

SDSS-IV MaNGA: ИСТОЧНИКИ ИОНИЗАЦИИ ДИФФУЗНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ НА БОЛЬШИХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ВЫСОТАХ

SDSS-IV MaNGA: IONIZATION SOURCES OF DIFFUSE EXTRA-PLANAR
GALACTIC GASEOUS MEDIUM

Докладчик: Постникова Вера Константиновна, ГАИШ МГУ, 632 группа

SDSS-IV MaNGA: ИСТОЧНИКИ ИОНИЗАЦИИ ДИФФУЗНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ НА БОЛЬШИХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ВЫСОТАХ

© 2023 г. В. К. Постникова^{1,2*}, Д. В. Бизяев^{3,1}

¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Физический факультет Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

³Обсерватория Апачи Поинт, Университет штата Нью Мексико,
Нью Мексико, США

Мы исследуем источники ионизации диффузного газа на различных галактических высотах в различных по звездной массе, светимости в $H\alpha$ и активности звездообразования галактиках. Для этого мы привлекаем данные релиза DR16 обзора SDSS-IV MaNGA и теоретические модели фотоионизации и ударной ионизации базы данных 3MdB. Наша выборка содержит 230 галактик, наблюдаемых точно с ребра, что делает результаты статистически значимыми и позволяет с помощью процедуры сложения спектров исследовать даже большие галактические высоты. С помощью диагностических диаграмм мы показываем, что для галактик всех исследуемых типов поведение диффузного ионизованного газа адекватно описывается моделями фотоионизации молодыми OB-звездами и горячими проэволюционировавшими маломассивными звездами. Однако, в галактиках со средними звездными массами или с низкими светимостями в $H\alpha$ или с пассивным звездообразованием ударные волны также могут вносить свой вклад в ионизацию. Для галактик всех исследуемых типов мы получаем, что поток излучения от OB-звезд и ионизационный параметр с высотой уменьшаются, а относительный вклад горячих проэволюционировавших маломассивных звезд в ионизацию увеличивается. При этом наибольшая разница вклада данных источников в ионизацию газовой среды наблюдается между галактиками с разной активностью звездообразования: проэволюционировавшие маломассивные звезды являются основным источником ионизации газа в галактиках с пассивным звездообразованием, тогда как в галактиках с активным звездообразованием OB-звезды являются определяющим фактором ионизации диффузной газовой среды.

Данные SDSS MaNGA

СПЕКТРЫ MaNGA

- Для исследования выборки галактик мы используем данные релиза DR16 спектрального обзора MaNGA проекта SDSS-IV. Обзор MaNGA выполнен на 2.5-метровом Слоановском телескопе обсерватории Апачи-Пойнт и обладает спектральным разрешением $R \sim 2000$ на длинах волн λ в интервале $3600\text{\AA} - 10300\text{\AA}$.



Данные SDSS MaNGA

ПРОЦЕДУРА МАСКИРОВАНИЯ ДЛЯ ВЫБРАННЫХ ГАЛАКТИК

- Для исключения влияния нежелательных пространственных пикселей (т.н. спакселей) для каждой галактики выборки мы применяем спаксельную маску. С ее помощью в спектроскопических кубах остаются только спектры спакселей, обладающих следующими характеристиками:
 - В рамках конвейерной обработки данных MaNGA для данного спакселя успешно проведено моделирование эмиссионного спектра
 - В рамках конвейерной обработки данных MaNGA для данного спакселя проведено определение скорости газа по по эмиссионным линиям
 - Отношение сигнала к шуму в линии H α для данного спакселя ≥ 3
 - Модуль скорости газа для данного спакселя относительно центра соответствующей ему галактики ≤ 400 км/с

Данные SDSS MaNGA

АНАЛИЗ ВЫБОРКИ

- Первоначальная выборка галактик, сформированная на основании визуального просмотра, содержит 271 галактику, видимую с ребра, наклон каждой из которых $\geq 85^\circ$. Однако, мы исключаем из выборки 41 галактику, имеющих одну или более из следующих проблем:
 - Попадание на IFU «соседей» (галактик-спутников, фоновых галактик, звезд), излучающих эмиссионные линии и не отсеивающихся посредством используемой маски
 - Попадание на IFU только центральной части галактики — такие галактики не представляют интереса с точки зрения исследуемой компоненты галактики
 - Несоответствие имеющихся фотометрических параметров галактик фактически наблюдаемой картине
- Итоговая выборка содержит 230 галактик.

Данные SDSS MaNGA

ПРОЦЕДУРА СЛОЖЕНИЯ СПЕКТРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ В ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЯХ

- Для 230 галактик итоговой выборки мы последовательно выполняем:
 - ✓ бинирование в рамках оптимальной схемы по каждому из трёх интегральных параметров галактик (этот этап пропускается при рассмотрении случая разбиения только по галактическим высотам),
 - ✓ бинирование в рамках оптимальной схемы по галактическим высотам,
 - ✓ исправление спектров за скорость относительно наблюдателя,
 - ✓ побиновое сложение спектров,
 - ✓ расчет интенсивностей в эмиссионных линиях,
 - ✓ корректировка полученных интенсивностей за поглощение, а также вычисление ошибок.

