

УДК 524.7

Е. А. Торбанюк¹, А. Ю. Иващенко²

¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03143
el.torbaniuk@gmail.com

²Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко
ул. Владимирская 64/13, Киев, 01601

Средняя прозрачность нейтральной межгалактической среды в линии L по данным спектральных наблюдений квазаров

Представлены результаты измерения средней прозрачности $\bar{F}(z)$ нейтральной межгалактической среды в линии L . Для этой задачи была использована выборка из 33 спектров квазаров высокого разрешения ($R = 5300...45000$), которые были отобраны из публично доступного архива Европейской Южной обсерватории с помощью инструмента виртуальной обсерватории. Для проведения континуума в каждом спектре вручную были отобраны точки с наибольшим значением потока в области L -леса, по которым была проведена интерполяция сплайн-полиномом. Полученные значения средней прозрачности $\bar{F}(z)$ были аппроксимированы с помощью степенного закона $\tau_{\text{эф}} = (1 - z)^{\alpha}$, где $\alpha = (4.4^{0.4}_{0.2}) \cdot 10^{-3}$, $\alpha = 3.278^{0.083}_{0.054}$ для значений, полученных методом усреднения $F(z)$ по шагам $z = 0.1$ и $\alpha = 10.6^{1.1}_{1.0} \cdot 10^{-3}$, $\alpha = 2.685^{0.081}_{0.071}$ — усреднением по всем спектрам. Результаты были сравнены с результатами предыдущих работ с использованием спектров квазаров низкого и среднего разрешения.

СЕРЕДНЯ ПРОЗОРИСТЬ НЕЙТРАЛЬНОГО МІЖГАЛАКТИЧНОГО СЕРЕДОВИЩА У ЛІНІЇ L ЗА ДАНИМИ СПЕКТРАЛЬНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ КВАЗАРІВ, Торбанюк О. О., Иващенко Г. Ю. — Представлено результати вимірювання середньої прозорості $\bar{F}(z)$ нейтрального міжгалактичного середовища в лінії L . Для цієї задачі було використано вибірку з 33 спектрів квазарів високого розділення ($R = 5300...45000$), які були відібрані з публічно доступного архіву Європейської Південної обсерваторії за допомогою інструмента віртуальної обсерваторії. Для проведення континууму в кожному спектрі вручну

були відібрані точки з найбільшим значенням потоку в області L -лісу, по яких було проведено інтерполяцію сплайн-поліномом. Отримані значення середньої прозорості $\bar{F}(z)$ були апроксимовані за допомогою степеневого закону $\tau_{\text{eff}} = (1 - z)^{\alpha}$, де $\alpha = (4.4^{0.4}_{0.2}) 10^{-3}$, $\tau_{\text{eff}} = 3.278^{0.083}_{0.054}$ для значень, отриманих методом усереднення $F(z)$ по кроках $z = 0.1$ та $\tau_{\text{eff}} = 10.6^{1.1}_{1.0} 10^{-3}$, $\tau_{\text{eff}} = 2.685^{0.081}_{0.071}$ — усередненням по всіх спектрах. Результати порівнювались з результатами попередніх робіт з використанням спектрів квазарів низького та середнього розділення.

THE MEAN TRANSMISSION OF THE NEUTRAL INTERGALACTIC MEDIUM IN THE L -LINE FROM A SAMPLE OF HIGH-RESOLUTION QUASAR SPECTRA, by Torbaniuk O., Ivashchenko G. — We present our measurements of the mean transmission $\bar{F}(z)$ of the neutral intergalactic medium in the L line. For this purpose we used the sample of 33 high-resolution ($R = 5300 \dots 45000$) spectra selected from the public available archive of the European Southern Observatory with the help of the Virtual Observatory tools. For continuum determination in each spectra the points with maximum flux in L -forest region were selected and fitted by spline. The obtained values of the mean transmission $\bar{F}(z)$ was fitted by power-law $\tau_{\text{eff}} = (1 - z)^{\alpha}$, where $\alpha = (4.4^{0.4}_{0.2}) 10^{-3}$, $\tau_{\text{eff}} = 3.278^{0.083}_{0.054}$ for averaging of the $F(z)$ over the redshift bins $z = 0.1$ and $\tau_{\text{eff}} = 10.6^{1.1}_{1.0} 10^{-3}$, $\tau_{\text{eff}} = 2.685^{0.081}_{0.071}$ for averaging over each quasar. The results were compared with those ones from previous studies of high- and low-resolution quasar spectra.

