

ПОГЛОЩЕНИЕ В ЛИНИИ ВОДОРОДА 21 см ПРИ $z > 10$ КАК ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ПОСТРОЕНИЯ КОСМОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В МАЛЫХ МАСШТАБАХ

© 2025 г. Ю. Н. Ерошенко^{1*}, В. Н. Лукаш², Е. В. Михеева², С. В. Пилипенко², М. В. Ткачев²

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

²Астрокосмический центр ФИАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 16.06.2025 г.

После доработки 12.08.2025 г.; принята к публикации 19.08.2025 г.

Вычислена интенсивность поглощения реликтового излучения в линии 21 см нейтрального водорода при наличии в спектре космологических возмущений плотности дополнительной мощности в виде “бампа”. Основным эффектом, усиливающим поглощение, является более раннее рождение первых звезд, формирующих фон УФ-излучения. Это излучение понижает спиновую температуру нейтрального водорода и тем самым усиливает поглощение в линии 21 см. Сравнение различных космологических моделей (с бампом в спектре возмущений плотности и без него) показывает, что по положению частотного профиля поглощения можно определить вероятное положение бампа в спектре возмущений и, тем самым, реконструировать спектр космологических возмущений в масштабах $k > 1 \text{ Мпк}^{-1}$.

Ключевые слова: космология, радиоастрономия, линия 21 см, космологические возмущения.

DOI: 10.31857/S0320010825040016

ВВЕДЕНИЕ

Радиолиния нейтрального водорода 21 см возникает при переходах в атоме водорода между состояниями сверхтонкого расщепления с полным спином атома 0 и 1 (см. обзор Притчарда и Лоуба, 2012). Наблюдение этой линии предоставляет информацию о ряде важных астрофизических и космологических процессов при красных смещениях $z > 6$, повлиявших на ее формирование. В том числе об образовании первых звезд и галактик, а также черных дыр, рождающихся, например, в процессе прямого коллапса газовых облаков (Жанг и др., 2025). Исследование поглощения и излучения в линии нейтрального водорода 21 см может стать крайне полезным инструментом для восстановления спектра космологических возмущений плотности при $k > 1 \text{ Мпк}^{-1}$ после того, как эта линия будет достоверно обнаружена с помощью радиотелескопов при наблюдении Вселенной на $z > 10$.

Космологическая эпоха Темных веков длилась от рекомбинации до реионизации водорода во Вселенной, т.е. на красных смещениях $z \sim 6.4\text{--}1100$. Важная для переходов 21 см “спиновая температура”, определяющая относительную населенность верхнего и нижнего уровней атомов водорода, при $z > 30$ определялась столкновениями атомов друг с другом и с электронами. При меньших z столкновения становились неэффективными, и спиновая температура стремилась к температуре реликтового излучения, кото-

рая была выше кинетической температуры барионного газа из-за различия в законах охлаждения газов релятивистских и нерелятивистских частиц при расширении Вселенной. В результате этого, при $z \leq 30$, но до образования первых звезд, поглощение в линии 21 см отсутствовало. Наконец, когда внутри гало темной материи начали появляться звезды, их УФ-излучение вследствие эффекта Ваутхейзена—Филда (ВФ) (Ваутхаузен, 1952; Филд, 1958) понижало спиновую температуру, устанавливая связь спиновых и кинетических степеней свободы. Однако спиновая температура, вероятно, не успевала достичь кинетической температуры барионного газа, а сам газ несколько разогревался и ионизировался излучением ранних звезд и ударных волн. Тем не менее, понижения спиновой температуры оказывалось достаточным для появления глубокой ямы поглощения вблизи $z \sim 17\text{--}25$ (точное значение зависит от спектра космологических возмущений плотности). После разогрева и ионизации газа поглощение сменилось излучением в указанной линии.

К настоящему времени выполнены два эксперимента по наблюдению линии поглощения. За счет космологического расширения наблюдаемая длина волны смещается к $21 \times (1 + z)$ см. Наблюдение радиотелескопами EDGES (Монсалв и др., 2017, 2018, 2019; Бовман и др., 2018) показало наличие “ям поглощения”, положение которой при $z \sim 17$ в целом соответствует теоретическим ожиданиям в рамках стандартной ΛCDM модели, но глубина поглощения в несколько раз больше, чем следует из рас-

*Электронный адрес: eroshenko@inr.ac.ru

четов Бовмана и др. (2018). Если данные наблюдений EDGES верны, то для их объяснения необходимо привлечь новые физические эффекты, так как учтенные процессы, по-видимому, не способны объяснить столь сильное поглощение. Предлагалась, например, модель взаимодействия барионов с частицами темной материи, при котором происходит охлаждение барионного газа примерно в два раза (Баркана, 2018). Это могло понизить спиновую температуру и соответственно усилить поглощение. Отметим, однако, что во втором эксперименте SARAS 3 (Сингх и др., 2022; Бенвис и др., 2022) яму поглощения обнаружить не удалось, поэтому как реальная глубина ямы поглощения, так и само ее наличие пока остаются под вопросом.

Главным фактором, влияющим на спиновую температуру, является образование первых звезд. Первые звезды образуются внутри достаточно массивных гало темной материи, в которых вириальная температура достаточна для запуска процессов охлаждения газа на свободно-свободных переходах и его сжатия с последующей фрагментацией. Ход процесса образования гало темной материи существенно зависит от формы спектра космологических возмущений на соответствующих масштабах. Целью данной работы является исследование влияния спектра возмущений плотности на поглощение в линии 21 см, а в будущем при наличии надежных наблюдательных данных о поглощении может быть рассмотрена обратная задача — получение информации о спектре мощности из наблюдений формы ямы поглощения. Мы предполагаем, что спектр космологических возмущений плотности имеет стандартный вид, но с дополнительным узким максимумом (бампом) на некотором масштабе. Влияние подобного бампа на формирование ранних галактик было рассмотрено в работах (Падманабхан, Лоуб, 2023; Ткачев и др., 2024а), где показано, что при этом ранних галактик образуется больше, что может служить объяснением данных космического телескопа им. Дж. Уэбба.