Данные SDSS MaNGA

ПРОЦЕДУРА СЛОЖЕНИЯ СПЕКТРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ В ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЯХ

- С целью улучшения SNR мы проводим процедуру сложения спектров многих галактик, предварительно проведя процедуру бинирования по:
 - Интегральной звездной массе галактики M_s
 - Нескорректированной за поглощение оценке светимости галактики $L_{H\alpha-R_{eff}}(r)$ в линии $H\alpha$ в пределах одного R_{eff} в фотометрической полосе r , в силу прямой пропорциональности используемую нами как индикатор темпа звездообразования SFR (star formation rate)
 - Удельный темп звездообразования галактики $sSFR$ (specific star formation rate), оцениваемый нами следующим образом: $sSFR = L_{H\alpha-R_{eff}}(r) / 10^{41.27} / M_s$,
 - Видимую нормированную высоту z/z_0 каждого спакселя галактики над плоскостью диска, приведенную к вертикальной экспоненциальной шкале высот $z_0 = 0.596 \cdot R_{eff} \cdot b/a$, где: R_{eff} — эффективный радиус, b/a — отношение малой и большой полуосей эллипса, аппроксимирующего изофоты данной галактики

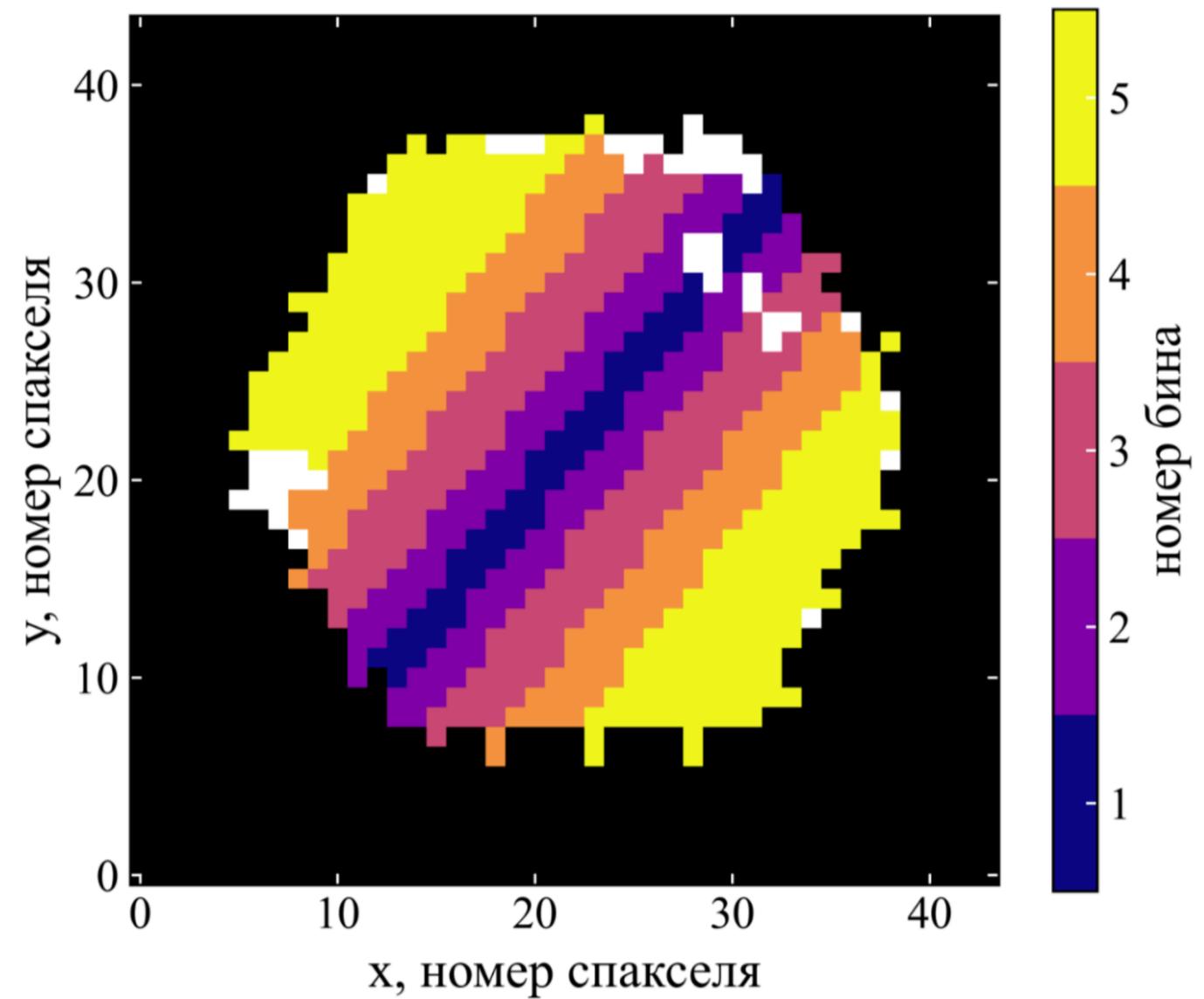
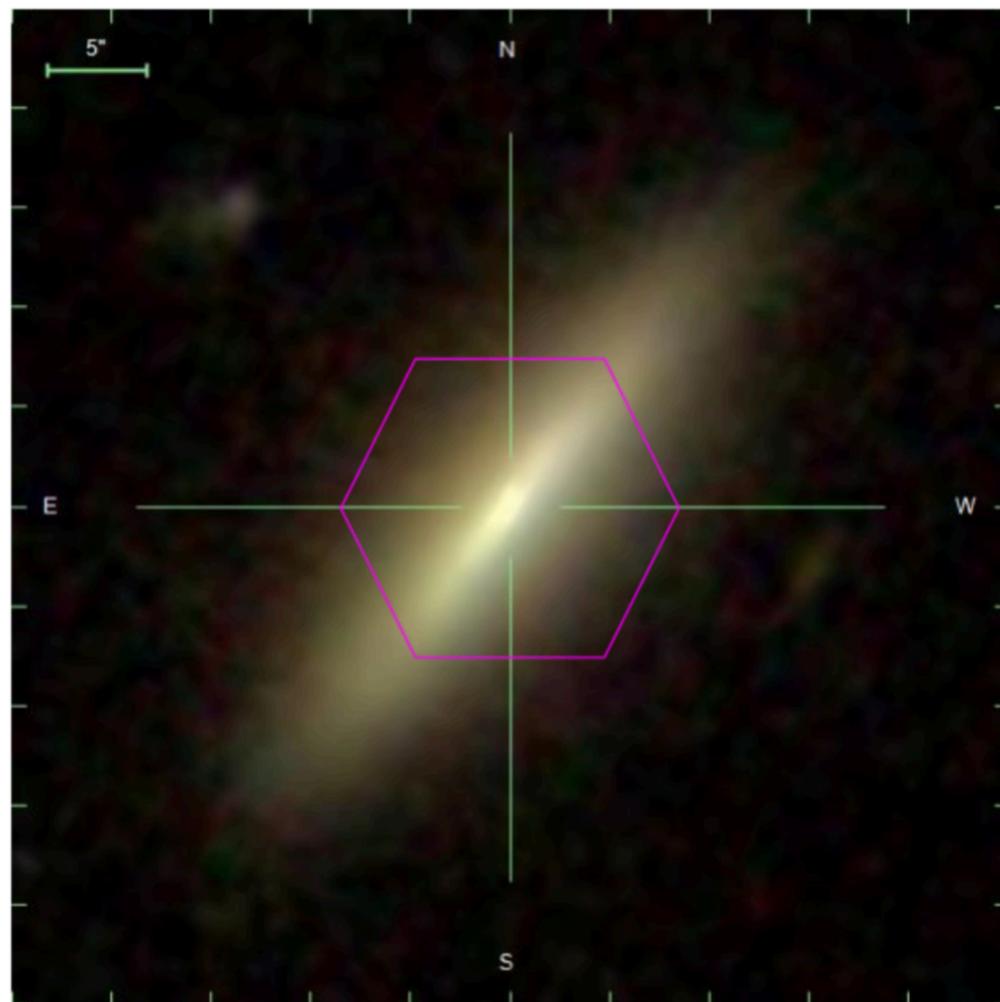


