

ИСТОЧНИКИ ШУМА ПУТАНИЦЫ В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

© 2021 г. А. А. Ермаш^{1,*}, С. В. Пилипенко^{1,**}, Е. В. Михеева^{1,***}, В. Н. Лукаш^{1,****}

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, Москва, Россия

*E-mail: aermash@asc.rssi.ru

**E-mail: spilipenko@asc.rssi.ru

***E-mail: helen@asc.rssi.ru

****E-mail: lukash@asc.rssi.ru

Поступила в редакцию 14.07.2021 г.

После доработки 20.09.2021 г.

Принята к публикации 28.09.2021 г.

В рамках созданной ранее авторами модели внегалактического фона исследованы факторы, влияющие на статистические свойства шума путаницы. Показано, что 1) учет крупномасштабной структуры Вселенной является важным фактором; 2) гравитационное линзирование не оказывает существенного влияния на величину шума путаницы; 3) минимальное красное смещение объектов, создающих шум путаницы, не зависит от длины волны и составляет $z_{\min} \sim 0.5-0.6$, максимальное красное смещение при переходе от 70 до 2000 мкм плавно изменяется от ~ 4 до ~ 3 ; 4) на коротких длинах волн (≈ 70 мкм) в шум путаницы основной вклад вносят галактики со светимостями в диапазоне $(10^7-10^9)L_{\odot}$, на больших длинах волн (650–2000 мкм) — с $L \geq 10^{10}L_{\odot}$; 5) рассмотрен вклад в шум путаницы объектов с различными цветовыми показателями; 6) переменность внегалактического фона, создаваемая активными галактическими ядрами, во временном масштабе от 1 дня до года является заметной на коротких длинах волн (70–350 мкм) и проявляется для плотностей потока $\lesssim 1$ мкЯн.

Ключевые слова: инфракрасный фон, субмиллиметровые галактики, активные ядра галактик

DOI: 10.31857/S0004629922010042

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучению фонового излучения в ИК диапазоне (CIB — Cosmic Infrared Background), создаваемому неразрешенными галактиками, посвящено большое количество работ. Этот фон имеет значительные флуктуации на угловых масштабах от секунд до минут дуги, что приводит к возникновению *путаницы*, которая состоит в том, что отдельные источники сложно выделить на сильно флуктуирующем фоне.

Оценка шума путаницы крайне важна при формировании наблюдательной стратегии будущих экспериментов. При этом наличие многочастотных наблюдений дает возможность использовать для разрешения шума путаницы на отдельные источники несколько различных методов (см., напр., [1–3]). Отдельного упоминания заслуживает подход, заключающийся в анализе разностных карт фона, что позволяет выделять заранее заданный класс объектов с пекулярными цветовыми показателями (см., напр., [4, 5]).

Ранее нами была создана модель внегалактического фона (см. [6]), дано детальное описание модели и выполнено сравнение ее результатов с предсказаниями других моделей и наблюдательными данными по следующим параметрам: 1) дифференциальные подсчеты источников; 2) изменение подсчетов источников с красным смещением; 3) полный частотный спектр фона; 4) предсказания шума путаницы для космической обсерватории “Миллиметрон” и телескопа “Herschel”.

Данная статья является результатом дальнейших исследований. В частности, для последующего развития методов выделения и анализа слабых источников с учетом путаницы необходимо выяснить, галактики в каком диапазоне красных смещений, светимостей и показателей цвета вносят наибольший вклад в путаницу. Интересный пример успешной попытки извлечь объекты слабее шума путаницы при помощи информации на ряде длин волн можно найти в работе [7]. Для дальнейшей оптимизации модели необходимо было понять, оказывают ли крупномасштабная структура Вселенной и гравитационное линзиро-

вание влияние на оценки шума путаницы. Важно также исследовать степень переменности внегалактического фона. Данная задача является критичной для оценки перспективности наблюдений астрономических транзиентов и малых тел солнечной системы.

В настоящее время к моделированию фонового излучения сложилось два основных подхода. Один из них, феноменологический, построен на использовании оценок функции светимости и модельного спектра отдельных галактик (см., напр., [8]). Его также называют “методом обратной эволюции”, поскольку за основу взято распределение светимости близких галактик, эволюционирующее “обратно во времени”, т.е. с ростом красного смещения z . Параметры такой эволюции определяются путем фитирования наблюдательных данных — подсчетов числа источников, оценок функций светимости, распределения источников излучения по z и т.д. Преимуществом этого подхода является достаточно точное описание наблюдательных данных, однако основанные на нем модели не обладают предсказательной силой: с их помощью нельзя предсказать значения параметров в тех диапазонах длин волн и для тех красных смещений, где наблюдательные данные отсутствуют. С моделями, основанными на феноменологическом подходе, можно ознакомиться, например, в работах [9–11].

Второй подход, полуаналитический, предполагает использование численного моделирования распределения темной материи во Вселенной. В рамках этого подхода модельному гравитационно-связанному гало, состоящему из частиц темной материи, ставится в соответствие галактика с определенным набором параметров. Далее, каждой галактике в соответствии с ее свойствами приписывается определенный спектр, что, в свою очередь, позволяет провести последующий анализ — выполнить подсчеты числа источников, рассчитать спектр фонового излучения и интересующий нас шум путаницы. Моделям, основанным на этом подходе, посвящены работы [12–17]. Следует отметить, что подобная бинарная классификация является упрощенной, и существует целый ряд моделей, сочетающих оба подхода. Наша модель, представленная в [6], относится к классу полуаналитических моделей, основанных на численном расчете крупномасштабной структуры Вселенной.

Поскольку эффект путаницы важен при анализе наблюдений, его адекватное моделирование является, во многом, залогом успеха работы планируемых космических обсерваторий, к числу которых относится находящийся в стадии активной разработки “Миллиметрон”¹. Запуск КА за-

планирован на 2029 г. Платформа с 10-метровым охлаждаемым зеркалом будет двигаться по гало-орбите в окрестности точки Лагранжа L2 системы Солнце–Земля. Более детальное описание обсерватории можно найти на сайте проекта и в работах [18–20].

Среди научного оборудования на платформе планируется разместить два спектрометра низкого разрешения — коротковолновый матричный спектрометр (КМС) с четырьмя полосами чувствительности, центрированными на 70, 110, 250, 350 мкм, и длинноволновый матричный спектрометр (ДМС) с полосами чувствительности на 650, 850, 1100 и 2000 мкм. КМС будет состоять из двух основных частей — матричного фотометра, работающего во всем рабочем диапазоне частот, но разделенного на несколько поддиапазонов при помощи дихроических делителей луча, и матричного спектрометра, спектральное разрешение которого будет определяться входным фильтром. Подобная структура спектрометра использовалась в приемнике PACS, размещенном на космической обсерватории “Herschel”; ДМС структурно аналогичен приемнику SPIRE, который, как и PACS, успешно отработал в составе космической обсерватории “Herschel”².

2. МОДЕЛЬ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКОГО ФОНА

Модель была основана на результатах полуаналитической модели формирования и эволюции галактик eGalICS [16, 17] и является развитием идей, заложенных в работе [21]. Для модельных галактик при помощи кода GRASIL [22] была создана библиотека энергетических спектров дисковых и балджевых компонентов, и каждому балджу и диску галактики в симуляции был поставлен в соответствие некоторый спектр. Для активных галактических ядер (АГЯ) был использован спектр АГЯ первого типа из работы [23]. Далее были учтены эффекты гравитационного линзирования, рассчитанные в приближении точечной линзы. На завершающем этапе из кубических объемов симуляции был построен модельный конус и проанализированы свойства полученного модельного обзора.

Одним из основных результатов анализа стали карты внегалактического фона на разных длинах волн, соответствующих рабочим диапазонам спектрометров телескопа “Миллиметрон”. На рис. 1 показан пример такой карты на длине волны 850 мкм, линейный размер изображения соответствует угловым размерам $10' \times 10'$. Очевидно, на карте присутствует множество близко расположенных объектов, и ее разрешение на отдельные источники представляет собой значительную

¹ <http://millimetron.ru>

² <http://www.cosmos.esa.int/web/herschel/science-instruments>

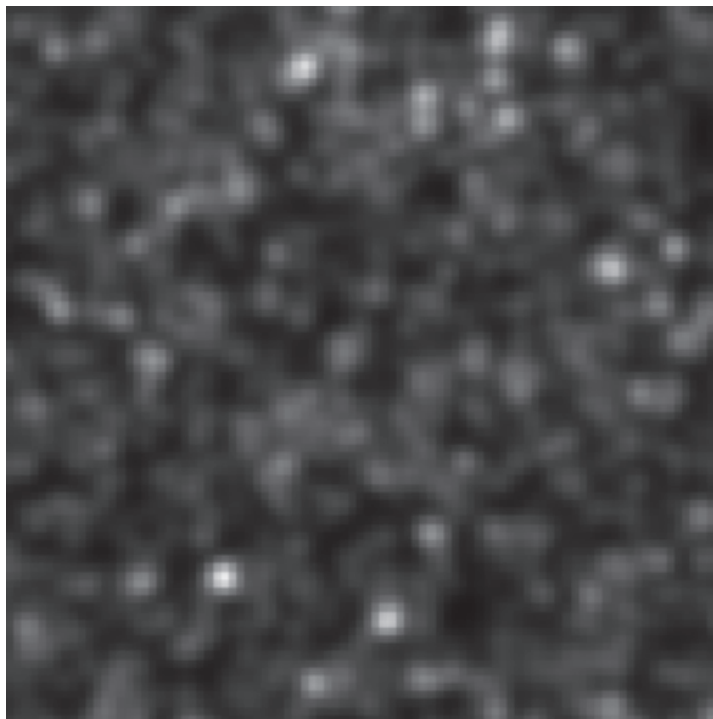


Рис. 1. Модельная карта внегалактического фона на длине волны 850 мкм, рассчитанная для телескопа с диаметром главного зеркала 10 м. Линейный размер рисунка соответствует масштабу $10' \times 10'$.

трудность. Проблема выделения источников из карты является настолько существенной, что в [24] было предложено ввести новый термин — “субмиллиметровый источник” — и использовать его вместо словосочетания “субмиллиметровая галактика” для описания наблюдаемых объектов на данных длинах волн.

В настоящее время сложилось несколько методов оценки шума путаницы. В части из них используется только информация о кривой подсчетов источников, другие основаны на анализе карт. В простейшем случае шум путаницы можно определять как дисперсию σ значения потока в отдельных пикселях, как это было сделано, например, в статье [25]. С другой стороны, как было ранее показано в работах [26–28], распределение потока в пикселях не всегда является гауссовым и может принимать, например, форму, приведенную на рис. 2. Поэтому в ряде работ (см., напр., [27]) было предложено определять шум путаницы как значение дисперсии гауссианы, полученной фитированием только левой стороны пиксельной гистограммы. Такое определение позволяет исключить влияние разрешенных ярких объектов, вносящих на модельной карте значительный вклад в интегральный поток.

