

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені І. І. МЕЧНИКОВА

Кошмак Ігор Олександрович

УДК 524.52, 524.7, 524.78

**МОДЕЛЮВАННЯ СВІТІННЯ НИЗЬКОМЕТАЛІЧНИХ
ЗОН Н ІІ,
ЯКІ ОТОЧУЮТЬ ОБЛАСТІ СПАЛАХОВОГО
ЗОРЕУТВОРЕННЯ**

01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

ОДЕСА – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі астрофізики Львівського національного університету імені Івана Франка Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Мелех Богдан Ярославович,
Львівський національний університет імені Івана Франка
МОН України,
завідувач кафедри астрофізики

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор
Захожай Володимир Анатолійович,
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна МОН України,
професор кафедри астрономії;

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник, доцент
Вавилова Ірина Борисівна,
Головна астрономічна обсерваторія НАН України,
завідувач відділу позагалактичної астрономії
та астроінформатики.

Захист відбудеться «__» жовтня 2018 р. о __ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д41.051.04 Одеського національного університету імені І. І. Мечникова МОН України за адресою: 65023, м. Одеса, вул. Пастера, 27, ОНУ ім. І. І. Мечникова, Велика фізична аудиторія.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова за адресою: 65082, м. Одеса, вул. Преображенська, 24.

Автореферат розісланий «__» вересня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 41.051.04
доктор фізико-математичних наук



О. О. Панько

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

У даній дисертаційній роботі враховано еволюцію внутрішньої структури низькометалічних зон Н II у блакитних компактних карликових галактиках (БККГ) під час їх фотоіонізаційного моделювання світіння (ФМС). Виникнення цієї структури спричинено дією супервітру від центральної області зореутворення. Результати моделювання перевіряються на відповідність даним спектральних спостережень. На основі сітки мультикомпонентних фотоіонізаційних моделей світіння (МФМС) даних об'єктів отримано нові вирази для іонізаційно-корекційних множників (ІКМ), уточнено значення вмісту первинного гелію та темпу його збагачення у процесі зоряної хімічної еволюції речовини у Всесвіті.

Актуальність теми. Моделювання світіння низькометалічних зон Н II в БККГ відіграє важливу роль у таких актуальних задачах сучасної астрофізики, як вивід іонізаційно-корекційних множників для визначення хімічного вмісту в них з подальшим уточненням вмісту первинного гелію, синтезованого в епоху нуклеосинтезу Великого Вибуху, та темпу його збагачення. Також у даній дисертаційній роботі реалізується оптимальний, з точки зору швидкості розрахунків, підхід до поєднання ФМС даних об'єктів з гідродинамічним моделюванням еволюції їх внутрішньої структури на основі результатів еволюційно-популяційного синтезу області спалахового зореутворення.

Таке поєднання результатів гідродинамічного моделювання та еволюційно-популяційних симуляцій з ФМС зон Н II в БККГ дозволяє у найбільш коректний, на сьогоднішній день, спосіб отримати вирази для ІКМ, а отже, і найкоректніше визначити хімічний вміст даних об'єктів. Це, у свою чергу, дозволяє уточнити вміст первинного гелію та темп його збагачення. Порівняння результатів такого уточнення з відповідними даними, отриманими іншими авторами раніше, дозволяє зробити оцінку важливості врахування еволюції внутрішньої структури зони Н II у БККГ при визначенні їх хімічного вмісту.

Основна вимога у даній роботі під час аналізу результатів ФМС – відповідність модельних спектрів даним спостережень. Для виводу ІКМ використовували тільки ті моделі, сильні спектральні лінії яких лежать в області спостережуваних даних, отриманих в рамках Слоанівського цифрового огляду неба (англ. Sloan Digital Sky Survey — SDSS) (<http://www.sdss.org/>).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася в межах програм фундаментальних досліджень, які проводяться у Львівському національному університеті імені Івана Франка за наступними темами: “Астрофізичні системи на різних енергетичних і просторово-часових масштабах та ефекти квантування простору” (ФФ-63НР, номер державної реєстрації 0117U007190, 2017–2020 рр.); “Астрофізичні процеси на різних просторово-часових масштабах: порівняння моделей з даними спостережень” (ФА-71Ф, номер державної реєстрації 0118U003607, 2018–2020 рр.).