Недавно в работе Наика и др. (2025) был рассчитан сигнал глобального поглощения в линии 21 см для спектра с избытком мощности. Расчет был выполнен с помощью пакета 21cmFAST (Месингер, Фурлането, 2011). Различие подходов, используемых в данной работе и в работе (Наик и др., 2025), заключается в следующем. Если в пакете 21cmFAST для выделения вириализованных гало применяется линейная теория роста возмущений плотности с экстраполяцией в некоторых случаях в слабо-нелинейную область, то мы применяем для этой цели результаты численного моделирования методом N-тел. Если выбор формы максимума в спектре мощности был мотивирован некоторыми моделями инфляции, то в нашем случае параметры максимума (бампа) выбирались для объяснения наблюдаемого телескопом им. Дж. Уэбба избытка галактик в ранней Вселенной. Парамет-

ры бампа в нашем случае существенно отличаются от используемых в (Наик и др., 2025). Мы не стремимся описать точно форму ямы поглощения со стороны малых красных смещений, так как происходящие вблизи эпохи реионизации процессы пока окончательно не прояснены, о чем говорит, например, кризис перепроизводства ионизирующих фотонов, обсуждавшийся в (Муоз и др., 2024). Мы обнаружили значительный сдвиг границы ямы поглощения на больших z при наличии бампа. Наши расчеты качественно согласуются с выводом работы Наика и др. (2025) о положении ямы поглощения на больших красных смещениях.

В ближайшем будущем ожидается ряд новых радиоастрономических наблюдений в метровом диапазоне на различных радиотелескопах. Если эти наблюдения позволят достаточно точно выявить яму поглощения и охарактеризовать ее границу, то это даст ценную информацию о форме спектра космологических возмущений (в нашей модели — о положении и высоте бампа). В этом случае поглощение в линии водорода 21 см при $z > 10$ станет точным инструментом для построения космологической модели в малых масштабах.

Формализм для расчета величины глобального поглощения в линии 21 см был представлен в (Притчард, Лоуб, 2012) и в указанной там литературе. Ниже в тексте статьи мы приводим основные формулы, чтобы показать зависимость результатов расчета от различных параметров. В данной работе для расчетов используются значения космологических параметров (Эйд и др., 2014): $\Omega_\Lambda = 0.69$, $\Omega_m = 0.31$, $\Omega_b = 0.048$, $h = 0.67$, $n_s = 0.96$.

ВЛИЯНИЕ БАМПА НА ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРВЫХ ЗВЕЗД

При расчете образования крупномасштабных структур мы предполагаем, что стандартный Λ CDM-спектр возмущений умножен на дополнительный множитель

$$1 + A \times \exp\left(-\frac{(\log k - \log k_0)^2}{\sigma_0^2}\right), \quad (1)$$

где $A = 20$, $k_0 = 4.69 \text{ Мпк}^{-1}$, $\sigma_0 = 0.1$ (следуя нашей более ранней работе Ткачева и др. (2024а), мы обозначаем эту модель *gauss_1*). Наличие бампа с такой формой ведет к более эффективному образованию галактик в ранней Вселенной и дает лучшее согласие с данными наблюдений телескопа им. Дж. Уэбба. Отсутствие бампа, т.е. стандартная Λ CDM модель, соответствует $A = 0$. Также была исследована космологическая модель со спектром, в которой бамп имел параметры $A = 30$, $k_0 = 2.01 \text{ Мпк}^{-1}$, $\sigma_0 = 0.1$ (следуя системе обозначений, введенной в (Ткачев и др., 2024б), в дальнейшем называем эту модель *gauss_k2_A30*).

Отметим, что на процесс гравитационного сгущения влияет не сам спектр мощности, а величина сред-

неквадратичного возмущения плотности в том или ином масштабе R . Дисперсия этой величины определяется выражением

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty k^2 P(k) W^2(kR) dk, \quad (2)$$

где $W(kR)$ — функция окна. Наличие бампа в области волновых чисел k_0 приводит к тому, что дисперсия (2) повышена в масштабах $R \ll 1/k_0$ достаточно универсальным образом, так как разные фурье-компоненты гауссова случайного поля независимы. Действительно, в этом случае можно приближенно получить

$$\sigma_R \simeq [\tilde{\sigma}_R^2 + B^2]^{1/2}, \quad (3)$$

где

$$B = \left(\frac{A \sigma_0 P(k_0) k_0^3}{2\pi^{3/2}} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

а величина $\tilde{\sigma}_R$ соответствует случаю $A = 0$. Функциональный вид (3) объясняется тем, что возмущение плотности является суммой двух независимых переменных, имеющих Гауссово распределение.

Для эффекта образования первых звезд важны масштабы масс $\sim 10^8 M_\odot$, соответствующие в рассматриваемых нами случаях условию $R \ll 1/k_0$. Процесс образования звезд будет протекать сходным образом для бампов с различными параметрами, если для них величины (4) одинаковы. Например, для двух бампов с параметрами $A = 20$, $k_0 = 4.69 \text{ Мпк}^{-1}$, $\sigma_0 = 0.1$ и $A = 30$, $k_0 = 2.01 \text{ Мпк}^{-1}$, $\sigma_0 = 0.1$ получаются почти равные B , и поэтому формирование звезд и поглощение в линии 21 см в двух случаях будет одинаково. Этот вывод качественно справедлив и для другой формы бампа, если область бампа локализована на масштабах, много больше масштаба гало, в которых возможно охлаждение и формирование звезд.