ВВЕДЕНИЕ

L -лес — это набор L -линий поглощения нейтрального водорода H I в спектрах квазаров, который является основным компонентом межгалактической среды в филаментах. Интенсивность f и наблюдаемая длина волны λ_{obs} этих линий определяют плотность нейтрального водорода в данной области поглощения и расстояние к этой области соответственно. Следовательно, пропускательность межгалактической среды в линии L (или прозрачность) равна $F(\lambda_{\text{obs}}) = f(\lambda_{\text{obs}})C(\lambda_{\text{rest}}, z)$, где C — первичный спектр квазара до поглощения его излучения в межгалактической среде. Использование данной величины даёт возможность воспроизвести пространственное распределение межгалактического нейтрального водорода, а уже с его помощью — распределение материи на межгалактических масштабах и эволюцию ионизации водорода. Для этого используется связь прозрачности с оптической толщиной: $\tau_{\text{eff}} = \ln(F)$. Величина средней прозрачности $\bar{F}(z)$ межгалактического нейтрального водорода определяет среднюю плотность H I для данного красного смещения z . Именно относительно неё вычисляются флуктуации прозрачности, которые характеризуют флуктуации плотности материи. Понятно, что точность определе-

ния флуктуаций, а следовательно, и двухточечных статистик их распределения (двухточечной корреляционной функции и спектра мощности флуктуаций прозрачности), зависят от точности определения величины $\bar{F}(z)$. Конечно, данная величина определяется не только средней плотностью материи, но и степенью ионизации вещества вдоль отдельно взятого луча зрения, около которого может оказаться яркая галактика. Именно поэтому усреднение величины $\bar{F}(z)$ проводится по частям спектров конечных размеров (которые соответствуют пространственным масштабам конечных размеров) и по многим лучам зрения, если это возможно.

В данном направлении уже было сделано достаточное количество исследований с использованием спектров разного разрешения с разных телескопов. Например, в работе [1] были использованы УФ-спектры с Космического телескопа имени Хаббла (FOS/HST), с помощью которых были найдены значения средней прозрачности на малых красных смещениях $0 < z < 0.95$. В работах [11, 13] величины средней прозрачности были получены на основе спектров квазаров высокого разрешения с УФ-визуального эшелле-спектрографа UVES (VLT) и эшелле-спектрометра высокого разрешения HIRES (телескоп Кека). В более поздних работах использовались большие каталоги спектров квазаров среднего разрешения с разных обзоров неба. Например, в работе [2] было использовано 6065 спектров квазаров из седьмого релиза Слоановского цифрового обзора неба (SDSS DR7), что позволило рассчитать величину средней прозрачности в широком диапазоне красных смещений $2.15 < z < 4.85$.

В нашей предыдущей работе [16] были собраны данные о значениях средней прозрачности \bar{F} для разных значений красного смещения, полученные в различных исследованиях. Данные показали, что хотя значения величины $\bar{F}(z)$ согласуются в пределах погрешности, и их можно аппроксимировать единственной гладкой кривой, в большинстве случаев разброс точек достаточно велик, особенно в диапазоне $1.5 < z < 3.0$, где сосредоточено наибольшее количество рассчитанных значений $\bar{F}(z)$. Следует отметить, что на $z < 1$ кривая приближается к единице, а при $z > 5$ — к нулю, то есть в раннюю эпоху почти весь межгалактический водород был ионизирован, в то время как в современную эпоху он нейтрален.