Однако для использования данного метода оценки в нашем случае существует определенное препятствие. Оно связано с тем, что при построении карты со срезом по параметру, например z ,

пиксельная гистограмма может отличаться от гауссианы и в левой своей части. В этом случае значение σ сильно зависит от выбора участка гистограммы, по которой проводится фитирование. Поэтому в качестве значения шума путаницы мы использовали величину полуширины на уровне половины максимума интенсивности (FWHM) левой стороны пиксельной гистограммы. В том случае, когда четко выраженное значение максимума отсутствует, оценка шума путаницы не проводилась. Численные оценки шума путаницы для спектрометров космической обсерватории “Миллиметрон” приведены в табл. 1.

Как можно видеть, для обычных модельных карт, у которых форма левой стороны совпадает с гауссианой, оценки шума путаницы, определенные как дисперсия распределения (σ) и как полуширина распределения на уровне половины максимума интенсивности (FWHM/2.355), практически совпадают. Погрешности получены как стандартное отклонение (1σ) для 10 тестовых реализаций модельного конуса.

3. ВЛИЯНИЕ КРУПНОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЫ И ГРАВИТАЦИОННОГО ЛИНЗИРОВАНИЯ

При создании модельных карт из кубов космологических симуляций возникает так называемый “эффект перспективы”. Он вызван тем, что

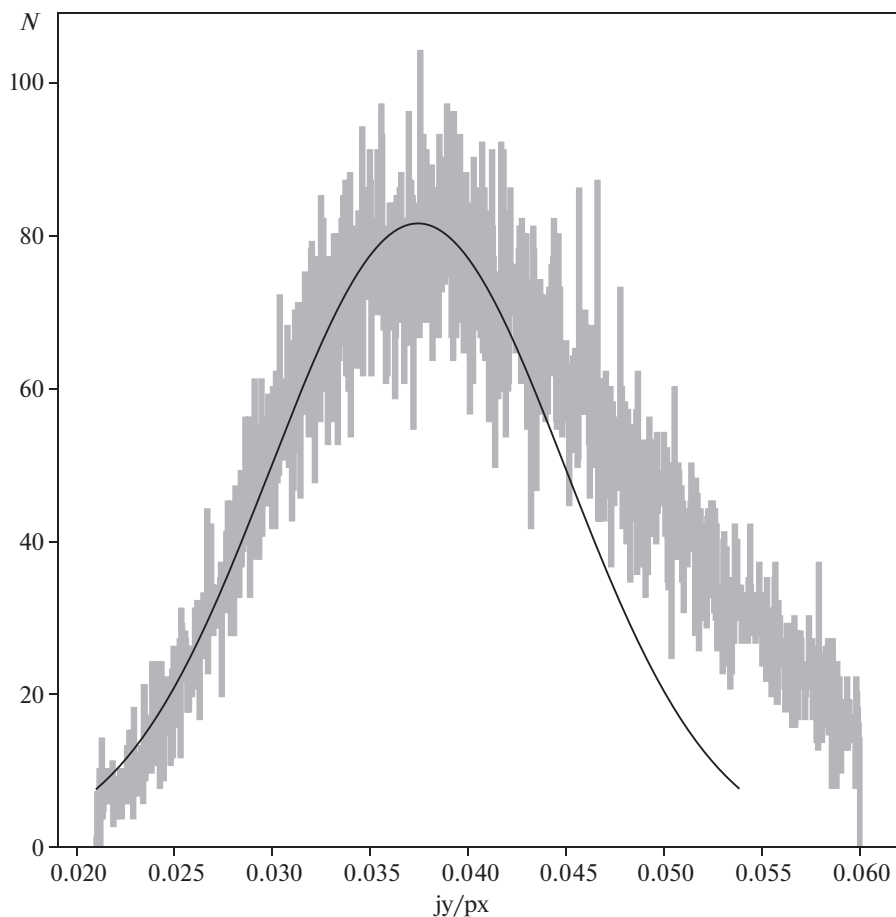


Рис. 2. Пиксельная гистограмма модельной карты внегалактического фона на длине волны 2000 мкм. По оси абсцисс отложено значение потока в пикселе, по оси ординат — количество пикселей с данным потоком. Серым цветом показано распределение пикселей, полученное в модельной карте, черной линией — распределение Гаусса, фитированное для левой (относительно максимума) стороны пиксельной гистограммы.

крупномасштабная структура Вселенной эволюционирует медленно, и при сборе конуса симуляции из кубов одни и те же элементы попадают на луч зрения несколько раз.

Существует несколько методов решения данной проблемы. Если для решения поставленной задачи достаточно модельных карт сравнительно небольшой площади, то можно задать угол луча зрения так, чтобы он проходил через куб один раз. Такой подход был успешно реализован, к примеру, в [21]. Другой вариант решения данной проблемы — поворот каждого куба случайно на 10 градусов по двум координатным осям [29].

Еще один способ устранить эффект перспективы был предложен в [30] и состоял в следующем: каждый куб симуляции случайно подвергался одному из следующих преобразований: сдвигу на произвольную величину вдоль одной из осей, повороту на угол, кратный 90 градусам или зеркальному отражению. Мы применяли именно этот подход, который доказал свою адекватность в устранении проблемы повторяющихся структур на модельных картах.

Для понимания источников шума путаницы важно ответить на вопрос, как влияет на величину шума сам факт наличия крупномасштабной структуры. Для этого, помимо ранее выполненных оценок шума путаницы для модельных карт,

Таблица 1. Значения шума путаницы для спектрометров космической обсерватории “Миллиметрон”

λ , мкм	Шум путаницы	
	σ , мЯн	FWHM/2.355, мЯн
70	$(2.51 \pm 0.07) \times 10^{-5}$	$(2.79 \pm 0.08) \times 10^{-5}$
110	$(2.40 \pm 0.07) \times 10^{-4}$	$(2.68 \pm 0.08) \times 10^{-4}$
250	$(9.69 \pm 0.48) \times 10^{-3}$	$(1.07 \pm 0.05) \times 10^{-2}$
350	$(4.44 \pm 0.46) \times 10^{-2}$	$(4.88 \pm 0.53) \times 10^{-2}$
650	$(3.26 \pm 0.17) \times 10^{-1}$	$(3.59 \pm 0.20) \times 10^{-1}$
850	$(2.99 \pm 0.15) \times 10^{-1}$	$(3.21 \pm 0.18) \times 10^{-1}$
1100	$(2.19 \pm 0.07) \times 10^{-1}$	$(2.34 \pm 0.08) \times 10^{-1}$
2000	$(7.95 \pm 0.44) \times 10^{-2}$	$(8.19 \pm 0.53) \times 10^{-2}$

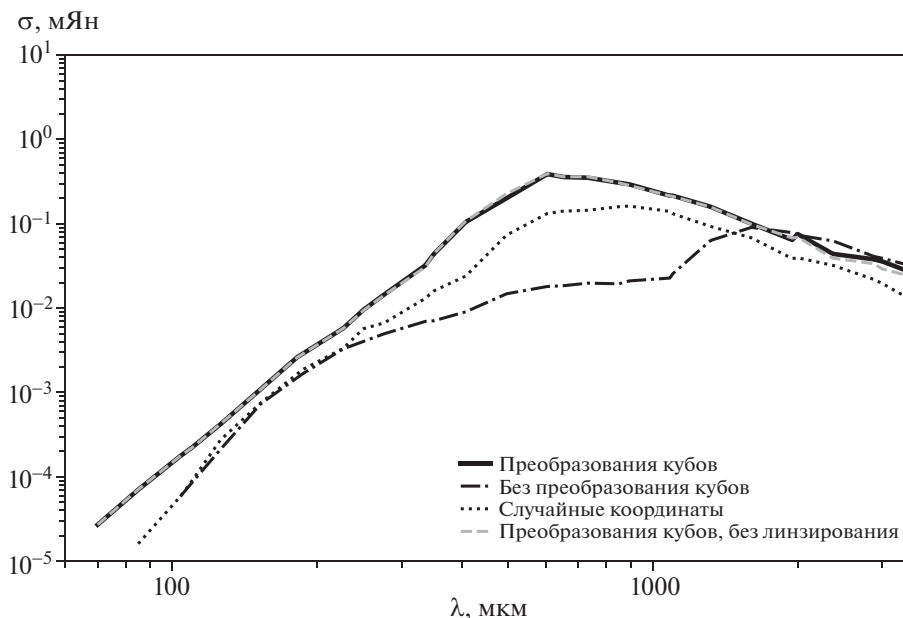


Рис. 3. Влияние крупномасштабной структуры Вселенной на шум путаницы на разных длинах волн. По оси абсцисс отложена длина волны, выраженная в микронах, по оси ординат — значение шума путаницы, выраженное в мЯн. Черной сплошной линией обозначена величина, полученная для карт с учетом коррекции эффекта перспективы, черной штрихпунктирной линией — без коррекции эффекта перспективы, пунктирной черной линией — для модельного конуса с искусственно убранной крупномасштабной структурой, серой штриховой линией обозначена кривая шума путаницы с коррекцией эффекта перспективы, но без учета линзирования.

мы оценили шум путаницы для карт, созданных без коррекции на эффект перспективы. Также для сравнения были построены модельные карты на основе кубов симуляции, где координаты каждого объекта были установлены случайным образом в пределах одного куба, что нивелирует крупномасштабную структуру Вселенной. Полученные результаты иллюстрирует рис. 3.

Характерный размер ячеек структуры (расстояние между крупными стенками) порядка 100 Мпк, что соответствует удвоенной корреляционной длине поля возмущения начальных скоростей материи [31].

Рассмотрим подробнее проблему влияния крупномасштабной структуры Вселенной на шум путаницы. Толстая черная линия на рис. 3 (частично перекрытая серой штриховой) показывает оценки шума путаницы, полученные после учета эффекта перспективы при помощи преобразований кубов симуляции. Черная штрихпунктирная линия отображает оценки, полученные без применения преобразований к кубам симуляции. Расхождение, как видно, достигает существенных значений. Также нами был создан модельный конус, в котором в каждом кубе объектам присваивались случайные координаты. Результат оценки шума путаницы для данного случая показан пунктирной линией. Форма кривой, в целом, соответствует случаю с преобразованиями кубов, однако, лежит значительно ниже (примерно на полпорядка). Следует подчеркнуть, что подсчеты

источников во всех трех случаях идентичны, откуда следует вывод, что для корректной оценки шума путаницы критично важно учитывать влияние крупномасштабной структуры.