Рис. 2: Изображение одной из галактик выборки (слева) с границами IFU (пурпурный шестиугольник) и соответствующая карта бинов по высотам над плоскостью диска (справа) с учетом (белой) спаксельной маски.

Диагностические диаграммы и теоретические модели

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ 3MdB

- В качестве источника теоретических моделей было отдано предпочтение базам данных The Mexican Million Models database (3MdB):
 - База данных различных фотоионизационных моделей 3MdB-p, рассчитанных с помощью кода CLOUDY C13
 - Модели «DIG_HR» для описания DIG, в предположении, что источником ионизации являются взятые в различных соотношениях поля излучения OB-звезд и HOLMES — HOt Low-Mass Evolved Stars.
 - База данных моделей ударной ионизации 3MdB-s, рассчитанных с помощью кода MAPPINGS V
 - модели «Allen08» — пересчитанные с учетом новых возможностей модели, представленные в работе Аллена и др. (2008)

Диагностические диаграммы и теоретические модели

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ДИАГРАММЫ

- Сопоставление теоретических моделей и экспериментальных точек производится по трём классическим БПТ диаграммам:
 - $\lg([\text{OIII}]\lambda 5007)/\text{H}\beta$ vs $\lg([\text{NII}]\lambda 6584)/\text{H}\alpha$
 - $\lg([\text{OIII}]\lambda 5007)/\text{H}\beta$ vs $\lg([\text{SII}]\lambda\lambda 6716, 6731)/\text{H}\alpha$
 - $\lg([\text{OIII}]\lambda 5007)/\text{H}\beta$ vs $\lg([\text{OI}]\lambda 6300)/\text{H}\alpha$
- Экспериментальные данные интерполируются к сеткам теоретических моделей

Результаты

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОСТИ ВЫБРАННОЙ СХЕМЫ БИНИРОВАНИЯ (Статистическая обоснованность бинирования и его устойчивость)

- Мы достигли равномерного статически значимого заполнения галактиками бинов по параметрам галактик и по галактическим высотам:
 - В отсутствие разбиения по параметрам галактик, в наиболее высокий бин дают вклад около 30% галактик выборки
 - В присутствии разбиения по параметрам галактик, в каждый из трех наиболее высоких бинов дают вклад около 10% галактик выборки,
- Полученное бинирование устойчиво относительно числа галактик в выборке, числа бинов по высоте, а также границ бинов по высоте

Результаты

СЛОЖЕННЫЕ ГАЛАКТИКИ НА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ДИАГРАММАХ

- Далее мы рассматриваем, как различные по высоте над диском области галактик с различными значениями M_s , $L_{H\alpha}-R_{eff}(r)$ и **sSFR** ложатся на сетки фотоионизационных и ударных моделей.
- Отметим, что мы зафиксировали различные значения металличности газа $\Delta O/H$ и обилия азота $lg N/O$ у фотоионизационных моделей для различных галактик.