Одним из основных факторов, который влияет на точность определения величины $\bar{F}(z)$, есть точность проведения уровня континуума (т. е. воспроизведение первичного спектра квазара до поглощения его излучения в межгалактической среде) в спектрах отдельных квазаров. Как было показано в работе [16], сейчас нет стандартизированной методики определения уровня континуума в области L -леса в спектрах квазаров, прежде всего потому, что спектр каждого квазара всегда частично искажен поглощением межгалактической средой.

В настоящее время все методы определения континуума в области L -леса можно условно разделить на два основных. Первый — так называемый метод проведения континуума вручную, который использу-

ется в исследованиях спектров звезд; его применение возможно только в случае спектров высокого разрешения. Он заключается в отборе свободных от поглощения частей спектра «на глаз» и объединения их с помощью сплайн-полиномов. Конечно, такой метод редко учитывает какую-либо физику процесса, например форму линий излучения, и его результаты зависят от субъективного фактора. Второй метод — экстраполяция континуума с длинноволновой (свободной от L -леса) части спектра ($\lambda_{rest} > 121.5$ нм). В данном случае используется либо тот же самый спектральный индекс, что и в длинноволновой части спектра, либо другой (ближе к единице, что отвечает значениям, которые получены из УФ-спектров близких активных ядер галактик (АЯГ)). В некоторых работах [3, 5] также делаются попытки учитывать линии излучения. Использование точных модельных спектров на сегодня тоже не представляется возможным, поскольку современных знаний о физике АЯГ недостаточно для того, чтобы точно смоделировать спектр отдельно взятого квазара заданной массы и светимости.

Недостатки большинства методов определения уровня континуума обсуждались неоднократно [6, 10, 13, 15], но численная оценка разницы величины $\bar{F}(z)$, полученной разными методами определения континуума, была проведена в нашей работе [16], где показано, что разность значений прозрачности $\bar{F}(z)$ увеличивается от 5 % на $z = 2$ до 33 % на $z = 4.5$. Конечно, данный результат требует независимой проверки другими методами определения континуума. Поэтому задача данной работы состоит в создании собственной выборки спектров квазаров высокого разрешения из публично доступного архива Европейской Южной обсерватории (ESO), их обработке, получении зависимости $\bar{F}(z)$ и сравнении ее с данными литературных источников.

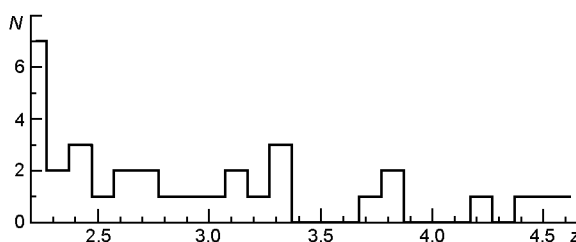
ВЫБОРКА

Для создания собственной выборки из работ [4, 7—9, 11—14] был проведен поиск квазаров с красным смещением $z > 2$, которые раньше использовались для исследования L -леса или других задач, и для которых были получены спектры с помощью спектрографов высокой разрешающей способности Южной Европейской обсерватории: эшелле-спектрометр высокой разрешающей способности (HIRES) и эшелле-спектрограф (ESI) на телескопе Кек, ультрафиолетово-визуальный эшелле-спектрограф (UVES), фокальный редуктор и спектрограф с низкой дисперсией (FORS2) на телескопе VLT и двойной эшелле-спектрограф (MIKE) на телескопе Магеллан. После этого все спектры, которые находились в свободном доступе в базе данных ESO, были отобраны с помощью программы для работы со спектроскопическими данными виртуальных обсерваторий VOSpec*.

В результате наша выборка состоит из 33 спектров, полученных на

* <http://www.sciops.esa.int/index.php?project=ESAVO&page=vospec>

Рис. 1. Распределение квазаров исследуемой выборки по значениям красного смещения



спектрографах и телескопах ESI/Keck (четыре спектра, $R = 5300$), MIKE/Magellan (два спектра, $R = 28000$), HIRES/Keck (восемь спектров, $R = 36000$), UVES/VLT (17 спектров, $R = 45000$) и FORS2/VLT (два спектра, $R = 10000$). Распределение квазаров нашей выборки по красным смещениям представлено на рис. 1, а основные характеристики спектров, такие как красное смещение z и среднее красное смещение L -леса \bar{z}_{for} , а также отношение сигнал-шум S/N , название спектрографа и его разрешающая способность R приведены в табл. 1.