Для исследования эволюции темной материи были выполнены три численных моделирования методом N-тел в кубе с объемом $(47 \text{ Мпк})^3$, по 1024^3 частиц в каждом. Одна симуляция соответствовала модели *gauss_1*, вторая — стандартной ΛCDM модели, а также была рассмотрена модель *gauss_k2_A30*, где бамп был выше и сдвинут в область больших длин волн. Размер куба и число частиц является результатом компромисса между высоким разрешением (частота Найквиста должна существенно превышать масштаб бампа k_0 , и гало должны содержать минимум несколько сотен частиц) и большим размером куба, с тем чтобы основная мода возмущений (с длиной волны равной стороне куба) не выходила на нелинейный режим при $z = 0$.

Начальные условия для симуляций были созданы на $z = 120$ при помощи общедоступного кода *ginnungagap*¹, спектр мощности материи определялся для каждой симуляции отдельно. Для стандартной

ΛCDM -модели он генерировался с помощью общедоступного кода CLASS (Блас и др., 2011), а для моделей с бампом — с применением функции (1). Для моделирования эволюции поля плотности был использован код GADGET-2² (Шпригел, 2005), который широко применяется для моделирования эволюции структуры Вселенной. Анализ гало проводился с помощью кода Rockstar³ (Бехрузи и др., 2013).

Как было показано, например, в работе (Фурлането, 2006), основной вклад в эффект ВФ вносят звезды популяции II, которые уже в некоторой степени обогатились металлами. Предшествующие им массивные звезды популяции III из-за их высокой температуры имеют спектры, смещенные в высокоэнергетическую область, и дают меньший вклад. В данной работе мы будем учитывать только звезды популяции II. Усредненная (по пространству) светимость ранних короткоживущих звезд пропорциональна темпу их образования. Последний, в свою очередь, пропорционален темпу образования вириализованных (коллапсирующих) объектов из темной материи, т.е. средней плотности звездного населения

$$\dot{\rho}_s = \bar{\rho}_b \times f_* \frac{df_{\text{coll}}(z)}{dt}, \quad (5)$$

где точка над переменной означает производную по времени, $\bar{\rho}_b$ — средняя плотность барионов во Вселенной, f_* — фракция барионов в вириализованных гало, переходящая в звезды, $f_{\text{coll}}(z)$ — доля коллапсирующей массы (в составе вириализованных гало) в зависимости от красного смещения. Эта величина может быть определена по результатам описанного ранее численного моделирования. При этом отбирались гало с вириальными температурами $> 10^4 \text{ К}$, в которых возможно эффективное охлаждение газа.

В современной Вселенной доля массы барионов, переходящих в звезды, составляет $f_* \sim 0.1$. Во многих работах это же значение используется при оценке поглощения в линии 21 см. Однако в пользу такой экстраполяции нет строгих аргументов. Как показывает исследование галактик, на $z \sim 4$ –8 величина f_* может расти с ростом z и зависеть от массы гало (Бехрузи, Силк, 2018). С другой стороны, известна проблема перепроизводства УФ-фотонов в ранних галактиках (Муноз и др., 2024). Наряду с изменением доли выхода УФ-фотонов, f_{esc} , в ранней Вселенной могла быть иной и f_* . В связи с имеющейся сильной неопределенностью, в данной работе мы рассмотрим несколько вариантов f_* . Слишком большие $f_* > 0.1$ вряд ли возможны, т.к. это еще сильнее усугубит проблему перепроизводства УФ-фотонов. В работе (Ткачев и др., 2024а) утверждается, что при наличии бампа требуются меньшие величины f_* для объяснения наблюдаемой функции светимости галактик на больших z , чем в модели ΛCDM .

¹<https://github.com/ginnungagapgroup/ginnungagap>

²<http://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/volker/gadget/>

³<https://bitbucket.org/gfcanford/rockstar>

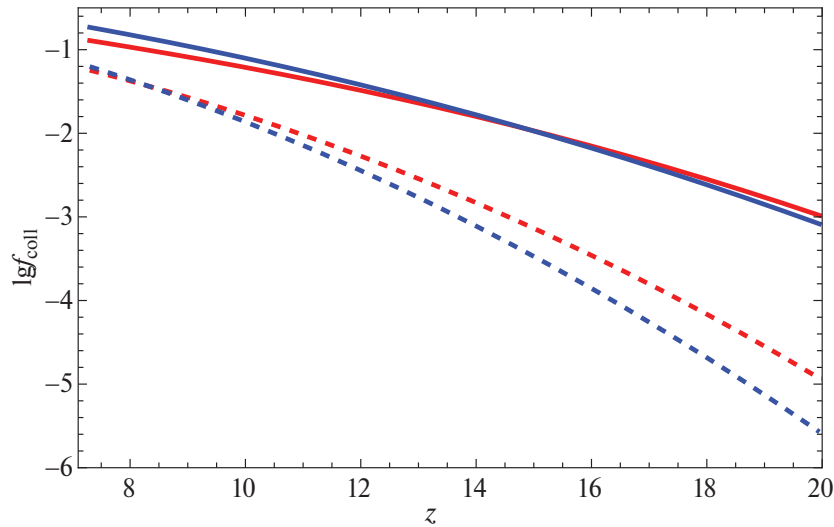


Рис. 1. Доля вещества Вселенной в вириализованных гало темной материи как функция красного смещения z . Красным цветом обозначены кривые, построенные по результатам численного моделирования, при этом критерием отбора гало была их вириальная температура выше 10^4 К. Спектру возмущений плотности с бампом соответствует сплошная кривая, спектру стандартной Λ CDM модели — пунктирная линия. Синим цветом обозначены кривые, построенные на основе формализма Пресса—Шехтера для граничной минимальной массы $M_b = 10^8 M_\odot$. Параметры бампа: $A = 20$, $k_0 = 4.69$ Мпк $^{-1}$ и $\sigma_0 = 0.1$ (модель *gauss_1*).

