-0.18}$ | $0.5^{+0.3}_{-0.4}$    | $0.5^{+0.4}_{-0.4}$    |

**Примечание.** Гамма-всплески 071117, 090424, 100621A, 110715A, 140512A входят в состав каталога Цветковой и др. (2017), остальные гамма-всплески — в состав каталога Цветковой и др. (2021).

*Результаты расчетов  $N_{\text{НХ}}$  для металличности газа*  
 $[M/H] = -0.5, -1$

На рис. 5 представлены результаты аппроксимации энергетических спектров послесвечений 27 гамма-всплесков из табл. 4. В аппроксимации использовались модели на основе результатов наших расчетов (численные модели 4 и 5 из табл. 3),

и модель поглощения tbabs. Металличность газа в родительской галактике полагалась равной  $[M/H] = -0.5$  (рис. 5а) и  $-1$  (рис. 5б). Для металличности  $[M/H] = -0.5$ , отличие между значениями  $N_{\text{НХ}}$  и  $N_{\text{НХ,tbabs}}$ , полученными с помощью двух моделей (7), сравнимо с ошибками измерений этого параметра (см. рис. 5а). Для металличности



**Рис. 4.** Значения лучевой концентрации водорода, вычисленные в результате аппроксимации спектров 27 гамма-всплесков из табл. 4. По оси абсцисс отложены значения  $N_{\text{HX}, \text{tbabs}}$ , полученные при аппроксимации спектров с использованием модели *tbabs* — первая составная модель в (7). По оси ординат — значения  $N_{\text{HX}}$ , которые рассчитывались на основе второй составной модели в (7), т.е. с использованием результатов численного моделирования данной работы. Графики (а), (б), (в) соответствуют численным моделям 1, 2 и 3 из табл. 2. Цветовой шкалой обозначено красное смещение гамма-всплесков.

$[M/H] = -1$  ионы металлов вносят малый вклад в поглощение излучения в рентгеновском диапазоне длин волн (Нестерёнок, 2024). Это приводит к тому, что учет ионизационной структуры облака не оказывает эффекта на вычисления значений лучевой концентрации водорода  $N_{\text{HX}}$ . В этом случае обе модели поглощения дают близкие значения лучевой концентрации водорода (см. рис. 5б).

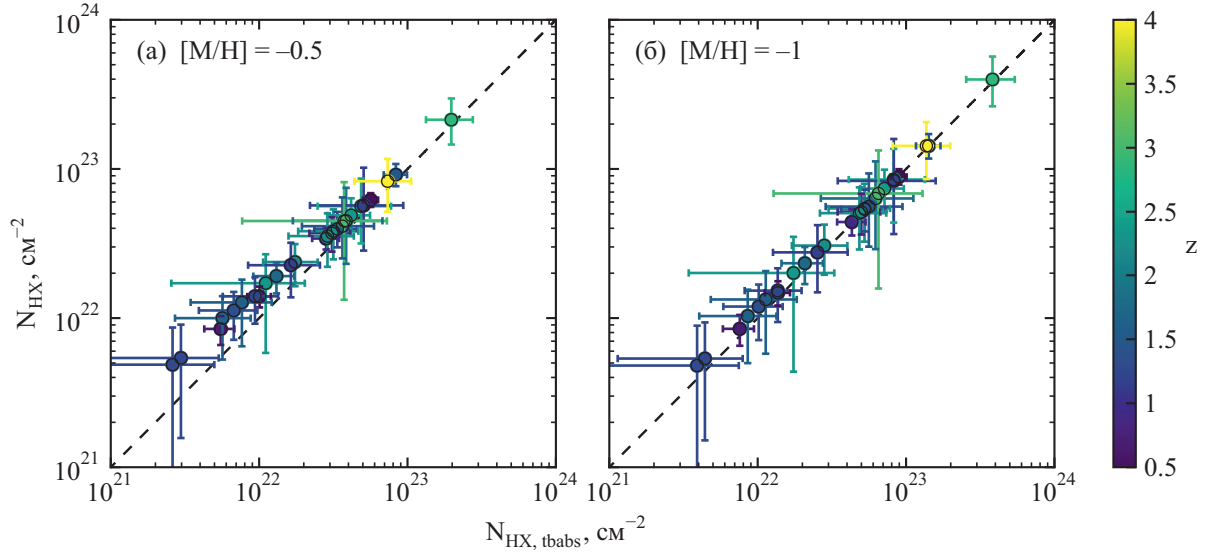
*Результаты расчетов  $N_{\text{HX}}$  для расстояний от источника гамма-всплеска до облака  $R_{\text{min}} = 10, 100$  пк*