Рисунок 3 характеризует лишь одну реализацию карты размером $10' \times 10'$. Для оценки влияния описанных выше эффектов в зависимости от угла обзора нами были произведены следующие расчеты. Большая модельная карта в один квадратный градус разбивалась на 4, 9, 16 и т.д. квадратных участков, в каждом из которых оценивался шум путаницы. Погрешность, вносимая размером поля, оценивалась как дисперсия ряда значений, полученных на частях карты. Очевидный ожидаемый результат состоит в том, что значение будет оставаться неизменным в пределах погрешностей, сами ошибки будут возрастать. Полученные зависимости приведены на рис. 4. Зависимость для случая без линзирования мы не приводим ввиду схожести графиков. На левой панели показаны зависимости для модели с крупномасштабной структурой, на правой — со случайными координатами объектов. Видно, что на малых углах обзора дисперсия оценки для первого случая значительно выше, что объясняется наличием областей различной плотности на малых угловых масштабах. Особенно это заметно для двух самых коротких полос (70 и 110 мкм). Это в очередной раз не только подтверждает необходимость учета крупномасштабной структуры, но и тот факт, что при построении модельных карт не-

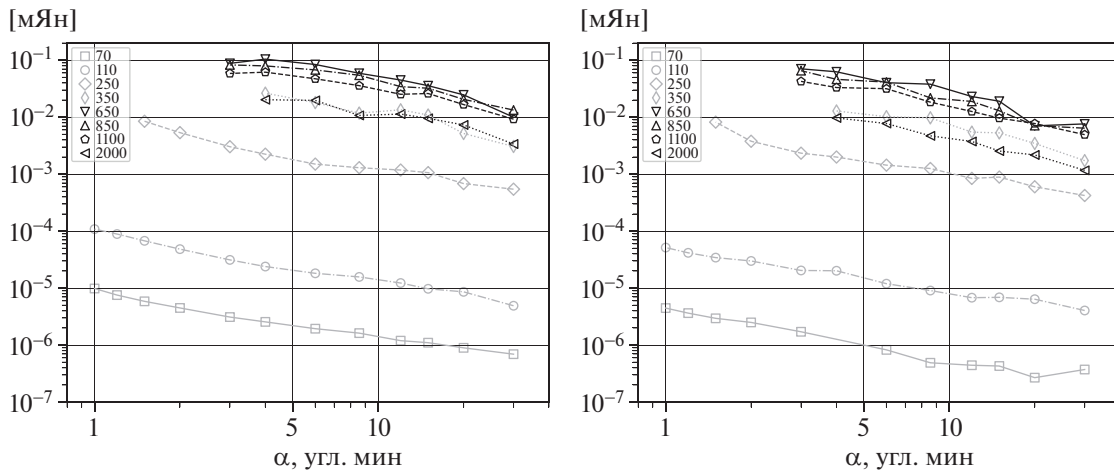


Рис. 4. Зависимость оценки шума путаницы на модельной карте от углового размера. По оси абсцисс отложен размер стороны квадрата модельной карты, по оси ординат — ошибка определения шума путаницы. На левой панели представлена зависимость шума для модели с крупномасштабной структурой, на правой — координаты объектов случайны.

обходимо рассматривать различные области небесной сферы.

Гравитационное линзирование приводит к увеличению яркости источников, а значит, и к увеличению их числа выше некоторого порогового значения потока. Таким образом, этот эффект следует учитывать при подсчетах источников, если кривая распределения источников имеет крутой наклон в некотором интервале потоков.

В самом деле, рассмотрим простейший случай, когда кривая подсчетов представляет собой константу. То есть, допустим, что имеется N объектов с потоком 1 мЯн на dex на единицу площади небесной сферы и столько же объектов с потоком 2 мЯн³. Пусть также вероятность линзирования с коэффициентом 2 составляет 0.1%. Тогда количество объектов с потоком 2 мЯн будет составлять

$$N(1 - 1/1000) + N \times 1/1000 = N. \quad (1)$$

Ситуация меняется кардинально в том случае, когда кривая подсчетов имеет крутой наклон. Пусть вероятность линзирования и количество объектов с потоком 2 мЯн те же, но число объектов с потоком 1 мЯн гораздо больше — $10000N$. Тогда вследствие линзирования количество объектов с потоком 2 мЯн составит

$$N - N \times 1/1000 + 10000N \times 1/1000 = 10.999N, \quad (2)$$

т.е. число источников с потоком 1 мЯн увеличится на порядок. Рисунок 3 иллюстрирует влияние эффекта гравитационного линзирования. На нем сплошной черной линией и серой штриховой показаны результаты оценки шума с учетом эффекта гравитационного линзирования и без него соответственно. Как можно видеть, различие кривых не превышает толщину линии на данном

графике во всем рассматриваемом диапазоне длин волн. Таким образом, учет гравитационного линзирования не является критичным фактором для задачи анализа шума путаницы.

4. ВКЛАД В ШУМ ПУТАНИЦЫ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ

4.1. Вклад в шум путаницы от объектов на различных красных смещениях

При рассмотрении модели внегалактического фона часто рассматривают распределения по красному смещению какой-либо численной характеристики. Например, можно построить подсчеты источников для некоторого среза по красному смещению [32], возможно также указать зависимость числа объектов с потоком выше некоторого порогового значения на определенной длине волны как функцию z , в ряде работ показан вклад в спектр внегалактического фона от объектов на разных красных смещениях [33]. В целом был обнаружен эффект увеличения вклада далеких галактик для больших длин волн, что объясняется отрицательной K -коррекцией [5]. Так, на длине волны 870 мкм поток не зависит от красного смещения в интервале красных смещений $z = 1-10$ и определяется исключительно физическими параметрами галактики [5, 34].

Мы также построили серию карт с заданным парами значений $z_{\max}$ и $z_{\min}$ и оценили шум путаницы в них. Результаты данных расчетов для восьми полос спектрометров космической обсерватории “Миллиметрон” показаны на рис. 5. Серым цветом различной насыщенности отображено значение шума путаницы, создаваемого объектами в интервале красных смещений $(z_{\min}, z_{\max})$.

³ Здесь и далее dex — величина в логарифмических единицах.

Таблица 2. Интервал красных смещений, объекты на которых вносят основной вклад в шум путаницы

λ , мкм	$z_{\min}$	$z_{\max}$
70	0.62	4.11
110	0.60	3.65
250	0.49	3.06
350	0.47	3.27
650	0.47	3.45
850	0.52	3.39
1100	0.59	3.34
2000	0.63	3.37

Белые сплошные линии показывают 50 и 90% процентов от общего значения шума.

Из данных диаграмм можно сделать следующие выводы. Во-первых, для столь значительного интервала длин волн положение и форма кривых, ограничивающих персентили⁴ шума путаницы, имеют схожие форму и положение. Очевидно, на участке, где линии персентилей горизонтальны, вклад в шум путаницы не зависит от максимального красного смещения. Аналогично, в области, где линии персентилей вертикальны, значение шума путаницы не зависит от минимального красного смещения. На основе построенных диаграмм можно определить интервал $z_{\min} < z < z_{\max}$, объекты которого вносят доминирующий вклад в общее значение шума путаницы. Следует отметить, что эту область можно определить как значения пересечения 90% персентилей с координатными осями. Численные значения даны в табл. 2. В таблице в первом столбце указана длина волны, выраженная в микронах, второй и третий столбец ограничивают интервал, соответствующий 90% шума путаницы. Полученный результат носит весьма нетривиальный характер: значение $z_{\min}$ является практически постоянным для всех рассмотренных длин волн. Однако значение $z_{\max}$ уменьшается от ~4 до ~3 при переходе от коротковолновой полосы 70 мкм к длинноволновой полосе 2000 мкм.

4.2. Вклад в шум путаницы от объектов различной светимости

Проанализируем вклад в шум путаницы от объектов с различными светимостями. В использованном нами модельном конусе минимальная и максимальная светимости в инфракрасном диапазоне составляли $L_{\min} = 10^3 L_{\odot}$ и $L_{\max} = 10^{13} L_{\odot}$. Под инфракрасной светимостью подразумевалось стандартное ее определение как светимость в ин-

Таблица 3. Интервал светимостей галактик, которые вносят основной вклад (90%) в шум путаницы на рассмотренных длинах волн

λ , мкм	$\log_{10}(L_{\min}/L_{\odot})$	$\log_{10}(L_{\max}/L_{\odot})$
70	6.9	9.1
110	7.1	9.9
250	8.1	11.2
350	9.3	12.0
650	10.7	11.6
850	11.1	11.6
1100	11.2	12.2
2000	10.4	11.7

тервале длин волн от 8 до 1000 мкм. Соответствующие диаграммы вкладов от различных интервалов по светимости показаны на рис. 6, также интервалы светимостей объектов, вносящих основной вклад, приведены в табл. 3. Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы.

Значения границ $L_{\min}$ и $L_{\max}$ сильно зависят от длины волны. Если на коротких длинах волн основной вклад вносят объекты средних светимостей, $L = (10^7 - 10^9) L_{\odot}$, для 70 мкм, то на больших длинах волн основной вклад вносят объекты с $L \gtrsim 10^{10.5} L_{\odot}$. Стоит отметить, что многочисленные слабые галактики с $L < 10^7 L_{\odot}$ практически не вносят вклад в шум путаницы. Сказанное выше не противоречит распространенному утверждению, что шум путаницы создается далекими неразрешенными галактиками, так как при увеличении длины волны падает угловое разрешение, и основной вклад в шум путаницы вносят объекты с большими светимостями.

4.3. Вклад в шум путаницы от объектов с различными спектральными характеристиками

Из восьми фотометрических полос детекторов КМС и ДМС можно скомбинировать 7 показателей цвета — как разницу потоков в соседних полосах. Для того, чтобы каждая полоса могла входить в определение цветового показателя дважды, мы дополняем набор полос дополнительными коротковолновой (50 мкм) и длинноволновой (3000 мкм) полосами. Для примера рассмотрим полосу, центрированную на длину волны 250 мкм. С ней можно определить два показателя цвета, а именно $C(350-250 \text{ мкм}) \equiv \log_{10}(S_{350}/S_{250})$ и $C(250-110 \text{ мкм}) \equiv \log_{10}(S_{250}/S_{110})$. Для каждого из них можно ввести максимальное и минимальное значения показателя, например, $C_{\max}(250-110 \text{ мкм})$ и $C_{\min}(250-110 \text{ мкм})$ и оценить шум путаницы, создаваемый только объектами с фиксированным показателем цвета.