Отметим, что $f_{\text{coll}}(z)$, найденная из численного моделирования, заметно отличается от оценки, основанной на теории Пресса—Шехтера (Пресс, Шехтер, 1974) с границей по минимальной массе, использованной, например, в работе (Фурлането, 2006):

$$f_{\text{coll}}(z) = \text{erfc} \left\{ \frac{\delta_c}{\sqrt{2}\sigma(M_b, z)} \right\}, \quad (6)$$

где $M_b \sim 10^8 M_\odot$ — минимальная масса гало темной материи, в котором образуются звезды (по упрощенному критерию на основе указанной границе по массе), $\sigma(M_b, z) = \sigma(M_b)D(z)$ с фактором эволюции возмущений $D(z)$ в линейной теории. Сравнение двух подходов показано на рис. 1. Видно, что теория Пресса—Шехтера для моделей с бампом переоценивает число гало в несколько раз при малых красных смещениях, но недооценивает это число при больших красных смещениях. Вместе с тем, для двух численных моделей с разными бампами, но имеющими одинаковую величину B , доля f_{coll} совпадает, что означает, что эта доля определяется именно величиной B , а не конкретными параметрами бампа.

ЭВОЛЮЦИЯ СПИНОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НЕЙТРАЛЬНОГО ВОДОРОДА И ГЛОБАЛЬНЫЙ СИГНАЛ ПОГЛОЩЕНИЯ В ЛИНИИ 21 см

Глобальное (усредненное по небу) поглощение в линии 21 см в однородно распределенном газе рассчитывается по формуле (Притчард, Лоуб, 2012)

$$\delta T_b \approx 27(1-x) \left(1 - \frac{T_\gamma(z)}{T_s(z)} \right) \left(\frac{1+z}{10} \right) \text{ мК}, \quad (7)$$

где x — доля ионизованного водорода, T_γ — температура реликтового излучения, $T_s(z)$ — спиновая температура, зависящая от УФ-излучения первых звезд. Мы прослеживаем поведение функции $T_s(z)$ для двух случаев — при наличии и при отсутствии бампа — и вычисляем δT_b для обоих вариантов.

Спиновая температура выражается следующим образом (см. подробности в обзоре Притчард, Лоуб, 2012):

$$T_s^{-1} = \frac{T_\gamma^{-1} + x_\alpha T_\alpha^{-1} + x_c T_K^{-1}}{1 + x_\alpha + x_c}, \quad (8)$$

где x_α — константа связи с УФ-излучением звезд вследствие эффекта ВФ, x_c — константа связи с тепловым движением атомов из-за столкновений, T_α — эффективная тепловая температура излучения, которая после переизлучения фотонов с хорошей точностью становится равной кинетической температуре газа $T_\alpha \approx T_K$.

Константа связи x_α выражается следующим образом (Притчард, Лоуб, 2012):

$$x_\alpha = S_\alpha J_\alpha / J_\alpha^C, \quad (9)$$

где $S_\alpha \sim 1$, J_α — поток на частоте Ly_α , выражение для J_α^C приведено в (Притчард, Лоуб, 2012). При учете столкновений между собой нейтральных атомов водорода и электронов с протонами имеем

$$x_c = \frac{T_*}{A_{01} T_\gamma} (\kappa_{1-0}^{HH}(T_K) n_H (1-x) + \kappa_{1-0}^{eH}(T_K) n_H x), \quad (10)$$

где $T_* = 0.068$ К, $A_{01} = 2.85 \times 10^{-15}$, функции $\kappa_{1-0}^{HH}(T_K)$ и $\kappa_{1-0}^{eH}(T_K)$ также определены в (Притчард, Лоуб, 2012), n_H — концентрация водорода.

Светимость первых звезд в единице объема имеет вид

$$\varepsilon_*(z, \nu) = f_* n_H \varepsilon(\nu) \frac{df_{\text{coll}}}{dt}, \quad (11)$$

где $\varepsilon(\nu)$ — число излученных фотонов на один барион. Эффект ВФ мы учитываем стандартным методом — путем суммирования по лаймановским резонансам и интегрирования по красным смещениям излученных фотонов, длина волны которых уменьшилась в итоге до линии Ly_α (Баркана, Лоуб, 2005). При этом спектр нормируется так, что число фотонов на атом водорода $N_\alpha = 9690$ для звезд популяции II, а “recycling fraction” $f_{\text{rec}}(n)$ берется из работ Притчарда и Фурлането (2006) и Хираты (2006). Таким образом, фон УФ-фотонов, входящий в (9), записывается в виде

$$J_\alpha = \sum_2^{30} f_{\text{rec}}(n) \int_z^{z_{\text{max}}(n)} dz' \frac{(1+z')^2}{4\pi} \frac{c}{H(z)} \varepsilon_*(z', \nu'), \quad (12)$$

где

$$\nu' = \nu(1+z')/(1+z), \quad (1+z')/(1+z) = [1-(n+1)^{-2}]/(1-n^{-2})$$

и $\text{max}(n) = 30$. В целом, наш подход совпадает с (Месингер, Фурлането, 2011; Фурлането, 2006) с поправкой на то, что мы используем спектр возмущений с бампом, имеющим такую же форму, что и в работе Ткачева и др. (2024а).