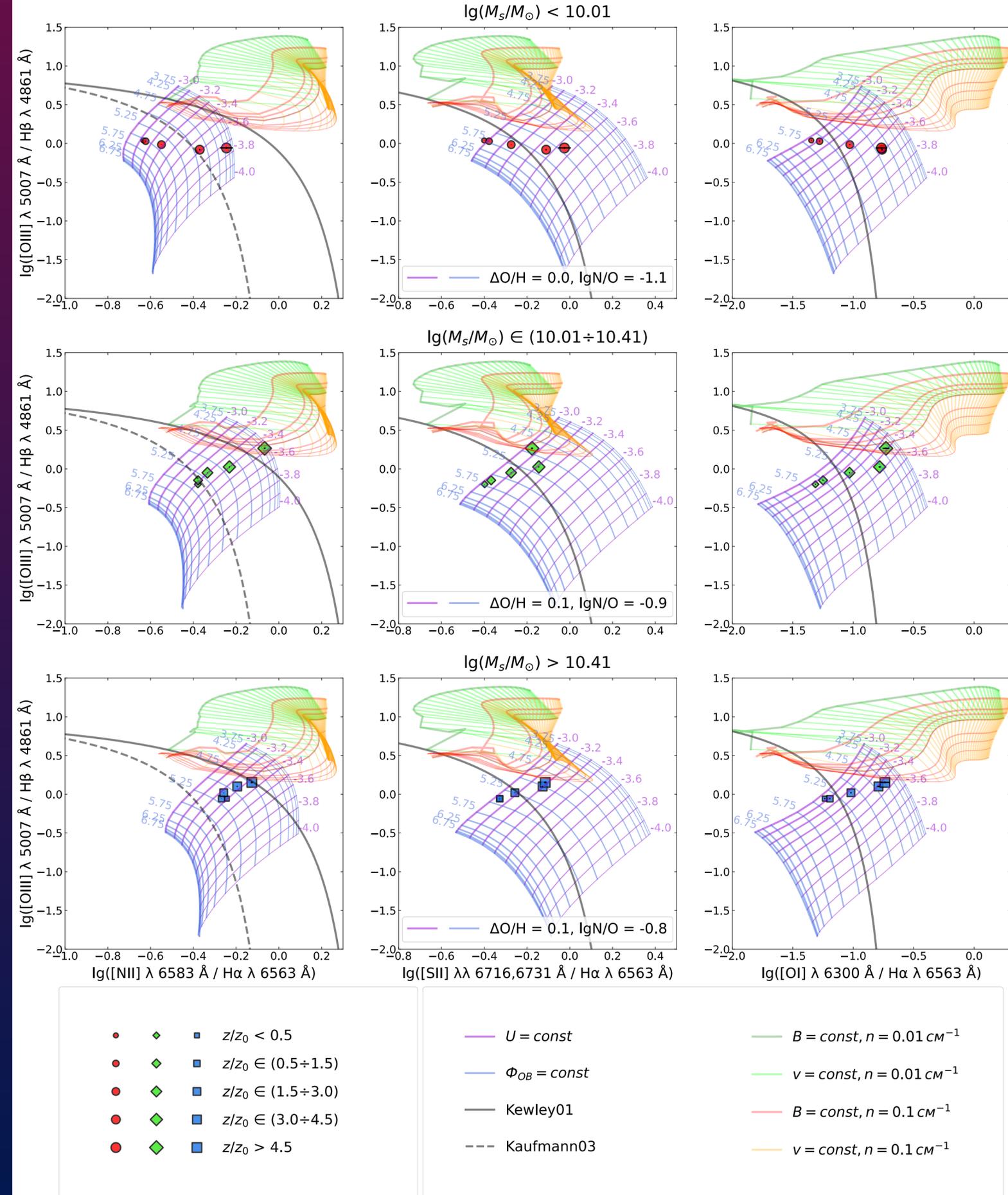
Результаты

СЛОЖЕННЫЕ ГАЛАКТИКИ НА

ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ДИАГРАММАХ

Рис. 3: БПТ-диаграммы для различных по высоте над диском областей галактик, различных по значениям M_s , вместе с моделями фотоионизации и ударной ионизации, а также демаркационными линиями, приведенными для сравнения с предыдущими работами. Чем больше размер маркера, тем больше галактическая высота соответствующей области. Красный цвет / круглая форма маркера соответствуют наименьшему значению M_s галактик, зелёный цвет / форма ромба — средней M_s , синий цвет / квадратная форма — наибольшей M_s . Фотоионизационным моделям соответствуют синие сетки, моделям ударной ионизации — красные и зелёные. Чем больше толщина линии сетки, тем больше значение соответствующего параметра. В контексте данного исследования нас интересует положение ударных моделей относительно моделей фотоионизации, но не интересуют конкретные значения параметров на сетках ударных моделей, поэтому соответствующие значения на диаграммах не приводятся.

- $U = \Phi_{total}/n_e/c$ - the ionization parameter
- $\Phi_{total} = \Phi_{OB} + \Phi_{HOLMES}$
- $\Phi_{HOLMES} = 8.4 \cdot 10^4 \text{ photons/s/cm}^2$ - const for all the models
- n_e - the electron density