У всіх цих науково-дослідних темах автор дисертаційної роботи був виконавцем.

Мета, задачі та методи дослідження. Метою роботи є визначення фізичних характеристик та хімічного вмісту низькометалічних зон Н II в БККГ

модельними методами з урахуванням внутрішньої структури даних об'єктів та їх еволюції, спричиненої дією супервітру від області активного зореутворення. Ключовим при цьому є моделювання світіння зон Н II, оскільки в результаті отримується спектр туманності, який можна порівняти з даними спостережень.

Також метою даної роботи було дослідити вплив уточненого підходу до МФМС низькометалічних зон Н II у БККГ на визначення хімічного вмісту у цих об'єктах та, відповідно, на визначення вмісту первинного гелію і темпу його збагачення.

У рамках цієї роботи розв'язувалися такі задачі:

1. Побудова еволюційно-популяційних моделей областей спалахового зореутворення.
2. Розробка методу МФМС для врахування внутрішньої структури низькометалічної зони Н II, яка оточує область спалахового зореутворення.
3. Розрахунок сітки МФМС зон Н II у БККГ.
4. Перевірка відповідності розрахованих у рамках роботи модельних спектрів даним спостережень сильних емісійних ліній в зонах Н II, отриманим в рамках SDSS.
5. Оцінка впливу особливостей внутрішньої структури зон Н II на формування нестачі квантів у *Lyc*-спектрі.
6. Перевірка можливості формування ліній [Ne V] 3426 Å та He II 4686 Å всередині зон Н II.
7. Визначення впливу пилових зерен на розподіл фізичних параметрів та випромінювання важливих діагностичних ліній.
8. Виведення нових виразів для іонізаційно-рекомбінаційних множників (ІКМ).
9. Перевірка виразів для ІКМ на відтворюваність хімічного складу, заданого в МФМС.
10. Перевизначення хімічного вмісту низькометалічних зон Н II у БККГ за допомогою нових ІКМ.
11. Уточнення вмісту первинного гелію та темпу його збагачення в процесі зоряної хімічної еволюції речовини у Всесвіті.

Об'єкт дослідження: низькометалічні зони Н II в БККГ, які оточують області спалахового зореутворення.

Предмет дослідження: фізичні характеристики та хімічний склад низькометалічних зон Н II в БККГ, які оточують області спалахового зореутворення.

Методи дослідження: еволюційно-популяційний синтез областей зореутворення [34]; моделі Шевальє та Клегга витоку супервітру з області зореутворення [25]; гідродинамічна модель еволюції “бульбашки” зоряного вітру [26]; фотоіонізаційне моделювання світіння небулярних середовищ; порівняння сильних емісійних ліній модельних спектрів з даними SDSS; вивід виразів для ІКМ на основі усередненого модельного іонного вмісту у поєднанні з хімічним складом, заданим у моделях; визначення вмісту первинного гелію на основі хімічного складу реальних низькометалічних зон Н II в БККГ.

Наукова новизна. Вперше розроблено мультикомпонентний метод поєднання фотоіонізаційного моделювання світіння низькометалічних зон Н II у БККГ з гідродинамічними моделями Шевальє–Клегга [25] та Уівера–МакКрея–Кастора [26] еволюції внутрішніх структур, спричинених дією супервітру з області активного зореутворення.

На основі аналізу результатів МФМС зон Н II отримано підтвердження можливості формування нестачі квантів у діапазонах (1.8–4) Ryd, виявлене раніше за допомогою оптимізованого фотоіонізаційного моделювання світіння (ОФМС) даних об'єктів [27, 28], за рахунок проходження іонізуючого випромінювання від зір крізь компоненти бульбашки супервітру.

Вперше показано, що вищезгадані МФМС низькометалічних зон Н II пояснюють формування ліній [Ne V] 3426 Å та He II 4686 Å у компонентах супервітру на рівні спостережуваних інтенсивностей.

Вперше отримано вирази для ІКМ, за допомогою яких уточнено хімічний вміст зон Н II у БККГ на основі МФМС, які враховують їх внутрішню структуру та еволюцію, спричинену дією супервітру від області активного спалахового зореутворення.

Вперше на основі уточненого хімічного вмісту зон Н II у БККГ, при визначенні якого враховувалася еволюція внутрішньої структури даних об'єктів, визначено вміст первинного гелію (Y_p) та темп його збагачення (dY/dZ).