Если эффект ВФ определяет границу ямы поглощения со стороны больших z , то нагрев и ионизация газа определяет границу ямы поглощения со стороны малых z . Нагрев и ионизация также определяются первыми звездами и галактиками, но эти процессы на $z < 10$ весьма хаотичны и пока еще не до конца прояснены. Поэтому в данной работе мы концентрируемся только на границе ямы со стороны больших z , а процессы при малых z учитываем приближенно. Например, вклад в изменение кинетической температуры газа мы задаем в виде (Фурлането, 2006)

$$\begin{aligned} \frac{2}{3} \frac{\varepsilon_X}{k_B n H(z)} = \\ = 10^3 f_X \left(\frac{f_*}{0.1} \frac{f_{X,h}}{0.2} \frac{df_{\text{coll}}/dz}{0.01} \frac{1+z}{10} \right) \text{K}, \end{aligned} \quad (13)$$

где k_B — постоянная Больцмана, $H(z)$ — зависимость постоянной Хаббла от красного смещения. Величина (13) входит в уравнение для эволюции кинетической температуры

$$\frac{dT_K}{dt} = \frac{2T_K}{3n_H} \frac{dn_H}{dt} + \frac{2}{3k_B} \sum_j \frac{\varepsilon_j}{n_H} \quad (14)$$

вместе со вкладом нагрева за счет комптоновского рассеяния на фотонах реликтового излучения.

В процессе формирования вириализованных объектов (при их обособлении от хаббловского потока)

возникают крупномасштабные движения темной материи и барионов, сопровождающиеся ударными волнами и нагревом газа (Наф, Силк, 2001). Ударная волна распространяется вне коллапсирующего объекта и нагревает газ в его окрестности. Хотя в ранних работах в численном моделировании (Гнедин, 2004) и в аналитических расчетах Фурлането и Лоуба (2004) было указано на важность эффекта нагрева газа ударными волнами, последующие работы показали, что вклад ударных волн незначителен (см. Месингер, Фурлането, 2011, и указанные там ссылки). Поэтому в настоящей работе, следуя (Месингер, Фурлането, 2011), нагрев ударными волнами мы не учитываем.

Эволюция степени ионизации x однородного газа рассчитывается по формуле (Фурлането, 2006)

$$\frac{dx}{dt} = \zeta \frac{d}{dt} - \alpha_r x^2 n_H, \quad (15)$$

где $\alpha_r = 4.2 \times 10^{-13} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ — коэффициент рекомбинации, $\zeta = A_{\text{He}} f_* f_{\text{esc}} N_{\text{ion}}$, A_{He} — доля гелия, $N_{\text{ion}} = 0.45 N_\alpha$ для звезд популяции II.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА

Многие из входящих в расчет величин очень неопределенны. В частности, как было сказано выше, имеется проблема ионизационного кризиса. Это значит, что величины, ответственные за ионизацию, пока нельзя достоверно фиксировать. В настоящей работе мы варьируем в некотором интервале величины f_{esc} и f_* . На верхней и нижней панелях рис. 2 видно, что наряду со спектром возмущений эти величины также влияют на результат. На рис. 2 видно, что большие значения f_* противоречат наблюдениям, так как при этом эпоха реионизации сдвигается на красные смещения $z > 6.4$ (переход к нулевому поглощению соответствует $x = 1$ и $\delta T = 0$), причем эта проблема выражена сильнее в случае спектра возмущений с бампом. Но при малых f_* и f_{esc} можно получить удовлетворительное согласие с наблюдаемым положением эпохи реионизации как при наличии, так и при отсутствии бампа.

Для примера на рис. 3 показан результат расчета в сравнении с данными EDGES (рис. 2 в Бовман и др., 2018).

Общим выводом настоящей работы, который может оказаться полезным в будущем по мере уточнения физики образования первых звезд и влияния их УФ-излучения, является сдвиг положения ямы поглощения на большие красные смещения. Положение минимума вместо $z \sim 17$ при наличии бампа (с указанными выше параметрами) перемещается на $z \sim 24$, а граница ямы поглощения смещается на еще большие красные смещения. Это означает, что наблюдения данной особенности в спектре поглощения в линии 21 см потребует при наличии бампа радионаблюдений с несколько большими длинами волн и соот-