⁴ Персентиль (перцентиль, центиль, процентиль) — значение (в процентах), которое не превышает с фиксированной вероятностью заданная случайная величина.

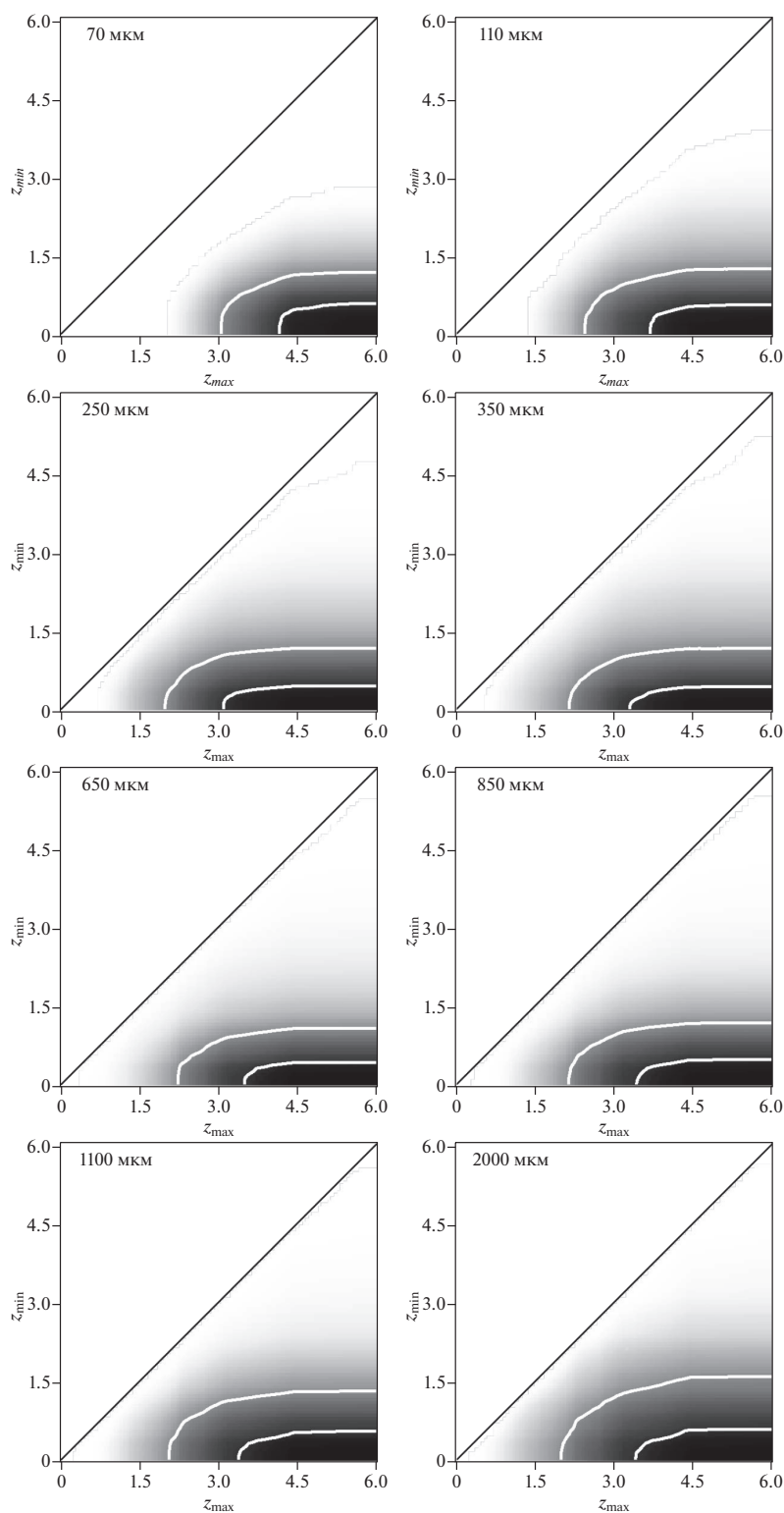


Рис. 5. Вклад в шум путаницы от объектов в различных интервалах красных смещений от $z_{\min}$ до $z_{\max}$. Восемь панелей, слева направо, сверху вниз соответствуют восьми полосам детекторов КМС и ДМС: 70, 110, 250, 350, 650, 850, 1100 и 2000 мкм. По оси абсцисс отложено максимальное красное смещение $z_{\max}$ объектов карты, по оси ординат — минимальное красное смещение $z_{\min}$. Значения в точке на плоскости соответствуют значению шума путаницы модельной карты, содержащие только объекты с $z_{\min} < z < z_{\max}$. Интенсивность серого иллюстрирует значение доли шума путаницы от общего значения. Черный цвет соответствует единице. Белые участки показывают области, где шум путаницы отсутствует. Верхняя треугольная часть, очевидно, не заполнена, так как на ней $z_{\max} < z_{\min}$. Белые контуры содержат области с 90 и 50% от максимального значения.

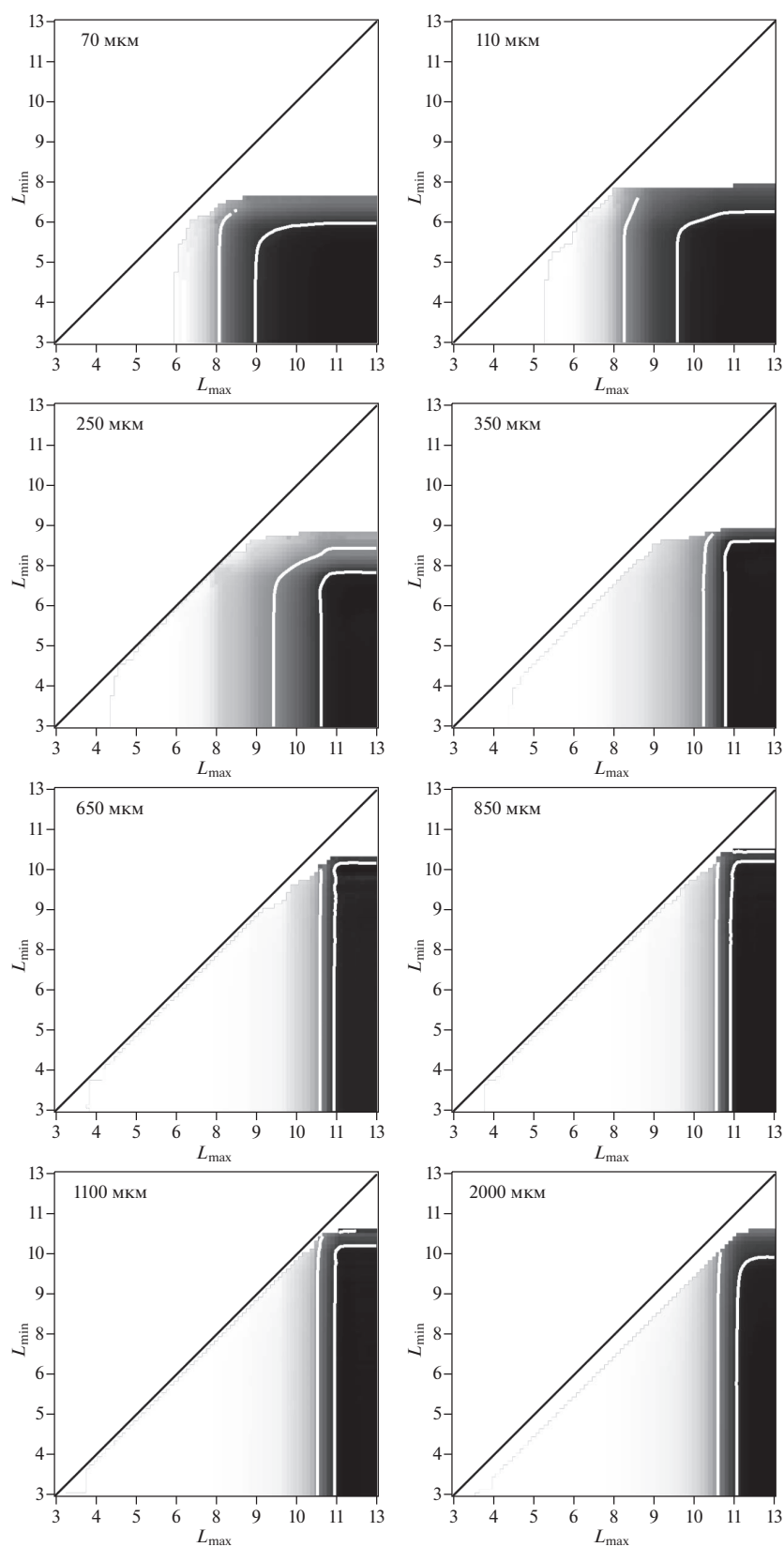


Рис. 6. Шум путаницы для различных интервалов инфракрасной светимости от $L_{\min}$ до $L_{\max}$. Расчеты выполнены для характеристик космической обсерватории “Миллиметрон”. Восемь панелей слева направо, сверху вниз соответствуют восьми полосам КМС и ДМС. Контурами показаны значения 90 и 50% от общего шума путаницы. Интенсивность серого цвета иллюстрирует значение шума путаницы.

Таблица 4. Вклад в шум путаницы источников с различными цветовыми характеристиками

λ_r , мкм	λ_0 , мкм	λ_1 , мкм	$C_{\min}$	$C_{\max}$
70	70	110	0.14	0.38
70	50	70	0.11	0.35
110	110	250	0.16	0.68
110	70	110	0.18	0.39
250	250	350	−0.19	0.17
250	110	250	0.19	0.75
350	350	650	−0.63	−0.10
350	250	350	−0.21	0.19
650	650	850	−0.37	−0.20
650	350	650	−0.68	−0.08
1100	1100	2000	−0.89	−0.75
1100	850	1100	−0.37	−0.26
2000	2000	3000	−0.61	−0.56
2000	1100	2000	−0.89	−0.75

Наличие диаграммы распределения, показанной на рис. 7, позволяет оценить, одни ли и те же объекты создают шум путаницы в соседних фотометрических полосах. Если, например, оказывается, что основной вклад в шум путаницы на 250 мкм вносят объекты со значительными положительными значениями показателя цвета $C(250-110 \text{ мкм})$, то это значит, что на 110 мкм основной вклад в шум путаницы вносят уже другие объекты.