В этом разделе представлены результаты аппроксимации энергетических спектров послесвечений гамма-всплесков с использованием результатов численного моделирования, в котором расстояние от источника всплеска до облака полагалось равным  $R_{\text{min}} = 10$  и 100 пк (численные модели 6 и 7 из табл. 3). Результаты расчетов лучевой концентрации водорода  $N_{\text{HX}}$  представлены на рис. 6. Металличность газа в моделях поглощения излучения — в моделях, основанных на результатах численного моделирования, и в модели *tbabs* — полагалась равной солнечной металличности. С увеличением расстояния от источника гамма-всплеска, уменьшается слой газа за фронтом ионизации, в котором ионы металлов находятся в ультра-ионизованном состоянии. Уже при  $R_{\text{min}} = 10$  пк, отличие между значениями  $N_{\text{HX}}$  и  $N_{\text{HX}, \text{tbabs}}$  сравнимо с ошибками измерений этого параметра.

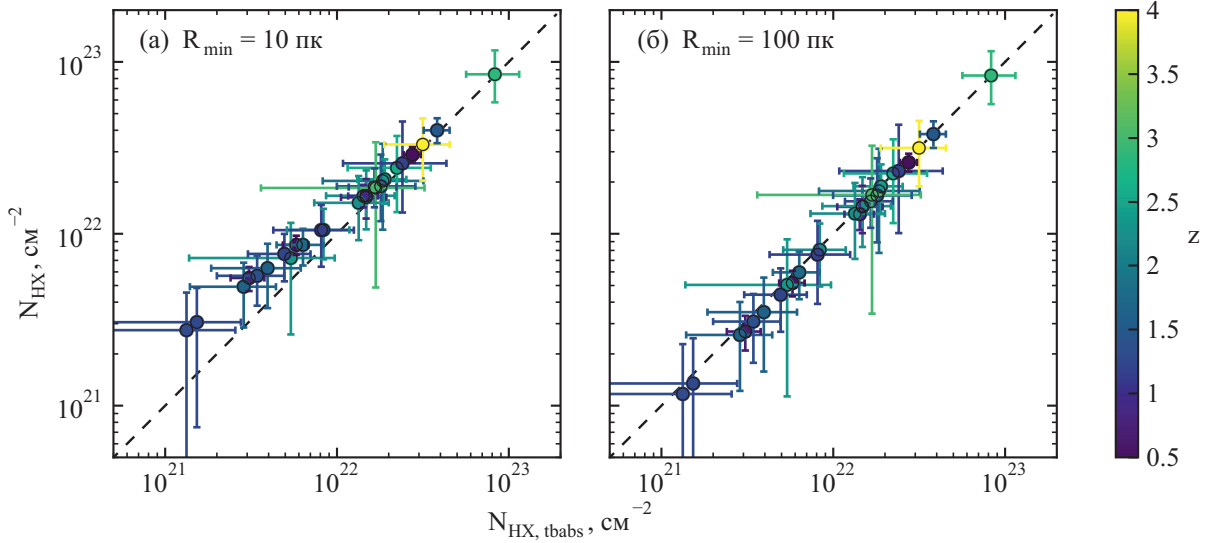
## ОБСУЖДЕНИЕ

### *Металличность газа в родительских галактиках гамма-всплесков*

Гамма-всплески на небольших красных смещениях  $z < 1$ , как правило, рождаются в тусклых, маломассивных галактиках (см., например, Вергани и др., 2015). С увеличением красного смещения, доля гамма-всплесков в массивных галактиках с высокой общей скоростью звездообразования возрастает (Грейнер и др., 2015; Перли и др., 2016). Этот наблюдательный факт рассматривается как следствие подавления удельной скорости образования гамма-всплесков для металличности межзвездной среды выше некоторого предельного значения (Крулер, 2018). Металличность газа в галактике может быть оценена из наблюдений эмиссионных линий ионов металлов. Оценки предельного значения металличности из наблюдений родительских галактик гамма-всплесков дают  $(0.5 - 1) \times Z_{\odot}$  (Перли и др., 2016; Граам, Фручтер, 2017; Вергани и др., 2017; Пальмерио и др., 2019). Металличность газа в родительской галактике гамма-всплеска также может быть определена из анализа абсорбционных линий ионов металлов в послесвечении. Такой способ дает среднее значение металличности газа  $Z \sim 0.1 Z_{\odot}$  в родительских галактиках гамма-всплесков на красном смещении  $z = 3.5 - 6$  (Куккья-