Практична цінність отриманих результатів. Розроблений метод мультикомпонентного фотоіонізаційного моделювання низькометалічної зони Н II, що оточує область спалахового зореутворення, можна використати:

1. Для дослідження фізичних характеристик та хімічного вмісту зон Н II з більшою металічністю, що допоможе більш детально та з більшою достовірністю дослідити градієнти хімічного вмісту елементів у спіральних галактиках;
2. Для розробки методу МФМС у циліндричній геометрії, що дозволить моделювати внутрішню структуру зон Н II зі значним обертовим моментом;
3. Для дослідження переносу іонізуючого випромінювання та формування емісійних лінійчастих і неперервних спектрів у бульбашках зоряного вітру, що оточують поодинокі O-, B- та WR-зорі, які характеризуються сильним зоряним вітром;
4. Для врахування внутрішньої структури планетарних туманностей та інших типів небулярних середовищ, після відповідної заміни моделей, що описують внутрішнє джерело іонізуючого випромінювання;
5. Для розрахунку сіток МФМС різних типів небулярних середовищ (з врахуванням модифікацій, згаданих вище) з метою визначення достовірніших ІКМ для них та, відповідно, для уточнення хімічного вмісту в них;
6. Для перевірки коректності застосування різноманітних діагностичних методів до визначення хімічного вмісту у зонах Н II та в інших небулярних середовищах.

Достовірність і обґрунтованість отриманих результатів. Усі модельні спектри, розраховані в роботі, порівнюються з результатами високоякісних

спектроскопічних спостережень зон Н II, отриманих в рамках огляду неба SDSS (<http://www.sdss.org/>). Тільки моделі, які дають інтенсивність сильних спектральних ліній в області спостережуваних значень, були використані для виведення нових виразів для ІКМ, з подальшим уточненням хімічного складу зон Н II у БККГ і, відповідно, вмісту первинного гелію та темпу його збагачення.

Для уточнення хімічного складу зон Н II у БККГ використано іонний вміст, знайдений Ізотовим та ін. [29, 30, 31, 32, 33], які отримали спостережувані спектри даних об'єктів на найбільших та найякісніших телескопах світу (4-метровий телескоп Мейолла (Kitt Peak 4 meter Mayall telescope), 2.1-метровий телескоп обсерваторії Кітт-Пік (Kitt Peak 2.1 meter telescope)), а для визначення вмісту іонів гелію вищезгаданими авторами враховувались такі важливі ефекти, як фонова зоряна абсорбція та перенесення в лініях He I, а також ударне збудження іонів гелію та гідрогену. Таким чином, для уточнення хімічного складу вищезгаданих об'єктів використовувалися надійно визначений Ізотовим та ін. [29, 30, 31, 32, 33] іонний вміст та нові ІКМ, отримані в даній роботі з результатів більш достовірних моделей, що враховують внутрішню структуру низькометалічних зон Н II та її еволюцію. Все це забезпечує достовірність значень вмісту первинного гелію та темпу його збагачення, отриманих у даній дисертаційній роботі.

Особистий внесок здобувача. У роботі [1] дисертант брав участь у розрахунку розподілу фізичних параметрів у каверні зоряного вітру; підготовці ілюстрацій до статті; аналізі результатів роботи. У роботах [2, 3, 4, 5, 6, 7] дисертант є першим автором. У роботі [7] брав участь у розрахунку фотоіонізаційних моделей світіння каверни зоряного вітру навколо поодинокі зорі; підготовці ілюстрацій до статті; аналізі результатів роботи; перекладі статті англійською мовою. У роботі [2] брав участь у розрахунку фотоіонізаційних моделей світіння зон Н II з врахуванням бульбашкоподібної структури; побудові спектрів лайманівського континууму; підготовці ілюстрацій до статті; аналізі результатів роботи. У роботі [3] брав участь у розрахунку мультикомпонентних фотоіонізаційних моделей світіння зони Н II з пилом та без пилу; проведенні порівняння безпилових та пилових моделей; підготовці ілюстрацій до статті; трактуванні результатів роботи. У роботі [4] брав участь у постановці задачі; розрахунку мультикомпонентних фотоіонізаційних моделей світіння низькометалічних зон Н II; формуванні таблиці, яка відображає різні типи нестач квантів у *Lys*-спектрі при різних значеннях вільних параметрів; підготовці ілюстрацій до статті; аналізі результатів роботи. У роботі [5] брав участь у постановці задачі; розрахунку мультикомпонентних фотоіонізаційних моделей світіння низькометалічних зон Н II навколо спалахів зореутворення; порівнянні результатів моделювання зі спостережуваними даними; підготовці ілюстрацій до статті; аналізі результатів роботи. У роботі [6] брав участь у постановці задачі; розрахунку мультикомпонентних фотоіонізаційних моделей світіння низькометалічних зон Н II навколо спалахів зореутворення різних мас; підготовці ілюстрацій до статті; виведенні нових іонізаційно-корекційних множників; уточненні вмісту первинного гелію; аналізі результатів роботи; пе-