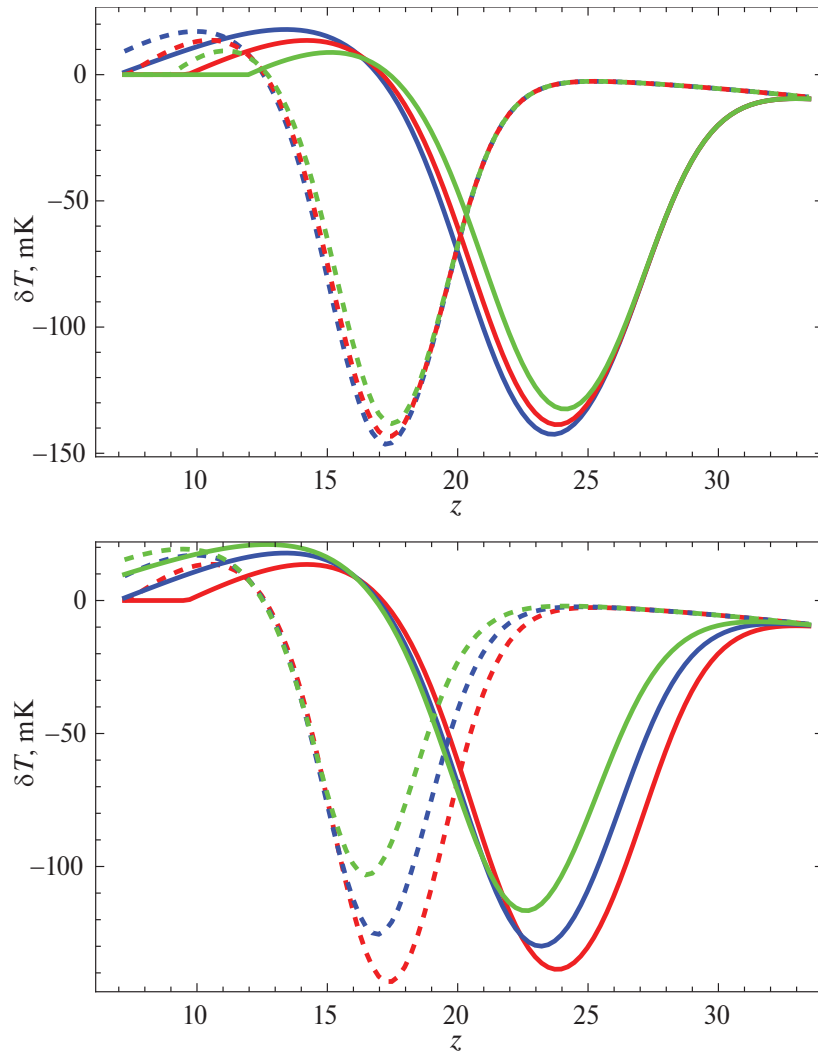


Рис. 2. Сдвиг температуры вследствие поглощения в нейтральном водороде. *Вверху:* Сплошные — при наличии бампа с $A = 20$, $k_0 = 4.69 \text{ Мпк}^{-1}$ и $\sigma_0 = 0.1$ (модель *gauss_1*), штрихованные кривые — без бампа (стандартная ΛCDM модель). Параметр $f_{\text{esc}} = 0.025, 0.05$ и 0.1 (синяя, красная и зеленая кривые соответственно). Во всех трех случаях $f_* = 0.1$. *Внизу:* То же, но для параметра $f_{\text{esc}} = 0.05$ и трех случаев: $f_* = 0.025, 0.05$ и 0.1 (зеленая, синяя и красная кривые соответственно).

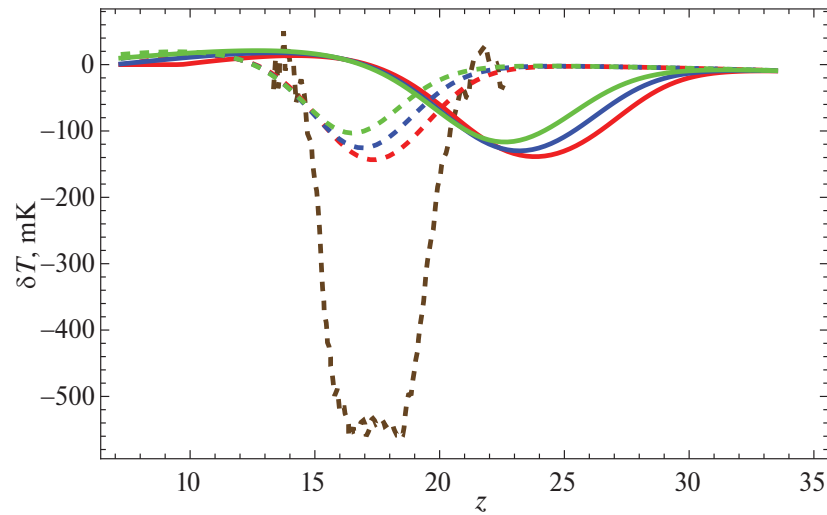


Рис. 3. Сравнение данных, полученных на радиотелескопе EDGES (коричневая штрихованная кривая, Бовман и др., 2018) и модельных расчетов с $f_{\text{esc}} = 0.05$ и $f_* = 0.025, 0.05$ и 0.1 .

ветствующих антенных устройств и алгоритмов фильтрации шумов, что в подобных наблюдениях представляет собой очень сложную и нетривиальную задачу. Если наблюдения в метровом диапазоне надежно покажут наличие ямы поглощения с некоторым положением ее границ и глубины, это представит принципиальную возможность для независимого точного определения спектра возмущений на масштабе маломассивных галактик, в которых рождались первые звезды. В этом случае актуальной теоретической проблемой останется уточнение различных физических процессов, связанных с барионной физикой: процессов формирования первых звезд, их свойств и процессов воздействия их УФ-излучения на нейтральный водород за пределами галактик.

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе исследовано поглощение реликтового излучения в линии 21 см нейтрального водорода в космологическую эпоху Темных веков при наличии дополнительной мощности (бампа) в спектре возмущений плотности. Мотивацией для модификации спектра и введения дополнительного бампа в работах Падманабхана и Лоуба (2023) и Ткачева и др. (2024a) послужило наблюдение телескопом им. Дж. Уэбба неожиданно большого числа ранних галактик. Бамп в спектре приводит к более раннему формированию галактик и тем самым может объяснять указанные наблюдения. Но, конечно, наличие бампа можно предполагать и независимо от наблюдений ранних галактик. Например, особенности в виде бампа возникают в некоторых моделях инфляции. Возникновение первичных черных дыр также связывают с возможностью существования бампов (см. обзор моделей в Иномата и др., 2023, и недавнюю работу Лукаша и Михеевой, 2025). В рамках известных ограничений, форма бампа и его расположение остаются пока свободными параметрами.

Исследование со сходными целями было проведено в (Наик и др., 2025), где также было проанализировано влияние бампа в спектре возмущений плотности на профиль линии 21 см. Однако наши подходы разнятся. Во-первых, амплитуда бампа, исследуемого в данной и наших более ранних работах (см. ссылки выше), примерно в 10 раз больше, чем в (Наик и др., 2025). Во-вторых, для построения функции масс гравитационно-связанных гало (галактик) в данной работе было выполнено численное моделирование, а не приближенные аналитические расчеты (формализм Пресса–Шехтера (Пресс, Шехтер, 1974) и его развитие в последующих работах (Шеф, Тормен, 2002)). Модель *gauss_1* как расширение стандартной космологической модели имеет конкретный статус — она лучше, чем стандартная модель, описывает обилие массивных галактик на больших z .