МЕТОД

Первичная обработка. Поскольку для каждого объекта в базе ESO имеется несколько спектров, которые были получены в разные ночи (при этом за одну ночь было получено больше одного спектра), и для разных диапазонов длин волн, то сначала для каждого объекта все спектры были сшиты, усреднены и перебинированы с шагом в 0.01 нм. Погрешности потока вычислены как среднее квадратичное отклонение.

Была проведена процедура очистки спектров от теллурических линий и «плохих» пикселей с помощью программы для работы со спектрами DECH*.

Для оптимизации работы в области L -леса «плохие» пиксели (пиксели с отрицательным потоком) не выбрасывались, но при дальнейших расчетах они не учитывались.

Дополнительно вручную были очищены те части спектра, где проводилось вырезание теллурических линий, поскольку DECH автоматически не вырезает отсутствующие части спектра, а интерполирует их средним значением. Для оптимизации работы данный этап проводился только для области L -леса, поскольку длинноволновая область не была задействована в дальнейших расчетах.

Определение континуума. В каждом спектре вручную было отобрано от 15 до 30 точек с наибольшим значением потока в области L -леса. Для проведения континуума по отобраным точкам была проведена интерполяция сплайн-полиномом с помощью стандартной функции spline языка IDL. Следует отметить, что такое количество точек (с наибольшим значением потока) было отобрано специально,

* <http://www.gazinur.com/DECH-software.html>

Таблица 1. Характеристики спектров из собственной выборки

Название	z	$\bar{z}_{\text{лес}}$	Спектрограф	S/N	R
UM681	2.122	1.955	UVES	>70	45000
HE1341-1020	2.134	1.960	UVES	50	45000
UM680	2.144	1.981	UVES	>70	45000
Q0103-294a	2.150	1.973	FORS2	15	10000
Q0122-380	2.189	1.976	UVES	50	45000
PKS1448-232	2.220	1.994	UVES	50	45000
Q0102-2931	2.220	2.003	FORS2	15	10000
Q0237-233	2.240	2.006	HIRES	20...70	36000
HE0001-2340	2.280	2.022	UVES	50	45000
HE1122-1648	2.400	2.117	UVES	> 25	45000
Q0109-3518	2.406	2.118	UVES	50	45000
HE2217-2818	2.406	2.113	UVES	50	45000
Q0329-385	2.423	2.136	UVES	50	45000
Q2206-199N	2.570	2.295	HIRES	> 40	36000
HE1347-2457	2.617	2.329	UVES	> 25	45000
Q0453-423	2.657	2.399	UVES	50...70	45000
Q0449-1645	2.677	2.364	HIRES	8...70	36000
HE0151-4326	2.784	2.465	UVES	50...80	45000
HE2347-4342	2.880	2.559	HIRES	8...70	36000
Q0216+0803	2.980	2.578	HIRES	> 40	36000
HE0940-1050	3.083	2.950	UVES	60...90	45000
Q0420-388	3.117	2.782	UVES	60...100	45000
CTQ460	3.130	2.970	ESI	> 15	5300
Q2126-158	3.280	2.979	MIKE	> 10	28000
PKS2126-158	3.280	2.989	UVES	50...100	45000
Q0042-2627	3.289	2.893	HIRES	20...70	36000
Q0055-269	3.655	3.276	UVES	> 25	45000
PKS2000-330	3.780	3.394	MIKE	> 10	28000
Q1937-1009	3.805	3.406	HIRES	30...50	36000
PSS0209+0517	4.170	3.728	ESI	> 15	5300
BRI0952-0115	4.420	4.161	ESI	> 15	5300
PSS1723+2243	4.520	4.072	ESI	> 15	5300
Q2237-061	4.550	4.090	HIRES	> 40	36000

чтобы максимально снизить эффект занижения уровня континуума при использовании данного метода. Для примера на рис. 2 представлено два спектра квазара с определенным континуумом.