Рассмотрим подробно результаты, показанные на панелях рис. 7. Всего присутствует восемь панелей, для всех полос детекторов обсерватории “Миллиметр”. Каждая панель разделена на две треугольные части. На верхней показан шум путаницы объектов с заданным показателем цвета, определенным по отношению к ближайшей более короткой длине волны, т.е. 250 мкм для 350 мкм, 650 мкм для 850 мкм и так далее. На верхней части панели для 70 мкм показан показатель цвета по отношению к 50 мкм.

На нижней панели показана оценка шума путаницы для ближайшей более длинноволновой полосы, т.е. 350 мкм для 250 мкм и т.д. Интенсивность серого иллюстрирует значение шума путаницы. Белые линии показывают 90 и 50% от общего значения.

Диапазон показателей цвета, объекты с которым вносят основной вклад в шум путаницы, можно определить как интервал, задаваемый точками пересечения линий определенной персентили (к примеру, 90%) с координатными осями. Эти значения сведены в табл. 4, где в первом столбце указана длина волны λ_r , для которой проводились построение карты и оценка шума путаницы, цветовая характеристика вычисляется как разница между длинами волн λ_1 и λ_0 (3-й и

2-й столбцы соответственно). Значения $C_{\min}$ и $C_{\max}$ в 4-м и 5-м столбцах ограничивают 90% общего шума путаницы.

Для большей наглядности выводов, которые можно сделать из рис. 7 и табл. 4, нами был построен дополнительно график (см. рис. 8), который демонстрирует изменение интервала показателей цвета объектов, вносящих основной вклад в шум путаницы.

Из построенного графика видно, что объекты, создающие шум путаницы на 70 мкм, имеют значительный положительный показатель цвета между полосами 110 и 70 мкм. Другими словами, объекты карты, генерирующие шум в полосе 70 мкм, вносят весьма значительный вклад в фон в полосе 110 мкм. Вместе с тем источники, создающие шум на 70 мкм, имеют существенный отрицательный показатель цвета $C(50-70 \text{ мкм})$, т.е. эти объекты не вносят существенного вклада во внегалактический фон на ближайшей более коротковолновой полосе. При постепенном смещении к самой длинноволновой полосе, 2000 мкм, ситуация постепенно меняется на противоположную.

Практический смысл этого результата заключается в следующем. Для разрешения шума путаницы, в общем случае, ключевой является информация, полученная на более коротких длинах волн относительно полосы наблюдения. Однако для полос от 70 до 350 мкм включительно важна также и информация с более длинноволновых полос относительно полосы наблюдения.

5. ЗАВИСИМОСТЬ ШУМА ПУТАНИЦЫ ОТ ДИАМЕТРА ТЕЛЕСКОПА ДЛЯ РАЗНЫХ ДЛИН ВОЛН

Шум путаницы зависит, в первую очередь, от углового разрешения телескопа, которое определяется по общеизвестной формуле

$$\theta \propto \frac{\lambda}{d}, \quad (3)$$

где θ — угловое разрешение, λ — длина волны, d — диаметр главного зеркала. Таким образом, можно ожидать увеличения шума путаницы при увеличении длины волны и уменьшения диаметра главного зеркала телескопа. На эти два тренда накладывается влияние непосредственно формы кривой подсчетов источников, а также эффект пространственного распределения объектов.

Полученные нами оценки шума путаницы как функции диаметра телескопа для разных длин волн показаны на рис. 9.

Как было показано в работе [6], для телескопа с диаметром главного зеркала $d = 10 \text{ м}$ шум путаницы имеет пик на длине волны $\lambda \approx 300 \text{ мкм}$. Однако при переходе к большим диаметрам главно-

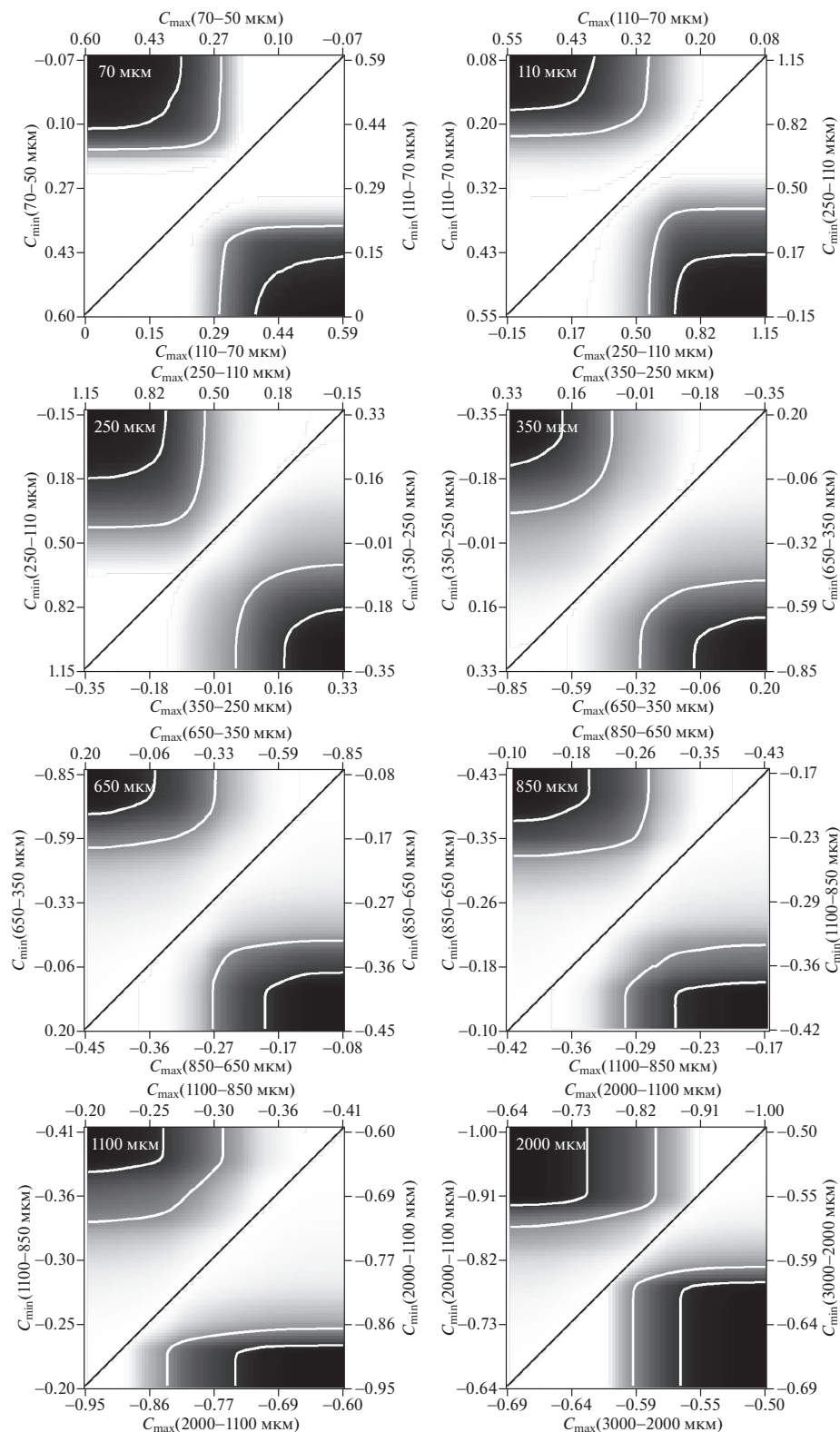


Рис. 7. Вклад в шум путаницы от источников с различными показателями цвета. Слева направо, сверху вниз показаны оценки для восьми полос детекторов КМС и ДМС. На верхней левой панели показана диаграмма для длины волны 70 мкм. Верхняя часть графика показывает распределение для $C_{min}(70-50 \text{ мкм}) \leq C(70-50 \text{ мкм}) \leq C_{max}(70-50 \text{ мкм})$. Нижняя часть показывает оценки шума путаницы для объектов с $C_{min}(110-70 \text{ мкм}) \leq C(110-70 \text{ мкм}) \leq C_{max}(110-70 \text{ мкм})$. На панели номер N показаны оценки для полосы N детекторов обсерватории “Миллиметрон”. Нижняя часть графика показывает оценки шума для разных значений разности потоков между полосами $N+1$ (более длинноволновой) и N . Верхняя панель — между полосами N и $N-1$ (более коротковолновой). Белые сплошные линии очерчивают области, содержащие 50 и 90% от общего значения шума путаницы.

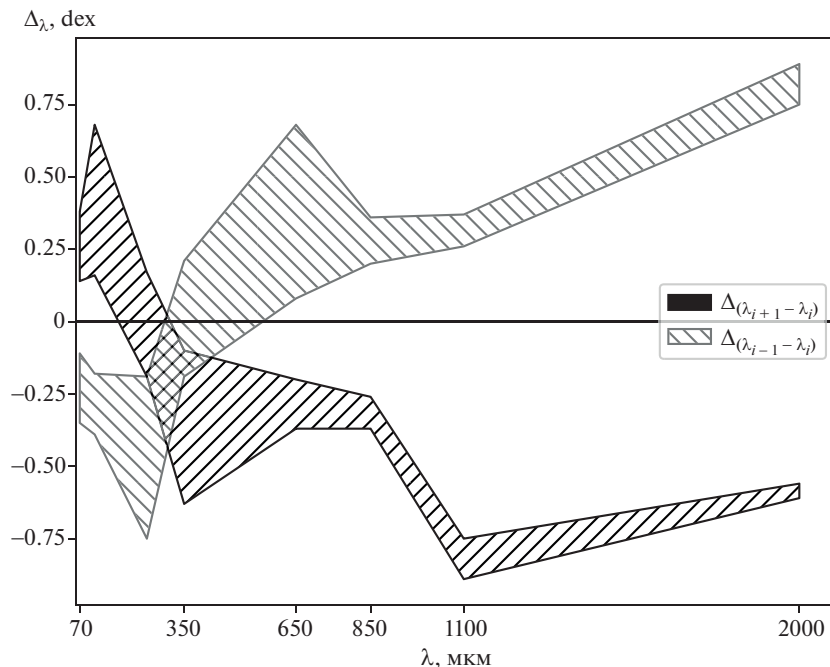


Рис. 8. Зависимость интервала показателей цвета, объекты в котором создают 90% шума путаницы, от длины волны. Черная штрихованная область показывает диапазон значений для ближайшей более длинноволновой полосы (к примеру, $C(250-110)$ мкм для 110 мкм). Серая штрихованная область показывает диапазон значений для ближайшей более коротковолновой полосы (к примеру, $C(70-110)$ мкм для 110 мкм).