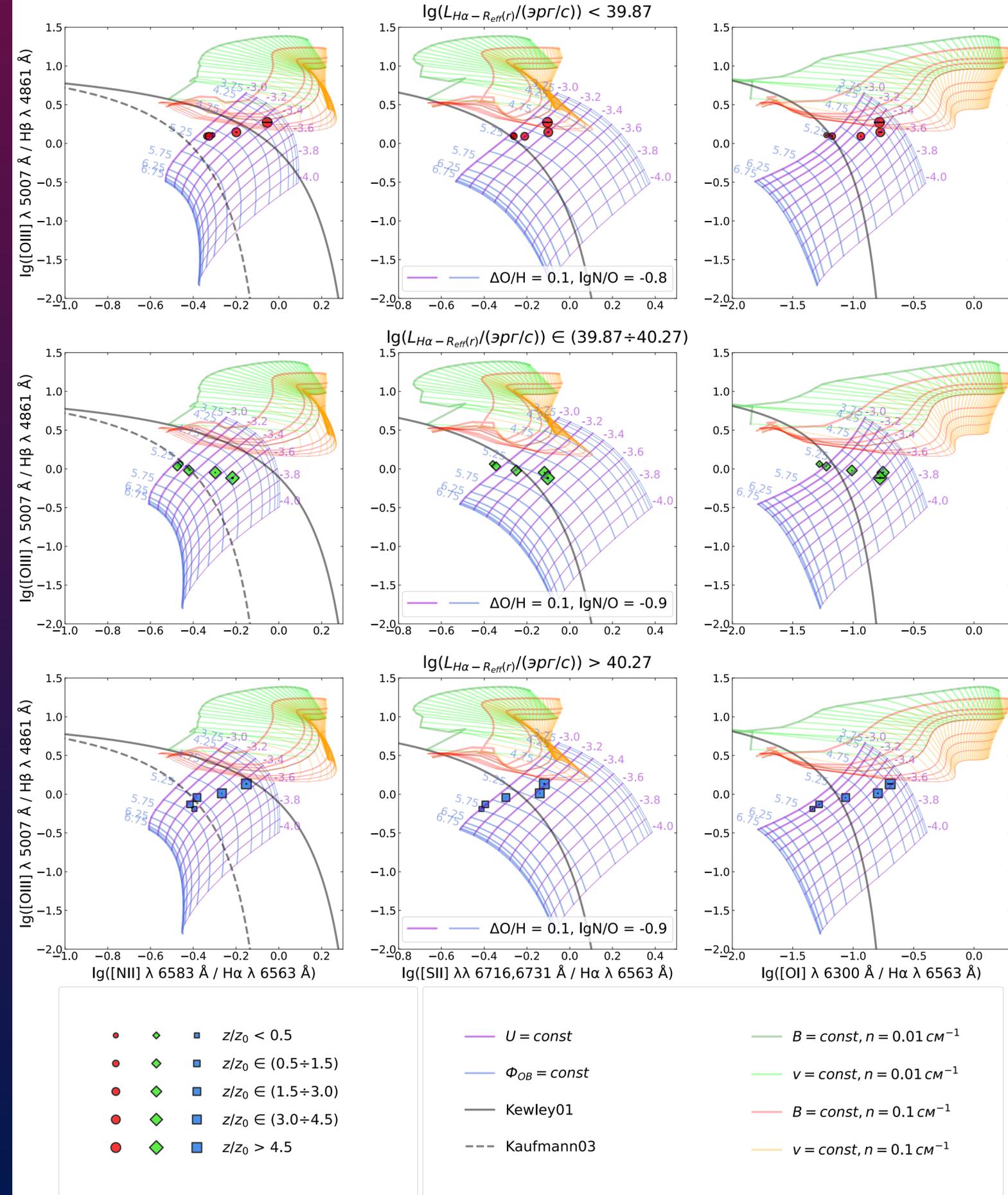
Результаты

СЛОЖЕННЫЕ ГАЛАКТИКИ НА

ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ДИАГРАММАХ

Рис. 4: БПТ-диаграммы для различных по высоте над диском областей галактик, различных по значениям $L_{H\alpha-R_{eff}(r)}$, вместе с моделями фотоионизации и ударной ионизации, а также демаркационными линиями. Обозначения — такие же, как на рис.3.

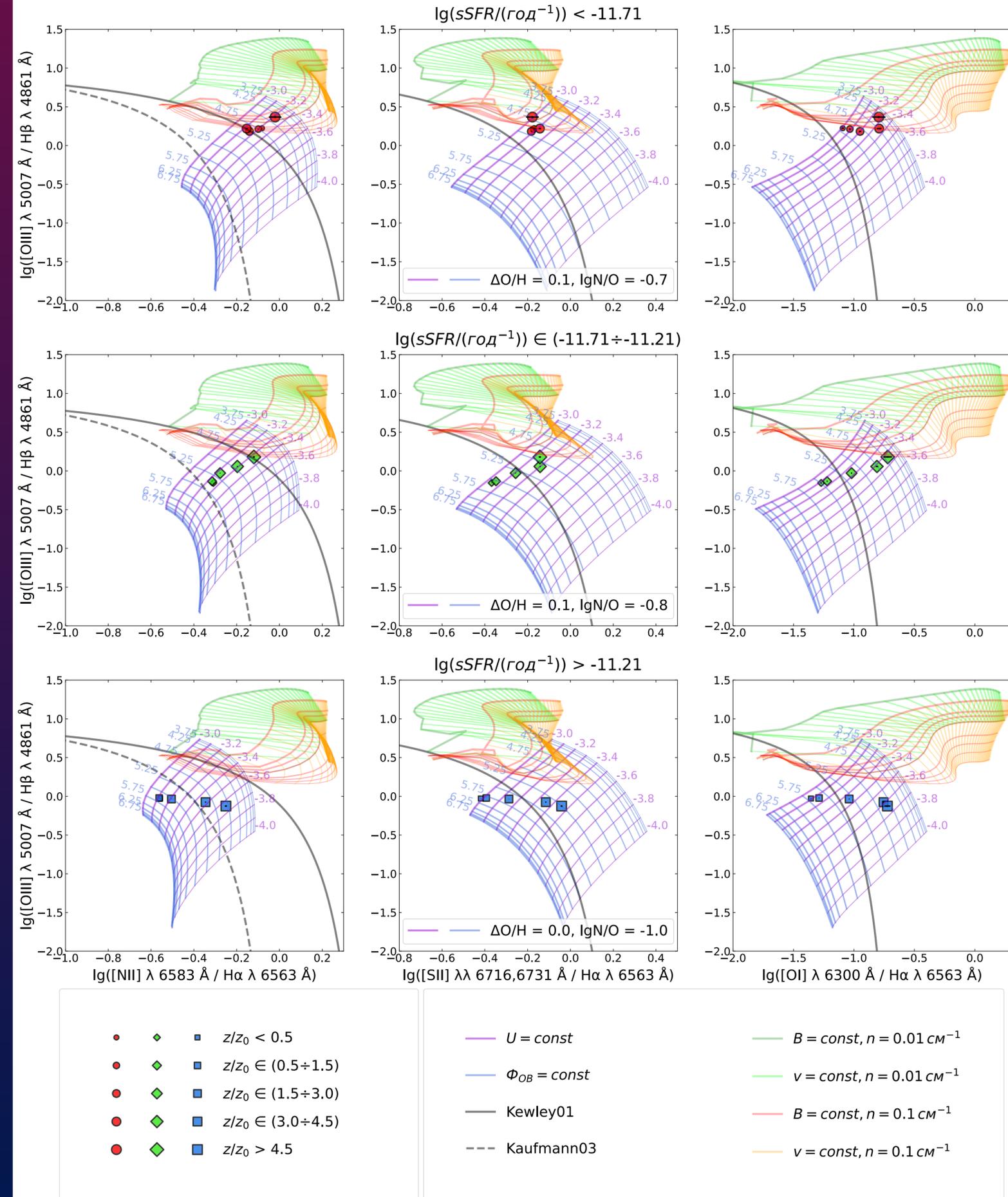
- $U = \Phi_{total}/n_e/c$ - the ionization parameter
- $\Phi_{total} = \Phi_{OB} + \Phi_{HOLMES}$
- $\Phi_{HOLMES} = 8.4 \cdot 10^4 \text{ photons/s/cm}^2$ - const for all the models
- n_e - the electron density