Расчет величины средней прозрачности. Если данные (спектр) представить в виде набора пикселей с наблюдательной длиной волны λ_i , плотностью потока f_i и шумом n_i , то возможно представить наблюдательную плотность потока f_i^j в i -м пикселе в области L -леса j -го квазара как

$$f_i^j = C(\lambda_{rest}) \bar{F}(z) (1 - \tau_{F,i}^j) n_i^j,$$

где λ_i — длина волны каждой линии поглощения L , которая произведена облаком межгалактического нейтрального водорода и связана с его красным смещением z_i формулой $\lambda_i = 121.567(1 + z_i)$, $C(\lambda_{rest})$ —

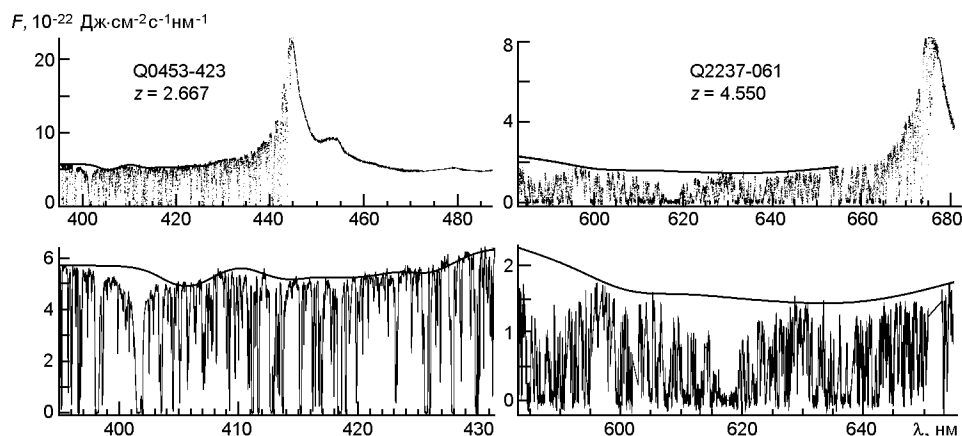


Рис. 2. Примеры квазаров Q0453-423 и Q2237-061 с определенным континуумом

уровень континуума (т. е. первичного спектра квазара), n — шум, \bar{F} — величина средней прозрачности межгалактической среды в линии L на заданном красном смещении, F — отклонение значения величины F от среднего. Для получения значений $\bar{F}(z)$ значения потока в каждом пикселе были поделены на значения раньше полученного континуума C и усреднены по набору пикселей (в одном или более спектрах) в заданном интервале красных смещений z . В данном случае усредненные величины $\langle \frac{j}{F,i} \rangle$ и $\langle n_i^j \rangle$ равны нулю.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Усреднение значений прозрачности как функции красного смещения проводилось двумя различными методами. Сначала для области L -леса рассчитывалась прозрачность в каждой точке спектра с наблюдательной длиной волны $\lambda_{obs,i}$, которой соответствует красное смещение $z_i = \lambda_{obs,i}/121.567 - 1$ как результат деления наблюдательного потока f_i на величину континуума C_i в данном пикселе, то есть $F_i = f_i / C_i$.

Следует отметить, что областью L -леса в данном случае считается только диапазон лабораторных длин волн $105 < \lambda_{lab} < 118$ нм, то есть область между линиями излучения L и L . Область с длинами волн короче длин волн $L = 102.5$ нм не рассматривается, так как она «загрязнена» лесом L и других линий серии Лаймана (при длинах волн короче длины волны конкретной линии серии), а крылья обеих линий отбрасываются обычно для уменьшения погрешности определения континуума. Более важной причиной исключения из рассмотрения коротковолновой части линии L является так называемый «эффект близости», который состоит в повышении ионизации среды в областях около квазара.