рекладі статті англійською мовою.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися на численних наукових конференціях, наведених нижче:

- Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “Еврика-2009, 2010, 2012, 2013” (Львів, 2009, 2010, 2012, 2013 pp.);
- 17, 18, 19, 20, 24, 25th Open Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics (Київ, 2010, 2011, 2012, 2013, 2017, 2018 pp.);
- 13, 17th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology” (Одеса, 2013, 2017 pp.);
- The International Research and Practice Conference “FOSS Lviv-2013” (Львів, 2013 p.);
- Шоста, сьома, восьма міжнародна наукова конференція пам’яті Б. Т. Бабія “Вибрані питання астрономії та астрофізики (Львів, 2011, 2014, 2016 pp.).

Матеріали дисертаційної роботи доповідалися на семінарах Астрономічної обсерваторії і кафедри астрофізики Львівського національного університету імені Івана Франка, а також на семінарі Астрономічної обсерваторії Одеського національного університету імені І. І. Мечникова.

Публікації. Результати викладені в 24 публікаціях, з яких 6 [1, 2, 3, 4, 5, 6] – статті в спеціалізованих реферованих журналах “Кинематика и физика небесных тел”, “Журнал фізичних досліджень”, “Advances in Astronomy and Space Physics”, 1 [7] – стаття в науковому журналі “Advances in Astronomy and Space Physics” (у 2012 році цей журнал ще не був включений у перелік фахових видань, затверджених Департаментом атестації кадрів МОН України), 17 [8–24] тез міжнародних та вітчизняних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, оглядового розділу, чотирьох оригінальних розділів, висновків, списку використаних джерел, який містить 81 найменувань, та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 154 сторінок. Дисертація містить 65 рисунків та 3 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** подано коротку характеристику дисертаційної роботи, обґрунтовано актуальність її теми, показано зв’язок роботи із науковими програмами, сформульовано мету, задачу та пояснені методи дослідження, вказано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, доведено достовірність та обґрунтованість отриманих результатів, показано особистий внесок здобувача, зазначено відомості щодо апробації результатів дисертації, наведено публікації результатів досліджень, вказано структуру та обсяг дисертації.

Розділ 1 “Огляд попередніх досліджень та постановка задачі” присвячено огляду праць Ізотова та ін. у період з 1994 до 2007 pp. з дослідження низькометалічних зон Н II у БККГ, відзначено важливу роль цих об’єктів у задачі визначення вмісту первинного гелію Y_p . Описано історію визначення Y_p та темпу його збагачення (dY/dZ) в процесі зоряної хімічної еволюції речовини з розширенням вибірки зон Н II у БККГ. Коротко описано діагностичні

методи та іонізаційно-корекційні множники (ІКМ), які використовувалися Ізовим та ін. у 1994–2007 рр. для визначення хімічного вмісту як гелію, так і важких хімічних елементів у цих об'єктах. Показано роль фотоіонізаційного моделювання світіння зон Н II для виводу ІКМ, а також відзначено, що такі моделі не враховують особливостей внутрішньої структури зон Н II, які оточують області зореутворення, а тому є такими, що потребують перевірки. Також зроблено огляд попередніх Львівських моделей та ІКМ для зон Н II у БККГ, а також не-ІКМ підхід визначення хімічного складу та фізичних характеристик, включно з *Lyc*-спектром іонізуючих джерел, деяких з цих зон Н II, який базується на пошуку оптимальних фотоіонізаційних моделей світіння (ОФМС) даних об'єктів. Відзначено, що у багатьох випадках *Lyc*-спектри, отримані з ОФМС, характеризуються “провалами”, які можна пояснити перенесенням іонізуючого випромінювання крізь компоненти супервітру. Згадано також попередні мультикомпонентні моделі, які, однак, потребують уточнення в описі фізичних умов в області вільного розширення супервітру. Зроблено постановку задачі дисертаційної роботи, у якій виділено основні напрями досліджень, отримані на основі вищезгаданого критичного огляду літературних джерел.