Результаты СЛОЖЕННЫЕ ГАЛАКТИКИ НА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ДИАГРАММАХ

Рис. 5: БПТ-диаграммы для различных по высоте над диском областей галактик, различных по значениям sSFR, вместе с моделями фотоионизации и ударной ионизации, а также демаркационными линиями. Обозначения — такие же, как на рис.3.

- $U = \Phi_{total}/n_e/c$ - the ionization parameter
- $\Phi_{total} = \Phi_{OB} + \Phi_{HOLMES}$
- $\Phi_{HOLMES} = 8.4 \cdot 10^4 \text{ photons/s/cm}^2$ - const for all the models
- n_e - the electron density



Результаты

СЛОЖЕННЫЕ ГАЛАКТИКИ НА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ДИАГРАММАХ

- Оценено влияние различных металличностей на тренд шоковых моделей
- Оценено положение галактик MW и NGC891 среди бинов по параметрам для сравнения с результатами

Результаты

ПОЛУЧЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

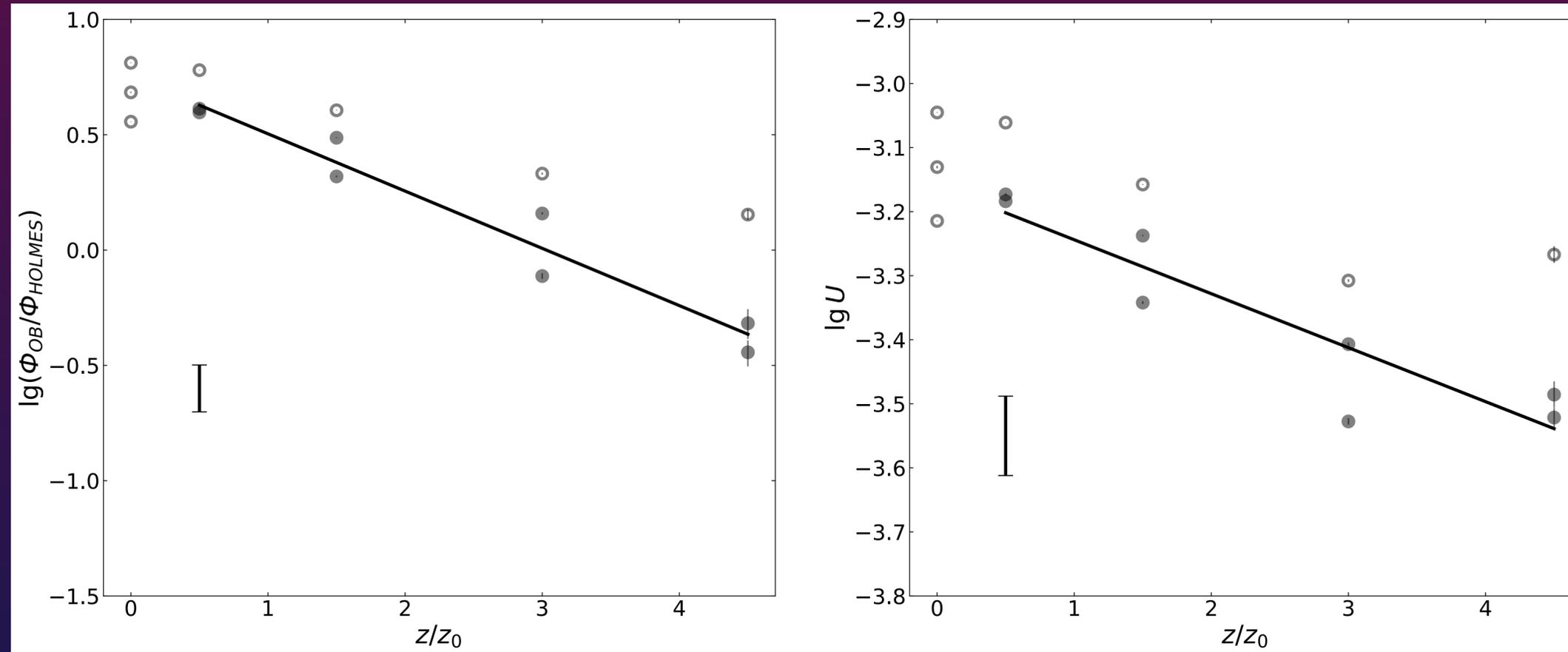


Рис. 6: Общий случай разбиения всех галактик на области различных высот без каких-либо дополнительных разбиений: наблюдаемое изменение отношения потоков от ОБ-звезд и HOLMES (слева) и ионизационного параметра (справа) с галактической высотой для всех галактик выборки по данным каждой из ВРТ-диаграмм (закрашенные и пустые маркеры) и линейная регрессия полученных зависимостей (линия и бар, показывающий характерный размер коридора ошибок в одно стандартное отклонение). Точки, обозначенные пустыми маркерами, в регрессии не участвуют (см. объяснение выше).