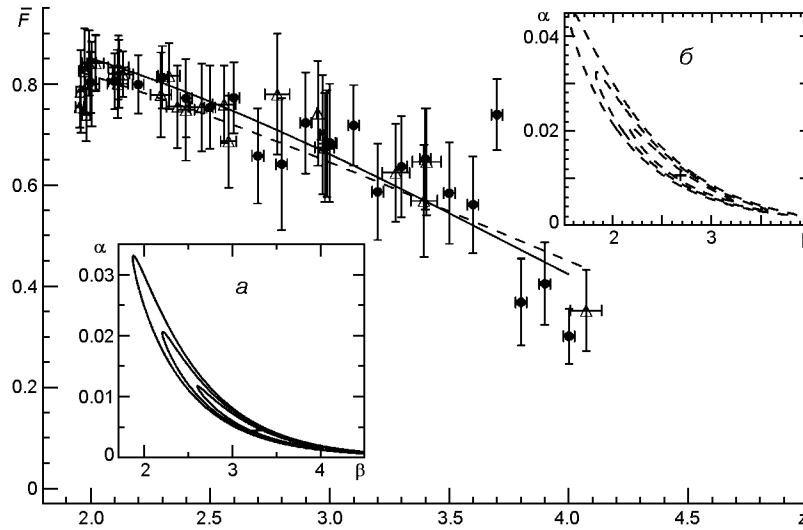


Рис. 3: *a* — полученные значения величин средней прозрачности для собственной выборки для случая усреднения по шагам $z = 0.1$ (точки и их аппроксимация сплошной линией) и по отдельным квазарам (светлые треугольники и их аппроксимация штриховой линией). Фрагменты *a*, *б* — уровни 1, 2, 3 функции максимального правдоподобия для первого и второго вариантов усреднения соответственно

Далее следует усреднение полученных значений F_i по нескольким диапазонам красного смещения. Есть два метода усреднения. В первом случае выбирается постоянная ширина шага (бина) красного смещения z , и усреднение производится по всем спектрам для заданного среднего красного смещения в пределах данного шага. Во втором методе усреднение производится по всему диапазону L -леса, который отвечает отдельному квазару, и в таком случае шаг намного больше. Для сравнения было проведено усреднение обоими методами. Для реализации первого метода был выбран шаг $z = 0.1$, и средние значения прозрачности определялись для красных смещений, вычисляемых по выражению $z_k = 2.0 + 0.1k - 0.05$, где $k = 0 \dots 21$. Погрешности \bar{F} были рассчитаны как среднее квадратичное отклонение.

Все полученные значения $\bar{F}(z)$ для двух вариантов усреднений были аппроксимированы с помощью степенного закона $\bar{F}(z) = \frac{\alpha}{1+z^\beta}$, где α и β — свободные параметры. Полученные значения $\bar{F}(z)$ для обоих вариантов усреднения и кривые оптимальной аппроксимации в сравнении представлены на рис. 3, где точки (круги) получены первым методом усреднения по шагам $z = 0.1$, а другие (треугольники) — вторым. Также здесь представлены уровни 1, 2, 3 функции максимального правдоподобия. На рис. 4 представлены полученные результаты в виде оптимальной аппроксимации с интервалом погрешности, а оптимальные значения полученных параметров приведены в табл. 2. Для лучшего визуального сравнения с другими результатами, которые получены на основе двух разных методов определения континуума, и детально описаны в работе [16], рис. 4 был ограничен

Рис. 4. Оптимальная аппроксимация и интервал погрешности для собственной выборки в случае усреднения по шагам $z=0.1$ (сплошные кривые F , F^- и F^+), а также аппроксимация [16] для метода определения континуума вручную (штрихи) и методом экстраполированного континуума (пунктиры)