**Рис. 5.** Значения лучевой концентрации водорода, полученные в результате аппроксимации спектров гамма-всплесков. По оси абсцисс отложены значения  $N_{\text{HX,tbabs}}$ , полученные с помощью модели поглощения tbabs. По оси ординат отложены значения  $N_{\text{HX}}$ , полученные на основе результатов численного моделирования (численные модели 4 и 5 из табл. 3). На графике (а) показаны результаты для металличности газа в родительской галактике  $[M/H] = -0.5$ , на графике (б) — для металличности  $[M/H] = -1$ .



**Рис. 6.** Значения лучевой концентрации водорода, полученные в результате аппроксимации спектров гамма-всплесков. По оси ординат отложены значения  $N_{\text{HX}}$ , вычисленные на основе результатов численного моделирования: (а) — результаты расчетов, в которых расстояние между источником всплеска и облаком  $R_{\text{min}} = 10$  пк, (б) — результаты расчетов, в которых  $R_{\text{min}} = 100$  пк (численные модели 6 и 7 из табл. 3). Металличность газа равна солнечной металличности,  $[M/H] = 0$ .

ра и др., 2015). Этот метод, как правило, дает меньшие оценки металличности газа, чем это следует из анализа эмиссионных линий родительских галактик гамма-всплесков (Граам и др., 2023). Необходимо заметить, что металличность газа в той части галактики, где произошел гамма-всплеск, может отличаться от среднего значения металличности газа в галактике (например, Крулер и др., 2017).

Для гамма-всплесков на небольших красных смещениях ( $z \lesssim 1$ ) металличность газа в родительской галактике может быть близка к солнечной металличности. В случае, если плотное молекулярное облако находится близко от источника гамма-всплеска, ионы металлов ионизируются до большого заряда в нейтральном слое облака за фронтом ионизации. Лучевая концентрация водорода этого пограничного слоя за-

висит от плотности газа в облаке и составляет  $N_{\text{HХ}} \approx 3 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$  для плотности газа  $n_{\text{H,tot}} = 10^4 \text{ см}^{-3}$ . В этом слое облака ионы металлов не вносят заметный вклад в поглощение излучения в рентгеновском диапазоне длин волн даже для солнечной металличности. Поглощение излучения происходит в результате фотоионизации атомов гелия и атомов (молекул) водорода. В этом случае, модель поглощения, которая не учитывает ионизацию ионов металлов, предсказывает значение  $N_{\text{HХ}}$  в 3 раза меньше, чем действительное значение (см. рис. 4). В то же время, для металличности газа  $[M/H] = -1$  модель поглощения, основанная на численных расчетах, и модель tbabs дают одинаковые оценки лучевой концентрации водорода в поглощающем слое газа (см. рис. 5).