У розділі 2 “Еволюційно-популяційні моделі області спалахового зореутворення” розглянуто методику моделювання областей зореутворення. На початку розділу наведено теоретичні основи такого моделювання, зокрема розглянуто два граничні сценарії процесу зореутворення: спалахове та, відповідно, неперервне формування зір. Описано вхідні параметри для побудови еволюційної сітки моделей областей спалахового зореутворення при врахуванні різноманітних еволюційних треків зір. Для такого моделювання використано еволюційно-популяційний код *Starburst99* [34], в процесі розрахунків використано найновіші, на сьогоднішній день, еволюційні треки *Geneva v40*, які враховують, обертання WR-зір в області зореутворення. У результаті цього моделювання була отримана еволюція наступних параметрів: суперпозиція зоряних *Lyc*-спектрів; загальна кількість іонізуючих квантів, що випромінюються областю зореутворення; хімічний вміст елементів, що надходять в оточуючу область у результаті дії супервітру та вибухів наднових; темп втрати маси спалахом зореутворення; механічна світність супервітру. Ці дані були використані, як вхідні для подальшого мультикомпонентного фотоіонізаційного моделювання світіння низькометалічних зон Н II.

У розділі 3 “Мультикомпонентне фотоіонізаційне моделювання світіння низькометалічних зон Н II” описано процедуру фотоіонізаційного моделювання зон Н II. Також наведено основи фотоіонізаційного моделювання, яке враховує фотоіонізацію, спричинену квантами прямого та дифузного випромінювання. Показано переваги найпопулярнішої для ФМС небулярних середовищ програми *Cloudy* [35], яку використано у подальших дослідженнях в якості базової. Далі описано бульбашкоподібну структуру небулярного середовища зони Н II (рис. 1), яка лежить в основі даного мультикомпонентного ФМС, та описано вільні параметри моделювання: вік спалаху зореутворення, концентрація гідродинамічно незбуреної складової зони Н II та хімічний вміст

елементів у зовнішніх компонентах зони Н II.

У **підрозділі 3.4** розглянуто моделювання фізичних умов у компонентах цієї “бульбашки” супервітру. Зокрема, у першому компоненті – в області вільного розширення супервітру, розподіли температури та концентрації задавалися згідно теорії області супервітру Шевальє та Клегга [25], а хімічний вміст елементів брався таким самим, як у спалаху зореутворення. У другому компоненті моделювання – каверні супервітру, області низької концентрації, яка термалізована зворотною ударною хвилею супервітру, розподіли концентрації, температури та швидкості розширення задавалися з урахуванням теорії каверни зоряного вітру Уівера, МакКрея, Кастора та ін. [26]. Для цієї оболонки хімічний вміст елементів розраховувався

як суміш хімічних вмістів першого та третього компонента, усереднених за масою (за рахунок випаровування речовини третього компонента у другий). Зовнішніми компонентами зони Н II були: третій компонент – область найбільшої густини (являє собою виметений прямою ударною хвилею супервітру газ, що оточував область спалахового зореутворення) та четвертий – гідродинамічно незбурена зона Н II. Маса третього компонента вираховувалась як маса всього газу, виметеного прямою ударною хвилею супервітру мінус маса газу, що випарувався у третій компонент за вік спалаху зореутворення. Тиск у цьому компоненті задавався з умови ізобарності на контактному розриві з другим компонентом. Температура у третьому та четвертому компонентах визначалась під час розрахунку їх фотоіонізаційного моделювання світіння з рівняння енергетичного балансу. Розрахунок моделі зупинявся при зрівноваженні тисків з боку третього та четвертого компонентів на їх межі. Зовнішній радіус третього компонента, а також вік при якому це відбувається, називаються стагнаційними. При цьому розширення “бульбашки” зупиняється, і в подальшому, ймовірно, відбувається фрагментація третього компонента з подальшим руйнуванням структури “бульбашки”.