Поглощение в линии 21 см в эпоху Темных веков чувствительно ко многим процессам. Даже в рамках стандартной барионной физики остаются существенные неопределенности, связанные с образованием первых звезд и эффективностью воздействия их УФ-излучения на среду. Среди более экзотических процессов, повлиять на спиновую температуру и форму ямы поглощения 21 см могли бы, например, распад или аннигиляция частиц темной материи (Новосадный и др., 2024). В настоящей работе мы предполагаем стандартную микрофизику в эпоху Темных веков, а варьируем только спектр возмущений, предполагая наличие в нем дополнительного бампа в виде узкой гауссианы, как предполагалось в работе (Ткачев и др., 2024a). Помимо двух моделей с бампами, которые дали практически идентичные результаты в отношении линии 21 см, нами также был рассмотрен случай наличия в спектре возмущений плотности распределенного избытка в области малых масштабов (так называемые *голубые* спектры, а именно модель *b – tilt_k10* из Ткачев и др., 2024b). Однако в этом случае звезды образуются рано, и их излучение сильно ионизует и нагревает газ, в связи с чем поглощение в линии 21 см в модели *b – tilt_k10* отсутствует. Появление в гладком спектре возмущений плотности особенностей в виде широких или узких бампов обусловлено микрофизикой в эпоху формирования возмущений, т.е. формой инфляционного потенциала, которая пока не фиксируется однозначно в теориях элементарных частиц.

В отличие от работы Наика и др. (2025), для расчета процессов образования первых звезд мы используем не линейную теорию эволюции возмущений, заложенную в программном пакете 21CMFAST, а применяем результаты полномасштабного численного моделирования формирования ранних структур. Также, как было указано выше, мы используем существенно иную модель бампа с параметрами, необходимыми для объяснения наблюдений телескопа им. Дж. Уэбба. В качестве критерия отбора гало темной материи, в которых образуются первые звезды, используется критерий начала охлаждения газа при вириальной температуре $>10^4$ К. Тем не менее, наши расчеты на качественном уровне подтверждают вывод работы Наика и др. (2025) о том, что яма поглощения в линии 21 см сдвигается в сторону больших красных смещений из-за более раннего формирования структур и первых звезд, дающих УФ-излучение. Хотя на прямую сравнение с результатами Наика и др. (2025) невозможно из-за использования другой модели бампа.

В будущем, когда будут более детально прояснены механизмы образования первых звезд и реионизации Вселенной, поглощение в линии 21 см может стать точным инструментом для определения начального спектра возмущений в области масс, соответствующей галактикам. Наблюдения сигнала глобального поглощения можно будет проводить как на те-

лескопах болометрического типа, аналогичных телескопам EDGES, SARAS (Сингх и др., 2022), например с помощью проектируемого телескопа (де Лера Аседо, 2019), а также, возможно, на уже вводимых в строй и планируемых гигантских радиотелескопах типа Square Kilometre Array (SKA), особенно на их длинноволновых подсистемах. На данном этапе, однако, этот метод может давать лишь некоторые качественные и неокончательные выводы из-за наличия больших теоретических неопределенностей и проблем. Неопределенности касаются, в частности, эффективности образования первых звезд. Неопределенность в величине фракции барионов, коллапсирующих в звезды, f_* , вносит существенную неопределенность в расчеты поглощения в линии 21 см. Настоящая работа не претендует на точные количественные предсказания, а демонстрирует влияние бампа в спектре возмущений материи на результат.

Проблемой, которая имеет место даже без дополнительного бампа, является перепроизводство ионизирующих фотонов (Муноз и др., 2024). При наличии бампа и неизменных других параметрах, описывающих барионную физику, эпоха реионизации смещается в сторону еще больших красных смещений по сравнению с моделями без бампа, что без дополнительных модификаций модели вступает в противоречие с наблюдениям. Так же как и в случае без бампа (но более радикально), мы должны предполагать, что эффективность ионизации водорода была подавлена за счет неизвестного пока эффекта. Для прояснения данной ситуации требуются дальнейшие исследования в этом направлении. Также в качестве проблемы можно указать на несоответствие имеющихся наблюдательных данных телескопа EDGES по поглощению в линии 21 см расчетам глубины ямы поглощения. Данные EDGES показывают значительно большую глубину, чем дают теоретические расчеты (и без бампа и с бампом). А положение ямы поглощения на шкале красных смещений лучше соответствует модели без бампа. Необходимо, однако, отметить, что данные наблюдений EDGES о сильном поглощении не были подтверждены наблюдениями другого радиотелескопа SARAS 3, в которых яма поглощения была не видна (Сингх и др., 2022). В то же время, из-за больших погрешностей наблюдений, данные SARAS 3 не противоречат результатам расчетов глубины и положения ямы поглощения, представленным в настоящей работе, как при наличии бампа, так и без него. В связи с этим, глубина и положение ямы поглощения с точки зрения наблюдений еще далеко не выяснены, и здесь также требуются новые более точные исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Излучение первых звезд уменьшает спиновую температуру нейтрального водорода, что приводит к уси-

лению поглощения в линии 21 см. Сравнение космологических моделей с бампом в спектре возмущений плотности и без него показывает, что по положению частотного профиля поглощения можно определить вероятное положение бампа в спектре возмущений и тем самым реконструировать спектр космологических возмущений в масштабах $k > 1 \text{ Мпк}^{-1}$. Для проведенного анализа мы использовали результаты численного моделирования методом N-тел. Параметры бампа были выбраны так, чтобы соответствовать избытку галактик на $z \sim 10$, наблюдаемому телескопом им. Дж. Уэбба.

Мы обнаружили значительный сдвиг границы ямы поглощения при наличии бампа (рис. 2), что является чувствительным инструментом при восстановлении спектра мощности в малых масштабах. Наши расчеты качественно согласуются с выводом работы (Наик и др., 2025) о положении ямы поглощения на больших красных смещениях.