#### *Наблюдение изменения $N_{\text{HХ}}$ для некоторых гамма-всплесков*

Излучение гамма-всплеска ионизует газ, расположенный вблизи источника всплеска. Как результат, излучение послесвечения, испущенное в поздние моменты времени, встретит на своем пути меньше поглощающего газа, чем излучение в более ранние моменты времени. В случае плотного компактного облака, это изменение лучевой концентрации поглощающего слоя можно наблюдать, анализируя изменение во времени энергетических спектров послесвечения (Лаззати, Перна, 2002; Валан и др., 2023). В работе Валана и др. (2023) проведено исследование изменения лучевой концентрации ядер водорода  $N_{\text{HХ}}$  для 199 гамма-всплесков с измеренным спектроскопическим красным смещением. Валан и др. (2023) анализировали данные телескопа Swift/XRT, полученные на ранней стадии послесвечения в режиме WT (в моменты времени  $t < 200$  с в собственной системе отсчета). Согласно результатам Валана и др. (2023), из 199 гамма-всплесков только 7 всплесков имеют признаки уменьшения лучевой концентрации  $N_{\text{HХ}}$ . Один гамма-всплеск из этого списка попадает в нашу выборку — GRB 090926В на красном смещении  $z = 1.24$ . Модель tbabs предсказывает, что лучевая концентрация ядер водорода в поглощающем облаке равна  $2.4 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$  (для солнечного значения металличности). В то время как модель, основанная на результатах численного моделирования, предсказывает значение  $5.5 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$  для плотности газа в облаке  $n_{\text{H,tot}} = 10^4 \text{ см}^{-3}$  (см. табл. 4). Заметим, что гамма-всплеск GRB 090926В относится к темным всплескам, визуальная экстинкция для этого всплеска равна  $A_V = 1.42^{+1.08}_{-0.57}$  (Грейнер и др., 2011). Большая часть гамма-всплесков не имеет признаков уменьшения  $N_{\text{HХ}}$  на ранней стадии послесвечения согласно результатам Валана и др. (2023). Это может быть следствием того, что газ, поглощающий излучение, не расположен компактно вблизи источника гамма-всплеска, а находится на расстоянии, или

распределен в обширной области в родительской галактике.

#### *Поглощение излучения послесвечения в оптическом диапазоне длин волн*

Детектирование излучения послесвечения в инфракрасном и оптическом диапазонах длин волн, наряду с излучением в рентгеновском диапазоне, дает возможность совместного фитирования оптического и рентгеновского энергетических спектров (Грейнер и др., 2011; Ковино и др., 2013). Значения лучевой концентрации водорода, которые следуют из оценок  $A_V$ , как правило, на порядок меньше, чем значения  $N_{\text{HХ}}$ , т.е. поглощение излучения в рентгеновском диапазоне длин волн гораздо сильнее. В таких оценках, как правило, принимают солнечное значение металличности, а параметры пыли соответствуют местной группе галактик. Если излучение гамма-всплеска проходит через плотное молекулярное облако, радиус испарения частиц пыли в 2–3 раза больше радиуса фронта ионизации (рис. 1). Характерное время испарения пылинок составляет около 3–5 с от начала гамма-всплеска в нашей модели (нагрев и сублимация частиц пыли происходит УФ-излучением оптической вспышки гамма-всплеска). Атомы металлов высвобождаются из пыли в газовую фазу, и ионизируются до большого заряда последующим излучением всплеска. Таким образом, одной из причин относительно слабого поглощения излучения в континууме в оптическом диапазоне может быть испарение частиц пыли.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты численного моделирования распространения излучения гамма-всплеска в плотном молекулярном облаке для различных плотностей газа, металличности, расстояний от звезды-прародителя гамма-всплеска до облака. Если облако находится близко от звезды-прародителя гамма-всплеска,  $R_{\text{min}} = 1$  пк, ионы металлов ионизируются до большого заряда в слое облака за фронтом ионизации. Для плотности газа  $n_{\text{H,tot}} = 10^4 \text{ см}^{-3}$ , лучевая концентрация водорода этого слоя облака составляет  $N_{\text{HХ}} \approx 3 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ . Для таких лучевых концентраций ядер водорода в облаке, основной вклад в поглощение послесвечения в рентгеновском диапазоне длин волн вносит ионизация атомов гелия, атомов и молекул водорода — независимо от значения металличности газа.

В работе рассмотрена выборка из 45 длинных гамма-всплесков с известным красным смещением, у которых полная изотропная энергия гамма-излучения  $E_{\gamma,\text{iso}}$  лежит в диапазоне от  $3.33 \times 10^{52}$  до  $7.5 \times 10^{52}$  эрг. Для этих гамма-всплесков проведен анализ энергетических спектров послесвечений, полученных на телескопе Swift/XRT в поздние момен-