Розділ 4 “Результати моделювання та їх аналіз” являє собою компіляцію результатів мультикомпонентного фотоіонізаційного моделювання світіння низькометалічних зон Н II, поділених на підрозділи, які описують розв’язок окремих проблем, сформованих при постановці задач цієї дисертаційної роботи. У **підрозділі 4.1** зроблено оцінку впливу особливостей внутрішньої структури зони Н II на формування нестачі квантів у *Ly α* -спектрі, виявлен-

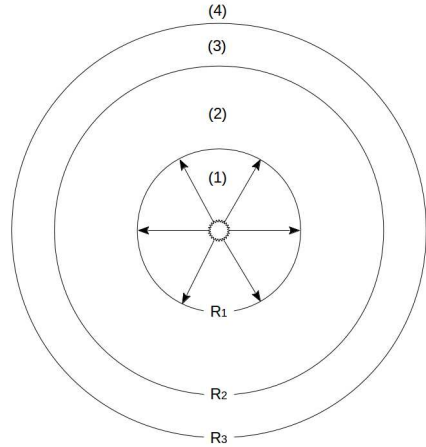


Рис. 1. Схематичне зображення структури “бульбашки” супервітру, де: (1) – супервітер, що вільно розлітається від спалаху зореутворення; (2) – гарячий розріджений газ каверни супервітру; (3) – шар високої густини, виметений та стиснений ударною хвилею супервітру; (4) – гідродинамічно незбурена складова зони Н II

не раніше з ОФМС даних об'єктів [28]. Виокремлено чотири типи спектрів лайманівського континууму (рис. 2): а) коли відсутня суттєва зміна форми Lyc -спектра; б) коли відсутня суттєва зміна форми Lyc -спектра та вихідний спектр містить більшу кількість квантів ніж вхідний, при енергіях фотонів більших 5 Ryd; в) коли наявна суттєва зміна форми Lyc -спектра за 4 Ryd; г) коли наявна суттєва зміна форми Lyc -спектра у діапазоні (1.8–4) Ryd. Таким чином показано, що компоненти бульбашки супервітру здатні змінити початкову форму спектра іонізуючого випромінювання, сформовану скупченням зір в області зореутворення.