В ближайшем будущем ожидается ряд новых радиоастрономических наблюдений в метровом диапазоне длин волн на различных радиотелескопах. Если эти наблюдения позволят достаточно точно выявить яму поглощения и охарактеризовать ее границу, то это даст ценную информацию о форме спектра космологических возмущений плотности в ранней Вселенной. Поглощение в линии водорода 21 см при $z > 10$ является точным инструментом для построения космологической модели в малых масштабах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа В.Н. Лукаша, Е.В. Михеевой, С.В. Пилипенко и М.В. Ткачева выполнялась в рамках госзадания АКЦ ФИАН, работа Ю.Н. Ерошенко выполнялась в рамках госзадания по теме ИЯИ РАН. Авторы признательны рецензенту статьи за полезные замечания, улучшившие содержание работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баркана, Лоуб (R. Barkana and A. Loeb), *Astrophys. J.* **626**, 1 (2005).
2. Баркана (R. Barkana), *Nature* **555**, 71 (2018).
3. Бенвис и др. (H.T.J. Bevens, A. Fialkov, E. de Lera Acedo, W.J. Handley, S. Singh, R. Subrahmanyan, and R. Barkana), *Nature Astron.* **6**, 1473 (2022).
4. Бехрузи и др. (P.S. Behroozi, R.H. Wechsler, and H.-Y.Wu), *Astrophys. J.* **762**, 109 (2013).
5. Бехрузи, Силк (P. Behroozi and J. Silk), *MNRAS* **477**, 5382 (2018).
6. Блас и др. (D. Blas, J. Lesgourgues, and T. Tram), *JCAP* **07**, 034 (2011).
7. Бовман и др. (J.D. Bowman, A.E.E. Rogers, R.A. Monsalve, T.J. Mozdzen, and N. Mahesh), *Nature* **555**, 67 (2018).
8. Ваутхаузен (S. Wouthuysen), *Astron. J.* **57**, 31 (1952).
9. Гнедин, Шавер (N.Y. Gnedin and P.A. Shaver), *Astrophys. J.* **608**, 611 (2004).

10. де Лера Аседо (E. de Lera Acedo), *2019 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 0626–0629, doi: 10.1109/ICEAA.2019.8879199 (2019).
11. Жанг и др. (M. Zhang, B. Yue, Y. Xu, and A. Ferrara), *Astrophys. J.* **984**, 100 (2025).
12. Иномата и др. (K. Inomata, M. Braglia, and X. Chen), *JCAP* **4**, 011 (2023).
13. Лукаш В.Н., Михеева Е.В., *Письма в ЖЭТФ* **121**, 421 (2025).
14. Месингер и др. (A. Mesinger, S. Furlanetto, and R. Cen), *MNRAS* **411**, 955 (2011).
15. Монсалв и др. (R.A. Monsalve, A.E.E. Rogers, J.D. Bowman, and T.J. Mozdzen), *Astrophys. J.* **847**, 64 (2017).
16. Монсалв и др. (R.A. Monsalve, B. Greig, J.D. Bowman, A. Mesinger, A.E.E. Rogers, T.J. Mozdzen, N.S. Kern, and N. Mahesh), *Astrophys. J.* **863**, 11 (2018).
17. Монсалв и др. (R.A. Monsalve, A. Fialkov, J.D. Bowman, A.E.E. Rogers, T.J. Mozdzen, A. Cohen, R. Barkana, and N. Mahesh), *Astrophys. J.* **875**, 67 (2019).
18. Муноз и др. (J.B. Munoz, J. Mirocha, J. Chisholm, S.R. Furlanetto, and C. Mason), *MNRAS Lett.* **535**, L37 (2024).
19. Наик и др. (S.S. Naik, P. Chingangbam, S. Singh, A. Mesinger, and K. Furuuchi), *JCAP* **05**, 038 (2025).
20. Наф, Силк (B.B. Nath and J. Silk), *MNRAS* **327**, L5 (2001).
21. Новосадный и др. (B. Novosyadlyj, Y. Kulinich, and D. Koval), arXiv:2410.07380 [astro-ph.CO].
22. Падманабхан, Лоуб (H. Padmanabhan and A. Loeb), *Astrophys. J. Lett.* **953**, L4 (2023).
23. Пресс, Шехтер (W.H. Press and P. Schechter), *Astrophys. J.* **187**, 425 (1974).
24. Притчард, Лоуб (J.R. Pritchard and A. Loeb), *Rep. Progr. Phys.* **75**, 086901 (2012).
25. Притчард, Фурлането (J.R. Pritchard and S.R. Furlanetto), *MNRAS* **367**, 1057 (2006).
26. Сингх и др. (S. Singh, T.J. Nambissan, R. Subrahmanyam, N.U. Shankar, B.S. Girish, A. Raghunathan, R. Somashekar, K.S. Srivani, et al.), *Nature Astron.* **6**, 607 (2022).
27. Ткачев и др. (M.V. Tkachev, S.V. Pilipenko, E.V. Mikheeva, and V.N. Lukash), *MNRAS* **527**, 1381 (2024a).
28. Ткачев и др. (M.V. Tkachev, S.V. Pilipenko, E.V. Mikheeva, and V.N. Lukash), *Phys. Rev. D* **110**, 083530 (2024b).
29. Филд (G. Field), *Proc. IREE Aust.* **46**, 240 (1958).
30. Фурлането, Лоуб (S. Furlanetto and A. Loeb), *Astrophys. J.* **611**, 642 (2004).
31. Фурлането (S. Furlanetto), *MNRAS* **371**, 867 (2006).
32. Хирата (C.M. Hirata), *MNRAS* **367**, 259 (2006).
33. Шеф, Тормен (R.K. Sheth and G. Tormen), *MNRAS* **329**, 61 (2002).
34. Шпригел (V. Springel), *MNRAS* **364**, 1105 (2005).
35. Эйд и др. (P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, M. Arnaud, M. Ashdown, F. Atrio-Barandela, J. Aumont, C. Baccigalupi, et al.), *Astron. Astrophys.* **571**, A16 (2014).