Результаты

ПОЛУЧЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

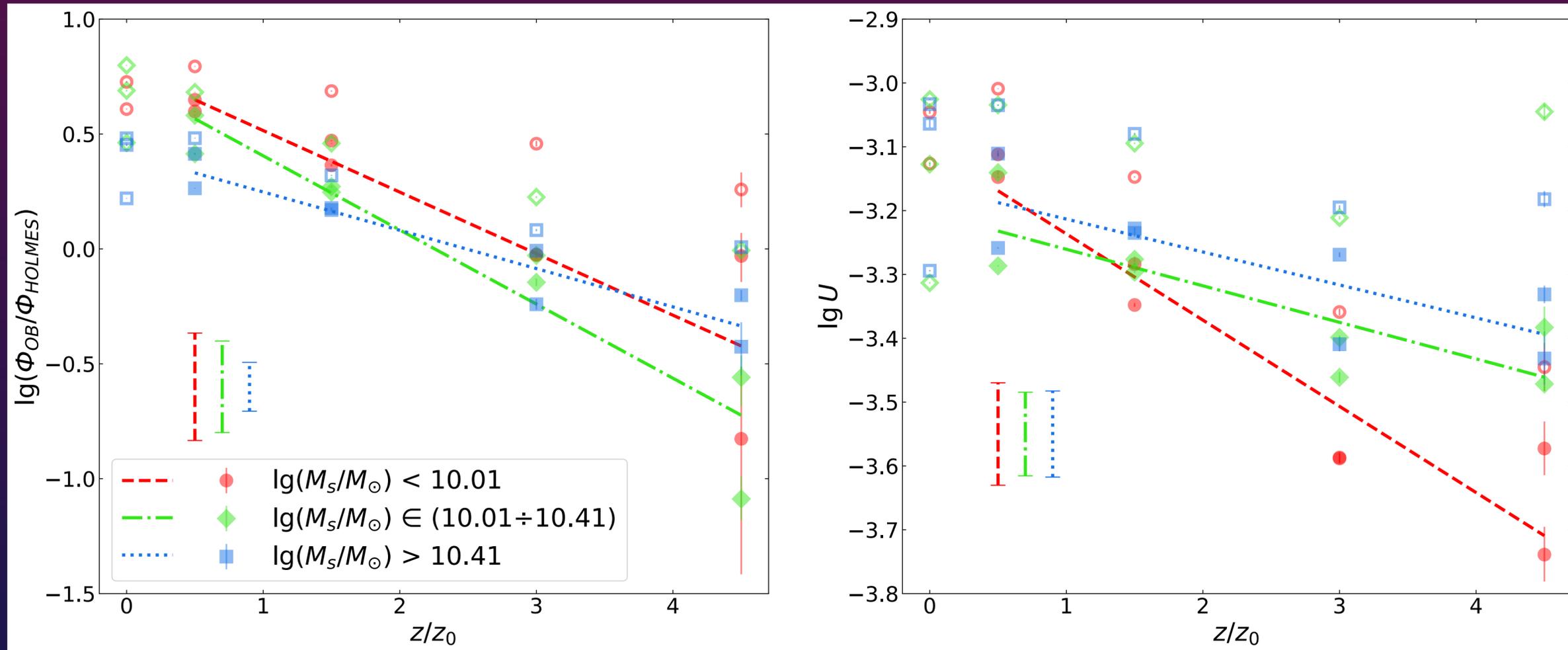


Рис. 7: Аналогично рис.6, но для случая дополнительного разбиения галактик по различным звездным массам M_s . Красный цвет / круглая форма маркера / пунктирная линия соответствуют наименьшему значению M_s галактик, зеленый цвет / форма ромба / штрих-пунктирная линия — средней M_s , синий цвет / квадратная форма маркера / линия из точек — наибольшей M_s .