го зеркала ситуация меняется, и шум путаницы продолжает увеличиваться с ростом длины волны. Также хотелось бы отметить, что для четырех самых коротких из рассмотренных длин волн, а именно: 70, 110, 250, 350 мкм шум путаницы быстро уменьшается с увеличением разрешающей способности телескопа. Для больших длин волн снижение гораздо более плавное и, что существенно, само значение шума перестает зависеть от длины волны.

Здесь уместно сделать следующее замечание. Шум путаницы зависит не только от подсчетов источников и углового разрешения, но и от эффективного телесного угла диаграммы направленности. Боковые лепестки, даже будучи сравнительно слабыми, могут занимать значительную площадь и яркие объекты в них могут вносить вклад в оценки шума. Данная задача является предметом будущего исследования, когда будет достоверно известна форма диаграммы направленности телескопа “Миллиметрон”.

6. ОЦЕНКА ПЕРЕМЕННОСТИ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКОГО ФОНА

Исследования в дальнем ИК диапазоне нацелены не только на неизменные объекты, большой интерес представляют различные транзиентные явления. Например, малые тела Солнечной системы на расстояниях больше 30 а.е. обладают температурами меньше 50 К, и максимум их теп-

лового излучения приходится на дальний ИК диапазон. Наблюдения теплового излучения используются для определения важнейших характеристик транснептуновых объектов: их размеров и альбедо [35, 36]. Нетрудно оценить, что при температуре 50 К, расстоянии 30 а.е. и диаметре объекта 1 км плотность потока излучения от абсолютно черного тела в диапазоне 70 мкм будет составлять 7×10^{-5} мЯн, а значит, такой объект может быть детектирован телескопом “Миллиметрон”. Для выделения излучения объекта из фона (см. табл. 1) можно было бы использовать тот факт, что объект на таком расстоянии движется со скоростью около 20” в сутки (оценка сделана для круговой орбиты). При условии, что фон не меняется во времени, получение и вычитание пары изображений области неба с транснептуновым объектом дало бы необходимую информацию о его тепловом излучении. В этом разделе мы выясним, в какой степени фоновое излучение можно считать неизменным.

Излучение звезд, пыли и газа в галактиках можно уверенно считать постоянным на временных масштабах астрономических наблюдений. Однако нельзя сказать того же об активных ядрах галактик. При этом, как было показано, к примеру, в [6], АГЯ вносят заметный вклад в спектр внегалактического фона в полосах 70 и 110 мкм. Для оценки влияния переменности нами были созданы серии модельных карт для наблюдений в течение одного года с шагом в 1 день. Для того, чтобы

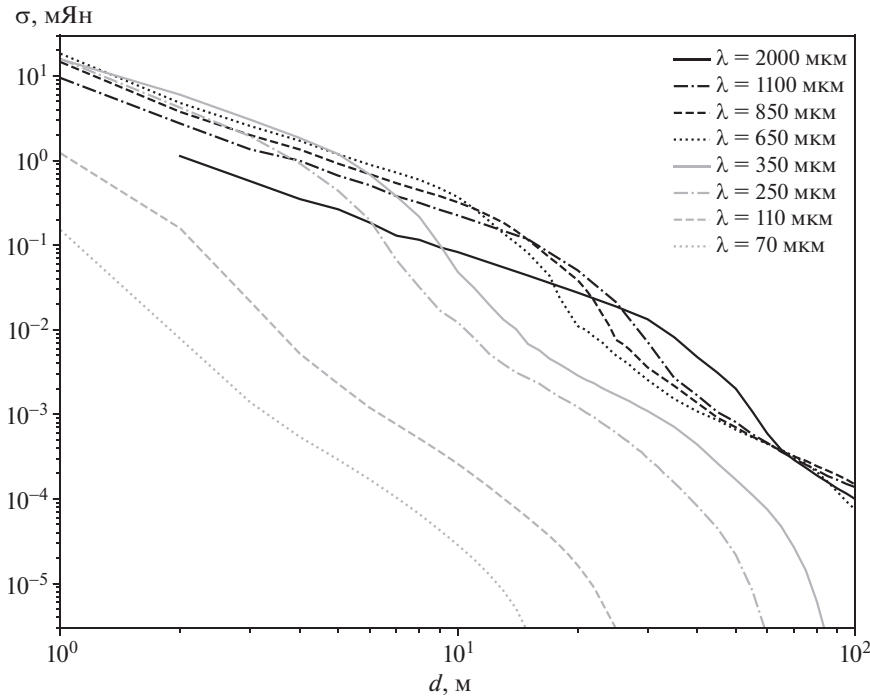


Рис. 9. Зависимость шума путаницы от диаметра зеркала телескопа для ряда длин волн. По оси абсцисс отложен диаметр зеркала, по оси ординат — шум путаницы. Черный цвет соответствует полосам ДМС, серый — полосам КМС.

для каждой даты обозначить вклад от активных ядер, нами был применен следующий подход.

Метод моделирования кривых переменности активных галактических ядер описан в целом ряде работ (см., напр., [37, 38]). Нами была использована именно эта методика. Кривая переменности АГЯ задается как стохастический процесс ковариационной матрицей сигнала в виде:

$$\text{cov}(\Delta t) = \sigma_s^2 \exp\left(-\left(\frac{|\Delta t|}{\tau}\right)^\beta\right), \quad (4)$$

где $\tau > 0$ — временной масштаб декорреляции, σ_s^2 — дисперсия сигнала, $\Delta t = t_i - t_j$ — разница по времени между i -й и j -й точками на кривой, параметр $0 < \beta < 2$, где $\beta = 1$ соответствует процессу DRW (Damped Random Walk — демпфированное случайное блуждание).

Для симуляции кривой переменности с N точками создается $(N \times N)$ ковариационная матрица сигнала в виде:

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_s^2 & \sigma_s^2 e^{-\left(\frac{|t_1-t_2|}{\tau}\right)^\beta} & \dots & \sigma_s^2 e^{-\left(\frac{|t_1-t_N|}{\tau}\right)^\beta} \\ \sigma_s^2 e^{-\left(\frac{|t_2-t_1|}{\tau}\right)^\beta} & \sigma_s^2 & \dots & \sigma_s^2 e^{-\left(\frac{|t_2-t_N|}{\tau}\right)^\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_s^2 e^{-\left(\frac{|t_N-t_1|}{\tau}\right)^\beta} & \sigma_s^2 e^{-\left(\frac{|t_N-t_2|}{\tau}\right)^\beta} & \dots & \sigma_s^2 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Эта матрица должна быть подвергнута разложению Холецкого в виде $\mathbf{C} = \mathbf{L}^T \mathbf{L}$, где $\mathbf{L}$ — верхняя треугольная матрица. По известным формулам разложение Холецкого вычисляется следующим образом

$$\begin{aligned} l_{11} &= \sqrt{a_{11}}, \\ l_{j1} &= \frac{a_{j1}}{l_{11}}, \quad j \in [2, n], \\ l_{ii} &= \sqrt{a_{ii} - \sum_{p=1}^{i-1} l_{ip}^2}, \quad i \in [2, n], \\ l_{ji} &= \frac{1}{l_{ii}} \left(a_{ji} - \sum_{p=1}^{i-1} l_{ip} l_{jp} \right), \\ i &\in [2, n-1], \quad j \in [i+1, n], \end{aligned} \quad (6)$$

где l_{ij} — элемент матрицы Холецкого, a_{ij} — элемент ковариационной матрицы. Вычисления производятся сверху вниз слева направо.

Структурная функция вычисляется как:

$$SF_{\text{obs}}(\Delta t) = \sqrt{\frac{1}{N_{\Delta t \text{ pairs}}} \sum_{i=1}^{N_{\Delta t \text{ pairs}}} (y(t) - y(t + \Delta t))^2}, \quad (7)$$

где $y(t)$ — кривая переменности, суммирование идет по всем парам точек, разделенным временным интервалом Δt . Асимптотическая переменность SF_∞ в таком случае связана с амплитудой переменности как $SF_\infty = \sqrt{2}\sigma$, и, в свою очередь,

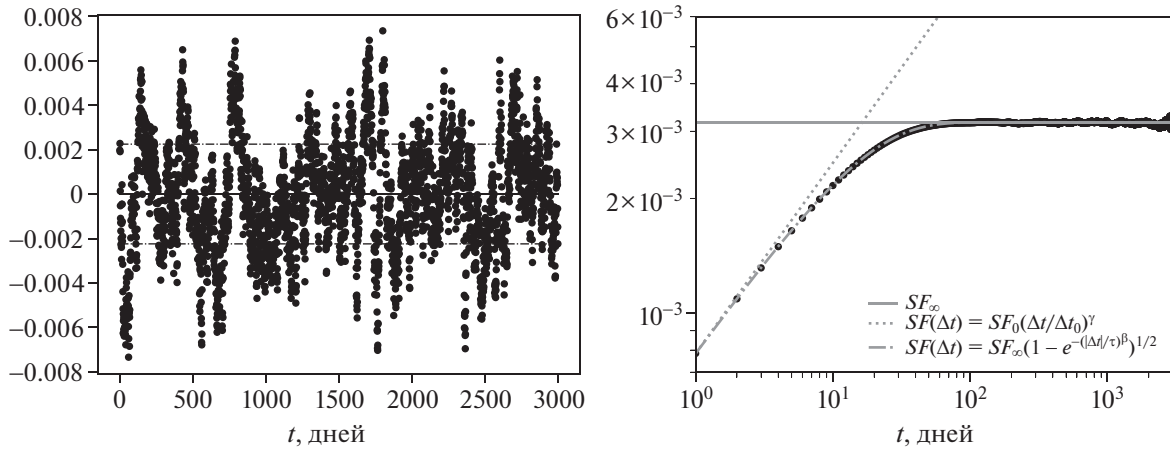


Рис. 10. Слева — пример модельной кривой блеска АГЯ с параметрами $\log SF_\infty = -2.8$ и $\log \tau = 1.2$. По горизонтальной оси отложено время, выраженное в единицах дней, по вертикальной оси — изменение абсолютной величины. Сплошная горизонтальная линия обозначает $\Delta S = 0$. Двумя штрихпунктирными линиями отмечены значения $\Delta S = +\sigma_s$ и $\Delta S = -\sigma_s$. Справа — структурная функция, построенная по модельным данным. Черные точки — оценка на основе модельной кривой, показанной слева. Горизонтальная сплошная линия показывает значение SF_∞ . Серой штрихпунктирной линией показана теоретическая кривая на основе формулы (11). Пунктирная линия обозначает асимптоту для случая $\gamma = 0.5$.

кривая переменности может быть представлена как $y = \mathbf{L}\mathbf{r}$, где $\mathbf{r}$ — вектор гауссовых отклонений с дисперсией, равной единице.