ты времени,  $t \geq 4 \times 10^3$  с. Аппроксимация энергетических спектров проводилась с использованием численной модели поглощения излучения, которая учитывает ионизацию газа излучением гамма-всплеска, а также с помощью модели поглощения tbabs (Вилмс и др., 2000). Показано, что аппроксимация энергетических спектров с помощью модели tbabs может привести к значениям лучевой концентрации ядер водорода, которые меньше действительных значений приблизительно в 3 раза — в случае, если газопылевое облако, которое поглощает излучение, находится вблизи источника гамма-всплеска. В частности, для гамма-всплеска GRB 090926B модель поглощения tbabs предсказывает значение лучевой концентрации ядер водорода  $2.4 \times 10^{22}$  см $^{-2}$ . В то время как модель, основанная на результатах нашего численного моделирования, предсказывает значение  $5.5 \times 10^{22}$  см $^{-2}$  для плотности газа в облаке  $n_{\text{H,tot}} = 10^4$  см $^{-3}$ .

Если молекулярное облако располагается на расстоянии  $R_{\text{min}} > 10$  пк от источника гамма-всплеска или металличность газа  $[M/H] = -1$ , модель поглощения, основанная на результатах численного моделирования, и модель tbabs предсказывают одинаковые значения лучевой концентрации водорода. Результаты работы необходимо учитывать в анализе энергетических спектров гамма-всплесков, излучение которых прошло через плотный слой газа вблизи звезды-прародителя гамма-всплеска — например, в случае, если наблюдается уменьшение лучевой концентрации  $N_{\text{Hx}}$ .

### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность Дмитрию Свинкину за помощь в обработке наблюдательных данных.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арnaud (K.A. Arnaud), *Astronomical Data Analysis Software and Systems V*, ASP Conf. Ser. 101 (Ed. G.H. Jacoby, J. Barnes, 1996), p. 17.
2. Барков М.В., Бисноватый-Коган Г.С., *Астрон. журн.* **82**, 29 (2005a) [M.V. Barkov and G.S. Bisnovatyi-Kogan, *Astron. Rep.* **49**, 24 (2005a)].
3. Барков М.В., Бисноватый-Коган Г.С., *Астрон. журн.* **82**, 685 (2005b) [M.V. Barkov and G.S. Bisnovatyi-Kogan, *Astron. Rep.* **49**, 611 (2005b)].
4. Барроус и др. (D.N. Burrows, J.E. Hill, J.A. Nousek, J.A. Kennea, A. Wells, J.P. Osborne, A.F. Abbey, A. Beardmore, et al.), *Space Sci. Rev.* **120**, 165 (2005).
5. Боццо и др. (E. Bozzo, L. Amati, W. Baumgartner, T.-C. Chang, B. Cordier, N. De Angelis, A. Doi, M. Feroci, et al.), *Universe* **10**, 187 (2024).
6. Валан и др. (V. Valan, J. Larsson, and B. Ahlgren), *Astrophys. J.* **944**, 73 (2023).
7. Вергани и др. (S.D. Vergani, R. Salvaterra, J. Japelj, E. Le Floch, P. D'Avanzo, A. Fernandez-Soto, T. Kruhler, A. Melandri, et al.), *Astron. Astrophys.* **581**, A102 (2015).