Результаты

ПОЛУЧЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

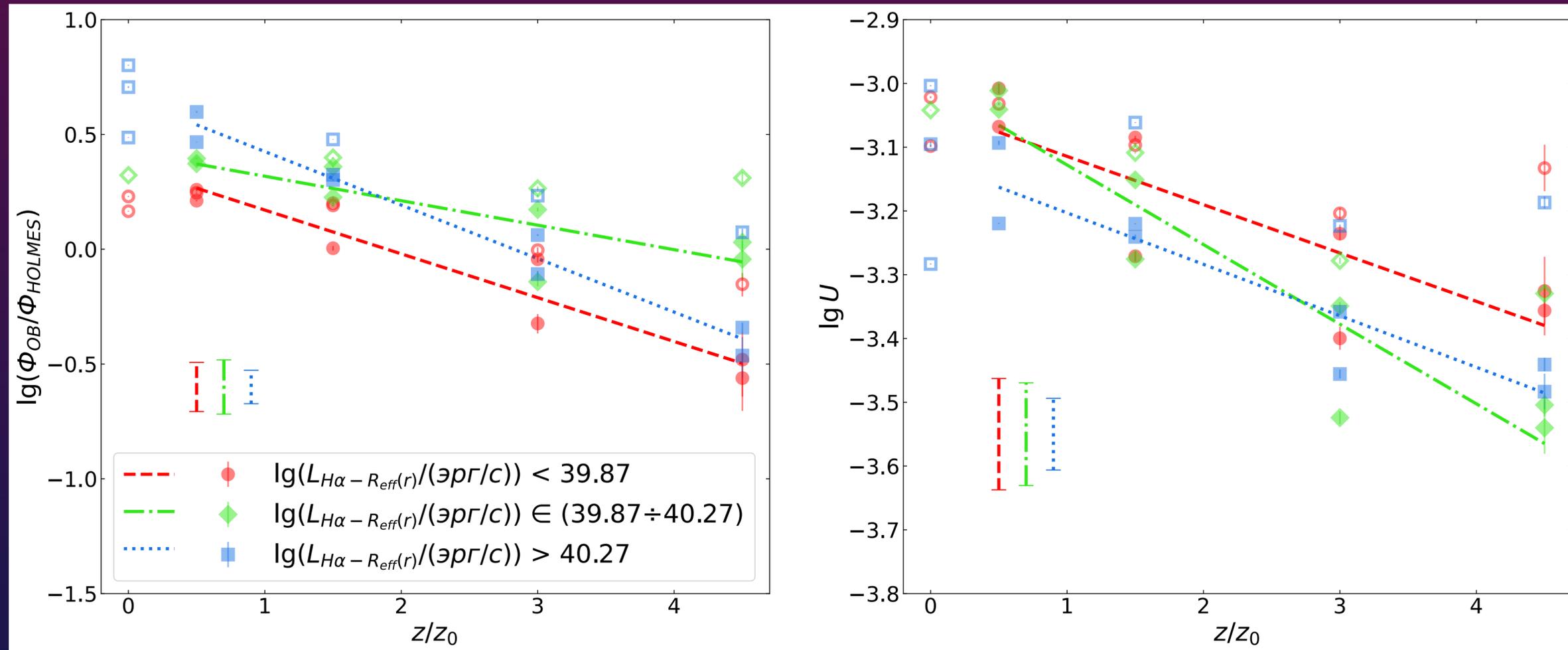


Рис. 8: Аналогично рис.7, но для разбиения галактик по различным светимостям $L_{H\alpha - R_{eff}(r)}$ в линии $H\alpha$ в пределах одного R_{eff} в фотометрической полосе r .

Результаты

ПОЛУЧЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

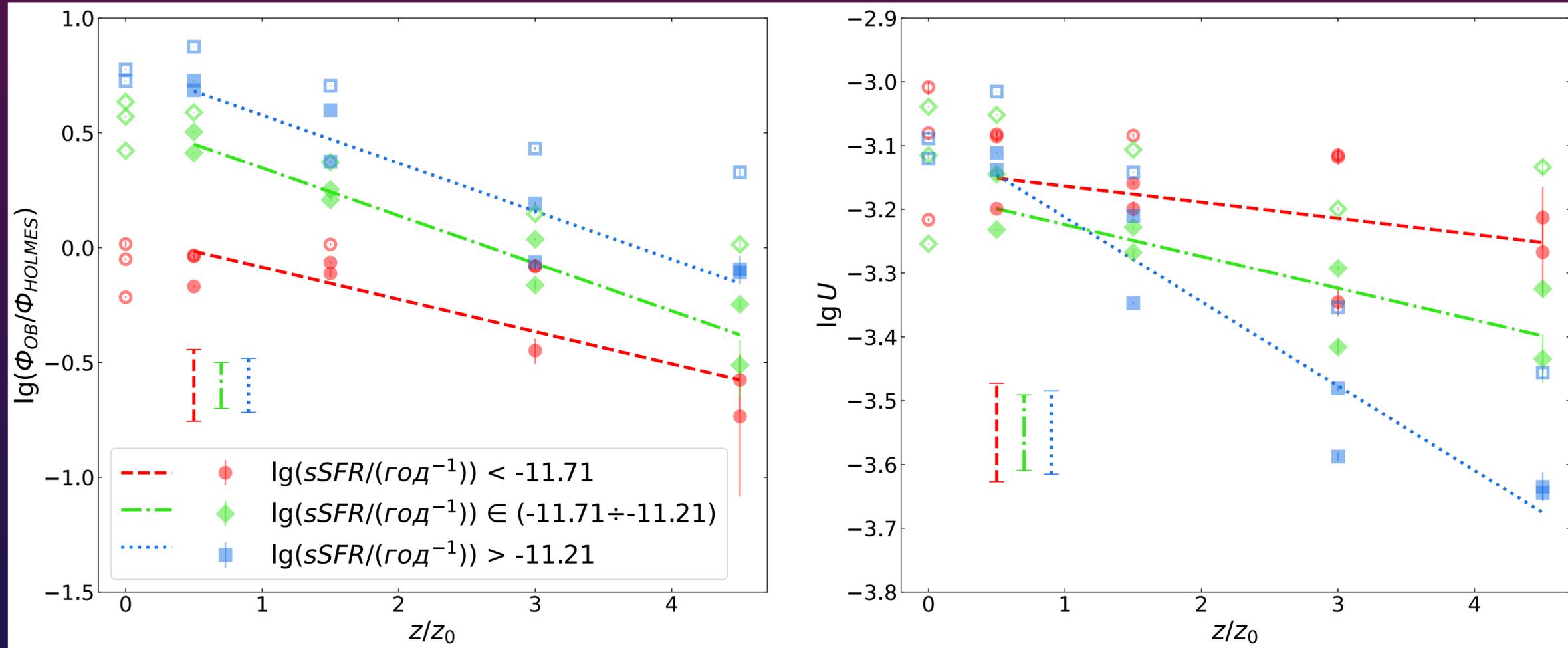


Рис. 9: Аналогично рис.7, но для разбиения галактик по различным удельным темпам звездообразования sSFR.

Спасибо за внимание!