Вкратце, такой случайный процесс задается следующим образом. Цепочка симулированных данных начинается с $s_1 = G(\sigma^2)$, где $G(x^2)$ — гауссово отклонение с дисперсией x^2 . Последующие точки кривой определяются как

$$s_{i+1} = s_i e^{-\Delta t/\tau} + G[\sigma^2(1 - e^{-2\Delta t/\tau})], \quad (8)$$

где $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ — временной интервал.

Таким образом, для моделирования кривых переменности АГЯ необходимо связать массу центральной черной дыры в ядре, M_{BH} и светимость L в ИК диапазоне с параметрами σ и τ . Подобное соотношение было получено в [39]:

$$\log f = A + B \log \left(\frac{\lambda_{\text{RF}}}{4000 \text{ \AA}} \right) + C(M_i + 23) + D \log \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10^9 M_\odot} \right) + E \log(1 + z), \quad (9)$$

где f — параметр SF_∞ или τ , λ_{RF} — длина волны в системе отсчета, связанной с источником, M_i — абсолютная величина в i полосе SDSS (7625 Å), z — красное смещение. Численные значения данных коэффициентов приведены в указанной выше работе.

Для того, чтобы на основе информации о болометрической светимости оценить абсолютную звездную величину, требуется информация о форме спектра. Для данных расчетов нами был

использован спектр АГЯ первого типа из работы [23]. Фотометрическая величина вычисляется по известной формуле

$$m_{AB} = -2.5 \log_{10} f_\nu - 48.60, \quad (10)$$

где поток выражается в единицах $[\text{эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ Гц}^{-1}]$.

Таким образом, учитывая разброс параметров активных галактических ядер в симуляции eGalICS, нами была создана библиотека кривых изменения блеска для сетки параметров: $-2.8 \leq SF_\infty \leq 1.0$, $0.6 \leq \tau \leq 3.7$, с шагом 0.1, причем для каждой пары значений вычислялось 100 случайных кривых, из которых впоследствии и производился выбор случайным образом для каждого АГЯ. Пример такой кривой блеска приведен на рис. 10 слева, соответствующая структурная функция показана на рис. 10 справа. Выражение для структурной функции для рассмотренного здесь процесса DRW выглядит следующим образом:

$$SF(\Delta t) = SF_\infty (1 - e^{-(\Delta t/\tau)^\beta})^{1/2}. \quad (11)$$

Как можно видеть, теоретическая структурная функция и полученная из модельных данных хорошо согласуются между собой.

Далее для каждого АГЯ была выбрана соответствующая кривая переменности и созданы модельные карты.

Для оценки переменности в каждом отдельно взятом пикселе мы воспользовались следующими двумя критериями. Во-первых, можно оценить дисперсию значения потока в данном пикселе. Во-вторых, также мы использовали распространенный критерий оценки переменности, определяемый как ширина распределения изменения

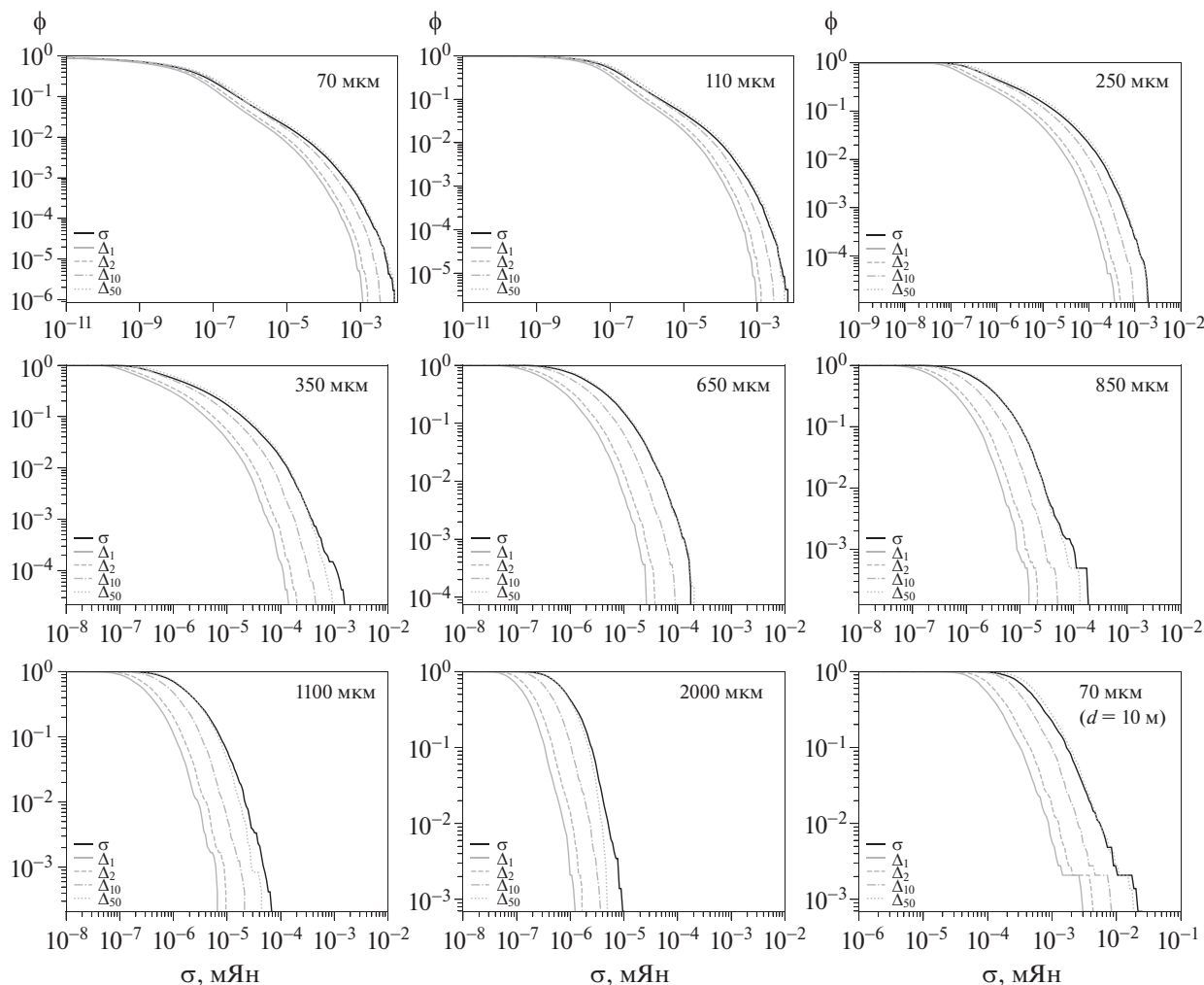


Рис. 11. Интегральные распределения параметров переменности на модельных картах для восьми полос детекторов космической обсерватории “Миллиметрон”. Слева направо, сверху вниз: 70, 110, 250, 350, 650, 850, 1100 и 2000 мкм. По оси абсцисс отложено значение потока, выраженное в миллиЯнских, по оси ординат — доля площади модельной карты. Интервал на данной оси выбран от одного пикселя до 100% площади. Показаны значения дисперсии σ , а также Δ_1 , Δ_2 , Δ_{10} и Δ_{50} . Правая нижняя панель показывает график для 70 мкм, но с таким же угловым разрешением, как для 2000 мкм при диаметре зеркала 10 м.

потока за заданный интервал времени (см., напр., [40]). На рис. 11 показаны оценки для интервала в 1 день, 2, 10 и 50 дней. На данном графике можно видеть достаточно очевидный тренд — при увеличении интервала значение структурной функции приближается к значению дисперсии потока.

Таким образом, можно сделать вывод, что для космической обсерватории “Миллиметрон” в текущей конфигурации с диаметром главного зеркала $d = 10$ м заметное количество пикселей будет демонстрировать переменность только для коротковолновых полос: 70, 110, 250 и 350 мкм. Более того, необходимо отметить, что данный эффект не обосновывается исключительно ухудшением углового разрешения при увеличении длины волны. На правой нижней панели рис. 11 показаны результаты расчетов для 70 мкм с разре-

шением, как на 2000 мкм при диаметре главного зеркала 10 м (это соответствует зеркалу с диаметром 35 см). Как можно видеть, и при таком угловом разрешении переменность присутствует.

Также нами были построены зависимости дисперсии логарифмического значения потока в пикселе от потока (см. рис. 12). На данных графиках уменьшение роли переменности с увеличением длины волны заметно еще более четко, что видно по масштабу вертикальных осей. Также можно сделать важный вывод, что переменными являются не несколько ярких объектов, а большое количество достаточно слабых участков модельной карты.

Суммируя, можно сказать, что на длинах волн 70–350 мкм переменность фона на временных масштабах от дня до года начинает проявляться