8. Вергани и др. (S.D. Vergani, J. Palmerio, R. Salvaterra, J. Japelj, F. Mannucci, D.A. Perley, P. D'Avanzo, T. Kruhler, et al.), *Astron. Astrophys.* **599**, A120 (2017).
9. Вернер, Яковлев (D.A. Verner and D.G. Yakovlev), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **109**, 125 (1995).
10. Вернер и др. (D.A. Verner, G.J. Ferland, K.T. Korista, and D.G. Yakovlev), *Astrophys. J.* **465**, 487 (1996).
11. Виллингейл и др. (R. Willingale, R.L.C. Starling, A.P. Beardmore, N.R. Tanvir, and P.T. O'Brien), *MNRAS* **431**, 394 (2013).
12. Вилмс и др. (J. Wilms, A. Allen, and R. McCray), *Astrophys. J.* **542**, 914 (2000).
13. Вусли, Хереп (S.E. Woosley and A. Heger), *Astrophys. J.* **637**, 914 (2006).
14. Гарднер и др. (D.J. Gardner, D.R. Reynolds, C.S. Woodward, and C.J. Balos), *ACM Transactions on Math. Software* **48**, 31 (2022).
15. Голдштейн и др. (A. Goldstein, V. Connaughton, M.S. Briggs, and E. Burns) *Astrophys. J.* **818**, 18 (2016).
16. Голдштейн и др. (A. Goldstein, P. Veres, E. Burns, M.S. Briggs, R. Hamburg, D. Kocevski, C.A. Wilson-Hodge, R.D. Preece, et al.), *Astrophys. J. (Lett.)* **848**, L14 (2017).
17. Граам, Фручтер (J.F. Graham and A.S. Fruchter), *Astrophys. J.* **834**, 170 (2017).
18. Граам и др. (J.F. Graham, P. Schady, and A.S. Fruchter), *Astrophys. J.* **954**, 13 (2023).
19. Грейнер и др. (J. Greiner, T. Kruhler, S. Klose, P. Afonso, C. Clemens, R. Filgas, D.H. Hartmann, A.K. Yoldas, et al.), *Astron. Astrophys.* **526**, A30 (2011).
20. Грейнер и др. (J. Greiner, D.B. Fox, P. Schady, T. Kruhler, M. Trenti, A. Cikota, J. Bolmer, J. Elliott, et al.), *Astrophys. J.* **809**, 76 (2015).
21. Дальтон, Моррис (T. Dalton and S.L. Morris), *MNRAS* **495**, 2342 (2020).
22. Дорман, Арnaud (B. Dorman, and K.A. Arnaud), *Astronomical Data Analysis Software and Systems X*, ASP Conf. Ser. 238 (Ed. F.R. Harnden Jr., F.A. Primini, H.E. Payne, 2001), p. 415.
23. Дрейн (B.T. Draine), *Astrophys. J.* **598**, 1026 (2003).
24. Дрейн, Хао (B.T. Draine and L. Hao), *Astrophys. J.* **569**, 780 (2002).
25. Кампана и др. (S. Campana, C.C. Thone, A. de Ugarte Postigo, G. Tagliaferri, A. Moretti, and S. Covino), *MNRAS* **402**, 2429 (2010).
26. Ковино и др. (S. Covino, A. Melandri, R. Salvaterra, S. Campana, S.D. Vergani, M.G. Bernardini, P. D'Avanzo, V. D'Elia, et al.), *MNRAS* **432**, 1231 (2013).
27. Коста и др. (E. Costa, F. Frontera, J. Heise, M. Feroci, J. in't Zand, F. Fiore, M.N. Cinti, D. Dal Fiume, et al.), *Nature* **387**, 783 (1997).
28. Кронгольд, Прочаска (Y. Krongold and J.X. Prochaska), *Astrophys. J.* **774**, 115 (2013).
29. Крулер и др. (T. Kruhler, H. Kuncarayakti, P. Schady, J.P. Anderson, L. Galbany, and J. Gensior), *Astron. Astrophys.* **602**, A85 (2017).
30. Крулер (T. Kruhler), *Inter. J. Modern Phys. D* **27**, 1842001 (2018).