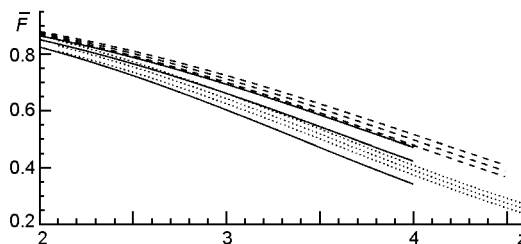


Таблица 2. Оптимальные значения параметров α , β для двух методов усреднения значений прозрачности межгалактической среды с значениями интервала погрешности Δz . Рассматривались значения $2.0 < z < 4.5$ для лучшего визуального сравнения

Метод усреднения	$\alpha \cdot 10^{-3}$	β	χ^2	d.o.f.
$z = 0.1$	$4.4^{+0.4}_{-0.2}$	$3.278^{+0.083}_{-0.054}$	23.17	18
Для каждого спектра	$10.6^{+1.1}_{-1.0}$	$2.685^{+0.081}_{-0.071}$	33.23	26

значением $z = 4.5$, где для исследуемой выборки максимальное значение средней прозрачности равно $\bar{F}(z = 4) = 0.42$.

ВЫВОДЫ

В работе составлена новая выборка из 33 спектров квазаров высокого разрешения из базы данных Европейской Южной обсерватории (ESO), на основе которой были получены значения средней прозрачности межгалактической среды $\bar{F}(z)$ на красных смещениях $2 < z < 4$ для двух методов усреднения по z . Полученные значения средней прозрачности межгалактического нейтрального водорода хорошо согласуются с результатами других исследований. Также полученные значения $\bar{F}(z)$ были аппроксимированы с помощью степенного закона $\bar{F}_{\text{эф}} = (1 - z)^{\alpha}$, где α и β — свободные параметры.

На рис. 4 видно, что несмотря на маленький размер использованной выборки наши результаты лежат в интервале погрешности $\pm 1\%$ с обеими кривыми, которые получены на основе метода определения континуума вручную (штриховая линия) и экстраполированного континуума (пунктирная линия). При детальном визуальном сравнении заметна тенденция увеличения разницы величины \bar{F} с увеличением красного смещения между собственными результатами и полученными другими авторами на основе других методов определения континуума. Так, на $z \sim 2$ разница значений \bar{F} , полученных в данной работе, в сравнении со значениями, полученными обоими методами определения континуума, составляет 1.5%. С увеличением красного смещения эта разница становится больше, например на $z = 3$ она составляет 2.7% между нашими оценками и значениями, полученными экстраполяцией континуума, и 7.2% — со значениями, полученными методом

определения континуума вручную. На максимальном красном смещении для исследуемой выборки ($z = 4$) эти разницы увеличиваются вплоть до 7.6 и 14.9 % соответственно. Это показывает, что полученные нами результаты в пределах погрешности согласуются с величинами, определенными по экстраполированному континууму (спектры среднего разрешения) на всем интервале красных смещений $2 < z < 4$, и наоборот, расходятся с величинами, полученными методом определения континуума вручную (спектры высокого разрешения). Такие различия значений $\bar{F}(z)$ вызваны прежде всего тем, что на $z = 3$ в области L -леса поглощение увеличивается настолько, что точность выбора непоглощенных областей, даже в спектрах высокого разрешения, очень снижается, что и приводит к занижению уровня континуума (т. е. завышению величины \bar{F}). Метод экстраполяции континуума, напротив, завышает уровень континуума (т. е. занижает уровень величины \bar{F}), так как в нем обычно используется спектральный индекс с длинноволновой части спектра, который далек от реального уровня континуума в исследуемой области. Оба метода имеют свои преимущества и недостатки, что и требует разработки новых методов определения континуума в области L -леса.

В данной работе были сделаны первые шаги в модернизации известных методов, поскольку при интерполяции проведения уровня континуума для исследуемой выборки выбиралось намного меньшее количество точек, чем в других исследованиях. Полученные результаты и их сравнение с результатами других авторов позволяет делать вывод, что использованный в данной работе метод есть средним между методами определения уровня континуума вручную и экстраполированного континуума.