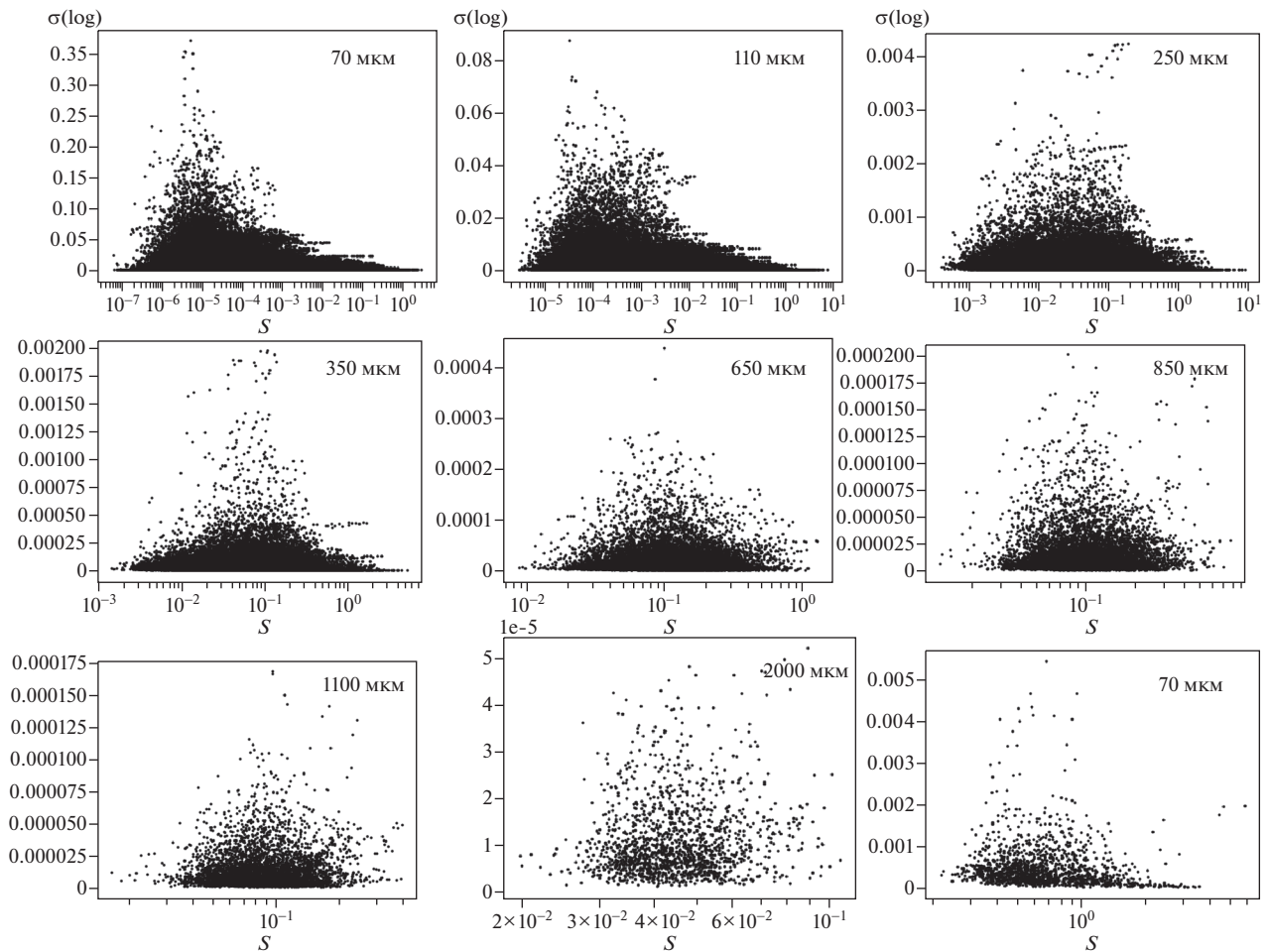


Рис. 12. Зависимость дисперсии логарифмического значения потока в пикселях от среднего значения потока в пикселе. Восемь панелей соответствуют восьми полосам детекторов обсерватории «Миллиметрон». Слева направо, сверху вниз: 70, 110, 250, 350, 650, 850, 1100 и 2000 мкм. На правой нижней панели показаны данные для 70 мкм с разрешением, соответствующим диаметру зеркала 35 см (аналогично разрешению «Миллиметрона» на 2000 мкм).

для плотностей потока ниже и порядка 1 мкЯн. Это накладывает ограничения на возможность детектировать слабые транзитные явления или использовать движение слабых транснептуновых объектов, свободно-летающих планет и т.п. для выделения их из фона. При планировании наблюдений таких объектов с потоками менее 1 мкЯн необходимо продумать способ, как отличить полезный сигнал от флуктуаций потока ядер далеких галактик.

7. ВЫВОДЫ

В данной работе был исследован вклад в шум путаницы от объектов на различных красных смещениях, различающихся своими светимостями и спектральными характеристиками. Расчеты были проведены для восьми полос фотометрических детекторов космической обсерватории «Миллиметрон» с диаметром главного зеркала $d = 10$ м. Также была построена зависимость шума путаницы

от диаметра главного зеркала телескопа для разных длин волн.

По итогам данной работы можно сделать следующие выводы.

- Учет крупномасштабной структуры является критичным необходимым фактором при создании модели. Отсутствие такого учета приводит к весьма значительной недооценке шума путаницы.
- Гравитационное линзирование не является существенным фактором при создании шума путаницы.
- При рассмотрении вопроса, галактики какого диапазона красных смещений вносят основной вклад, прослеживается следующая тенденция: минимальное красное смещение не зависит от длины волны и составляет $z_{\min} \sim 0.5-0.6$, максимальное красное смещение при переходе от 70 до 2000 мкм плавно изменяется от ~ 4 до ~ 3 .
- На коротких длинах волн в шум путаницы вносят вклад в основном галактики со светимостью

стями в диапазоне $(10^7 - 10^9) L_{\odot}$, в то время как на больших длинах волн основной вклад вносят яркие галактики с $L \geq 10^{10} L_{\odot}$.

- На коротких длинах волн шум путаницы создают объекты, которые вносят существенный вклад во внегалактический фон в ближайшей длинноволновой полосе и сравнительно малый вклад в фон в соседнюю коротковолновую полосу, т.е. с крутыми спектрами, растущими с длиной волны. При переходе к большим длинам волн ситуация плавно меняется на противоположную.

- Была произведена оценка переменности фона на модельных картах. Для этого была создана серия карт за один год с шагом по времени в один день. Переменность присутствует на картах для самых коротковолновых детекторов обсерватории “Миллиметрон”. Приведены ее численные оценки.

Отдельно хотелось бы указать на принципиальную возможность из оценок параметров шума путаницы, полученных из реальных будущих наблюдений, вывести ограничения на параметры моделей эволюции галактик с красным смещением.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа была поддержана проектом ФИАН ННГ-41-2020. Е. В. М. и В. Н. Л. были также частично поддержаны грантом РФФИ 19-02-00199.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят рецензента за сделанные замечания, что позволило прояснить некоторые аспекты работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Men'shchikov, Ph. André, P. Didelon, F. Motte, M. Hennemann, and N. Schneider, *Astron. and Astrophys.* **542**, id. A81 (2012).
2. A. Men'shchikov, *Astron. and Astrophys.* **560**, id. A63 (2013).
3. A. Men'shchikov, *Astron. and Astrophys.* **607**, id. A64 (2017).
4. A. Asboth, A. Conley, J. Sayers, M. Béthermin, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **462**, 1989 (2016).
5. C. D. Dowell, A. Conley, J. Glenn, V. Arumugam, et al., *Astrophys. J.* **780**, id. 75 (2014).
6. A. A. Ermash, S. V. Pilipenko, and V. N. Lukash, *Astron. Letters* **46**, 298 (2020).
7. D. Liu, E. Daddi, M. Dickinson, F. Owen, et al., *Astrophys. J.* **853**(2), id. 55 (2018).
8. C. C. Hayward, D. Narayanan, D. Kereš, P. Jonsson, P. F. Hopkins, T. J. Cox, and L. Hernquist, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **428**, 2529 (2013).
9. A. Rahmati and P. P. van der Werf, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **418**, 176 (2011).
10. H. Dole, G. Lagache, and J.-L. Puget, *Astrophys. J.* **585**, 617 (2003).
11. R. Chary and D. Elbaz, *Astrophys. J.* **556**, 562 (2001).
12. C. G. Lacey, C. M. Baugh, C. S. Frenk, A. J. Benson, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **405**, 2 (2010).
13. W. I. Cowley, C. G. Lacey, C. M. Baugh, and S. Cole, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **446**, 1784 (2015).
14. A. M. Swinbank, C. G. Lacey, I. Smail, C. M. Baugh, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **391**, 420 (2008).
15. F. Fontanot and P. Monaco, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **405**, 705 (2010).
16. M. Cousin, G. Lagache, M. Béthermin, J. Blaizot, and B. Guiderdoni, *Astron. and Astrophys.* **575**, id. A32 (2015).
17. M. Cousin, G. Lagache, M. Béthermin, and B. Guiderdoni, *Astron. and Astrophys.* **575**, id. A33 (2015).
18. N. S. Kardashev, *Astron. Rep.* **61**, 310 (2017).
19. N. S. Kardashev, I. D. Novikov, V. N. Lukash, S. V. Pilipenko, et al., *Physics Uspekhi* **57**, 1199 (2014).
20. A. V. Smirnov, A. M. Baryshev, S. V. Pilipenko, N. V. Myshonkova, et al., in *Space Telescopes and Instrumentation 2012: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*, Proc. SPIE **8442**, id. 84424C (2012).
21. S. V. Pilipenko, M. V. Tkachev, A. A. Ermash, T. I. Larshchenkova, E. V. Mikheeva, and V. N. Lukash, *Astron. Letters* **43**, 644 (2017).
22. L. Silva, G. L. Granato, A. Bressan, and L. Danese, *Astrophys. J.* **509**, 103 (1998).
23. J. Lyu and G. H. Rieke, *Astrophys. J.* **841**, id. 76 (2017).
24. C. C. Hayward, P. S. Behroozi, R. S. Somerville, J. R. Primack, J. Moreno, and R. H. Wechsler, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **434**, 2572 (2013).
25. N. Fernandez-Conde, G. Lagache, J.-L. Puget, and H. Dole, *Astron. and Astrophys.* **481**, 885 (2008).
26. H. T. Nguyen, B. Schulz, L. Levenson, A. Amblard, et al., *Astron. and Astrophys.* **518**, L5 (2010).
27. G. Marsden, P. A. R. Ade, J. J. Bock, E. L. Chapin, et al., *Astrophys. J.* **707**, 1729 (2009).
28. R. Leiton, D. Elbaz, K. Okumura, H. S. Hwang, et al., *Astron. and Astrophys.* **579**, id. A93 (2015).
29. M. Béthermin, H.-Y. Wu, G. Lagache, I. Davidzon, et al., *Astron. and Astrophys.* **607**, id. A89 (2017).
30. J. Blaizot, Y. Wadadekar, B. Guiderdoni, S. T. Colombi, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **360**, 159 (2005).
31. M. Demianski and A. G. Doroshkevich, *Astron. and Astrophys.* **422**, 423 (2004).
32. S. Berta, B. Magnelli, R. Nordon, D. Lutz, et al., *Astron. and Astrophys.* **532**, id. A49 (2011).
33. M. Béthermin, E. Le Floc'h, O. Ilbert, A. Conley, et al., *Astron. and Astrophys.* **542**, id. A58 (2012).
34. C. C. Hayward, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **432**, L85 (2013).
35. E. Vilenius, C. Kiss, M. Mommert, T. Müller, et al., *Astron. and Astrophys.* **541**, id. A94 (2012).
36. E. Vilenius, J. Stansberry, T. Müller, C. Kiss, et al., *Astron. and Astrophys.* **618**, id. A136 (2018).
37. S. Kozłowski, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **459**(3), 2787 (2016).
38. S. Kozłowski, *Astrophys. J.* **826**, id. 2 (2016).
39. C. L. MacLeod, Ž. Ivezić, C. S. Kochanek, S. Kozłowski, et al., *Astrophys. J.* **721**(2), 1014 (2010).
40. K. L. Smith, R. F. Mushotzky, P. T. Boyd, M. Malkan, S. B. Howell, and D. M. Gelino, *Astrophys. J.* **857**, id. 141 (2018).