31. Куккьяра и др. (A. Cucchiara, A.J. Levan, D.B. Fox, N.R. Tanvir, T.N. Ukwatta, E. Berger, T. Kruhlér, A.K. Yoldas, et al.), *Astrophys. J.* **736**, 7 (2011).
32. Куккьяра и др. (A. Cucchiara, M. Fumagalli, M. Rafelski, D. Kocevski, J.X. Prochaska, R.J. Cooke, and G.D. Becker), *Astrophys. J.* **804**, 51 (2015).
33. Кулкарни и др. (S.R. Kulkarni, S.G. Djorgovski, A.N. Ramaprakash, R. Goodrich, J.S. Bloom, K.L. Adelberger, T. Kundic, L. Lubin, et al.), *Nature* **393**, 35 (1998).
34. Лаззати, Перна (D. Lazzati and R. Perna), *MNRAS* **330**, 383 (2002).
35. Леван и др. (A.J. Levan, B.P. Gompertz, O.S. Salafia, M. Bulla, E. Burns, K. Hotokezaka, L. Izzo, G.P. Lamb, et al.), *Nature* **626**, 737 (2024).
36. Лоддерс и др. (K. Lodders, H. Palme, H.-P. Gail), *Solar System, Landolt-Bornstein — Group VI Astronomy and Astrophysics, V. 4B* (Ed. J.E. Trumper, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009), p. 712.
37. Лу и др. (W. Lu, C.F. McKee, and K.P. Mooley), *MNRAS* **507**, 3672 (2021).
38. Метцгер и др. (M.R. Metzger, S.G. Djorgovski, S.R. Kulkarni, C.C. Steidel, K.L. Adelberger, D.A. Frail, E. Costa, and F. Frontera), *Nature* **387**, 878 (1997).
39. Нестеренок А.В., Письма в Астрон. журн. **50**, 117 (2024) [A.V. Nesterenok, *Astron. Lett.* **50**, 99 (2024)].
40. Пальмерио и др. (J.T. Palmerio, S.D. Vergani, R. Salvaterra, R.L. Sanders, J. Japelj, A. Vidal-Garcia, P. D'Avanzo, D. Corre, et al.), *Astron. Astrophys.* **623**, A26 (2019).
41. ван Парадийс и др. (J. van Paradijs, P.J. Groot, T. Galama, C. Kouveliotou, R.G. Strom, J. Telting, R.G.M. Rutten, G.J. Fishman, et al.), *Nature* **386**, 686 (1997).
42. Перли и др. (D.A. Perley, N.R. Tanvir, J. Hjorth, T. Laskar, E. Berger, R. Chary, A. de Ugarte Postigo, J.P.U. Fynbo, et al.), *Astrophys. J.* **817**, 8 (2016).
43. Перна и др. (R. Perna, J. Raymond, and A. Loeb), *Astrophys. J.* **533**, 658 (2000).
44. Перна, Лаззати (R. Perna and D. Lazzati), *Astrophys. J.* **580**, 261 (2002).
45. Позаненко А.С., Барков М.В., Минаев П.Ю., Вольнова А.А., Письма в Астрон. журн. **47**, 823 (2021) [A.S. Pozanenko, M.V. Barkov, P.Yu. Minaev, A.A. Volnova, *Astron. Lett.* **47**, 791 (2021)].
46. Танвир и др. (N.R. Tanvir, T. Laskar, A.J. Levan, D.A. Perley, J. Zabl, J.P.U. Fynbo, J. Rhoads, S.B. Cenko, et al.), *Astrophys. J.* **865**, 107 (2018).
47. Троха и др. (E. Troja, C.L. Fryer, B. O'Connor, G. Ryan, S. Dichiaro, A. Kumar, N. Ito, R. Gupta, et al.), *Nature* **612**, 228 (2022).
48. Уотсон и др. (D. Watson, J. Hjorth, J.P.U. Fynbo, P. Jakobsson, S. Foley, J. Sollerman, and R.A.M.J. Wijers), *Astrophys. J. (Lett.)* **660**, L101 (2007).
49. Уотсон и др. (D. Watson, T. Zafar, A.C. Andersen, J.P.U. Fynbo, J. Gorosabel, J. Hjorth, P. Jakobsson, T. Kruhlér, et al.), *Astrophys. J.* **768**, 23 (2013).
50. Хиндмарш и др. (A.C. Hindmarsh, P.N. Brown, K.E. Grant, S.L. Lee, R. Serban, D.E. Shumaker, and C.S. Woodward), *ACM Transactions on Math. Software* **31**, 363 (2005).
51. Цветкова и др. (A. Tsvetkova, D. Frederiks, S. Golenetskii, A. Lysenko, P. Oleynik, V. Pal'shin, D. Svinkin, M. Ulanov, et al.), *Astrophys. J.* **850**, 161 (2017).
52. Цветкова и др. (A. Tsvetkova, D. Frederiks, D. Svinkin, R. Aptekar, T.L. Cline, S. Golenetskii, K. Hurley, A. Lysenko, et al.), *Astrophys. J.* **908**, 83 (2021).
53. Шади и др. (P. Schady, S. Savaglio, T. Kruhlér, J. Greiner, and A. Rau), *Astron. Astrophys.* **525**, A113 (2011).
54. Шади (P. Schady), *Royal Soc. Open Sci.* **4**, 170304 (2017).
55. Эванс и др. (P.A. Evans, A.P. Beardmore, K.L. Page, J.P. Osborne, P.T. O'Brien, R. Willingale, R.L.C. Starling, D.N. Burrows, et al.), *MNRAS* **397**, 1177 (2009).