Данная выборка спектров квазаров высокого разрешения и полученные результаты в дальнейшем будут использоваться для тестирования нового собственного метода определения континуума в спектрах среднего разрешения, который основан на использовании композитных спектров, созданных из спектров квазаров с одинаковыми значениями спектрального индекса и светимости.

Авторы признательны команде Виртуальной обсерватории Европейского центра астрономии (ESAVO), а также И. Б. Вавиловой за помощь в подготовке этой работы.

Работа выполнена в рамках Целевой программы космических исследований НАН Украины на 2013—2016 гг. и частично поддержана грантом SCOPES № IZ7370-152581 Швейцарского национального научного фонда.

1. Bahcall J. N., Bergeron J., Boksenberg A., et al. The Hubble Space Telescope quasar absorption line key project. I. First observational results, including Lyman-alpha and Lyman-limit systems // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1993.—**87**.—P. 1—43.
2. Becker G. D., Hewett P. C., Worseck G., Prochaska J. X. A refined measurement of the mean transmitted flux in the Ly forest over $2 < z < 5$ using composite quasar spectra // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2013.—**430**.—P. 2067—2081.

3. *Bernardi M., Sheth R. K., SubbaRao M., et al.* A feature at $z \sim 3.2$ in the evolution of the Ly forest optical depth // *Astron. J.*—2003.—**125**.—P. 32—52.
4. *Dall'Aglio A., Wisotzki L., Worseck G.* An unbiased measurement of the UV background and its evolution via the proximity effect in quasar spectra // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**491**.—P. 465—481.
5. *Desjacques V., Nusser A., Sheth R. K.* The probability distribution function of the Lyman transmitted flux from a sample of Sloan Digital Sky Survey quasars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—**374**.—P. 206—219.
6. *Fan X., Strauss M. A., Becker R. H., et al.* Constraining the evolution of the ionizing background and the epoch of reionization with $z \sim 6$ quasars. II. A sample of 19 quasars // *Astron. J.*—2006.—**132**.—P. 117—136.
7. *Faucher-Giguere C.-A., Prochaska J. X., Lidz A., et al.* A Direct precision measurement of the intergalactic Ly opacity at $2 < z < 4.2$ // *Astrophys. J.*—2008.—**681**.—P. 831—855.
8. *Hu E. M., Kim T.-S., Cowie L. L., et al.* The distribution of column densities and B values in the Lyman-alpha forest // *Astron. J.*—1995.—**110**.—P. 1526.
9. *Kim T.-S., Bolton J. S., Viel M., et al.* An improved measurement of the flux distribution of the Ly forest in QSO absorption spectra: the effect of continuum fitting, metal contamination and noise properties // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—**382**.—P. 1657—1674.
10. *Kim T.-S., Carswell R. F., Cristiani S., et al.* The physical properties of the Ly forest at $z > 1.5$ // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2002.—**335**.—P. 555—573.
11. *Kim T.-S., Cristiani S., D'Odorico S.* The Ly-alpha forest at $1.5 < z < 4$ // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**373**.—P. 757—781.
12. *Lu L., Sargent W. L. W., Womble D. S., Takada-Hidai M.* The Lyman-alpha forest at z approximately 4: Keck HIRES Observations of Q0000-26 // *Astrophys. J.*—1996.—**472**.—P. 509.
13. *McDonald P., Miralda-Escude J., Rauch M., et al.* The observed probability distribution function, power spectrum, and correlation function of the transmitted flux in the Ly forest // *Astrophys. J.*—2000.—**543**.—P. 1—23.
14. *Schaye J., Aguirre A., Kim T.-S., et al.* Metallicity of the intergalactic medium using pixel statistics. II. The distribution of metals as traced by C IV // *Astrophys. J.*—2003.—**596**.—P. 768—796.
15. *Songaila A.* The evolution of the intergalactic medium transmission to redshift 6 // *Astron. J.*—2004.—**127**.—P. 2598—2603.
16. *Torbaniuk O.* Influence of the continuum determination method on the mean transmission in the Ly forest // *Adv. Astron. and Space Phys.*—2016.—**6**.—P. 34—40.

Статья поступила в редакцию 26.07.16