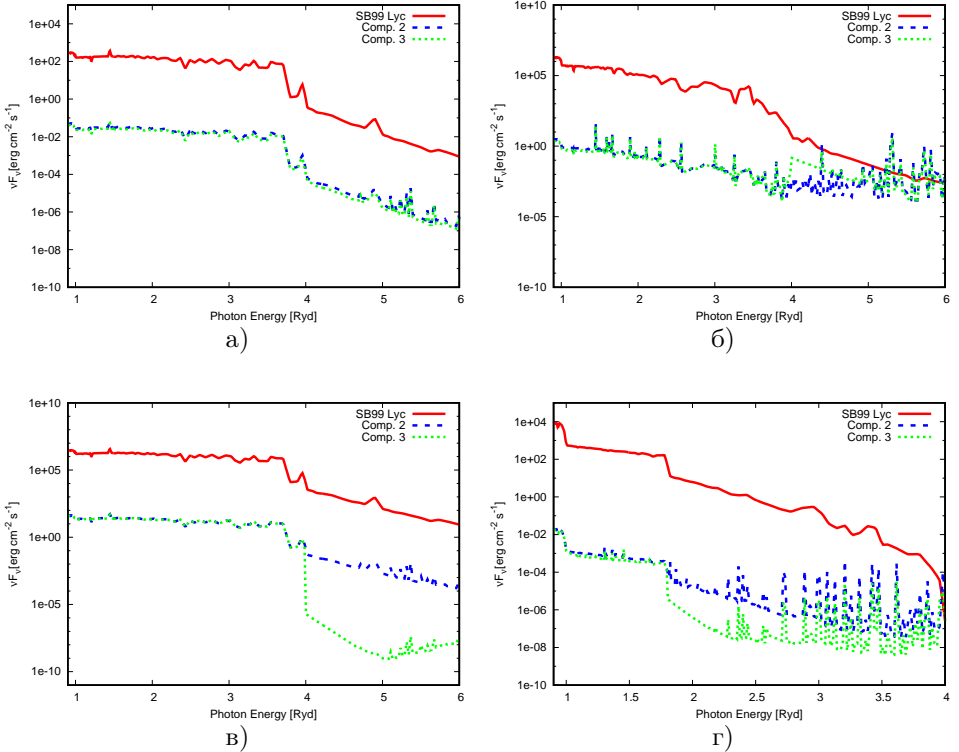


Рис. 2. Приклади результатів моделювання проходження Lyc -квантів крізь “бульбашку” супервітру, що оточує спалах зореутворення Тут SB99 Lyc – вхідний Lyc -спектр; $Comp.2$ та $Comp.3$ – Lyc -спектр, який пройшов через другий та третій компонент, відповідно; по осі X – енергія квантів у Рідбергах [Ryd], а по осі Y – потік квантів νF [$erg\ cm^{-2}\ c^{-1}$]

У **підрозділі 4.2** досліджено внесок компонент моделі у формування ліній $H\beta$, $[O\ III]$, $[O\ II]$ та $[S\ II]$, а також перевірено можливість світіння ліній $He\ II\ 4686\ \text{\AA}$ та $[Ne\ V]\ 3426\ \text{\AA}$ (виявлених у роботі [36]) у компонентах бульбашкоподібної структури зони $H\ II$, які враховувалися під час її МФМС. Показано, що основний внесок у формування світіння лінії $He\ II\ 4686\ \text{\AA}$ дає третій компонент (рис. 3а), а у формування світіння лінії $[Ne\ V]\ 3426\ \text{\AA}$ – другий компонент (рис. 3б). Діапазон спостережуваних відносних інтенсивностей $I_{HeII4686}/I_{H\beta}$ з

праці [36] був у межах 0.000 – 0.074, а відповідні модельні значення – у діапазоні 0.0001 – 0.102. Для $I_{[\text{NeV}]3426}/I_{\text{H}\beta}$ діапазон спостережуваних значень у межах 0.000 – 0.007 (з праці [36]), а діапазон модельних значень: 10^{-7} – 0.31. Отже відбулось перекриття досліджуваних спостережних та модельних відносних інтенсивностей.

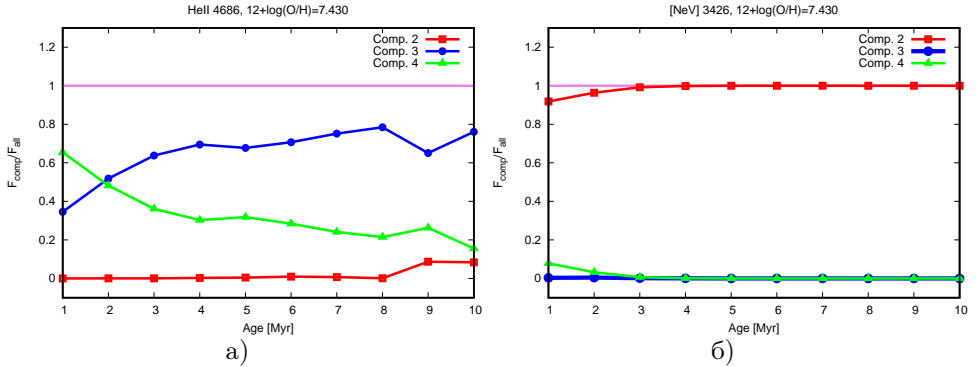


Рис. 3. Вікова залежність внеску кожного з компонентів у спостережуваний потік: а) лінії He II 4686 Å; б) лінії [Ne V] 3426 Å. По осі X – вік у млн. роках (Myr), а по осі Y – відношення потоку цих ліній F_{comp} , випромінених окремо у другому, третьому, четвертому компонентах (Comp. 2, Comp. 3, Comp. 4), до загального, сумарного потоку цих ліній (F_{all}) у всіх компонентах для $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7.43$

У підрозділі 4.3 визначено вплив пилових зерен на розподіл фізичних параметрів та випромінювання важливих діагностичних ліній. На початку підрозділу коротко описано історію дослідження міжзоряного пилу. У мультикомпонентному моделюванні світіння низькометалічних зон Н II пил був врахований у третьому та четвертому компонентах, як найхолодніших шарах зони Н II. Далі ведеться порівняння впливу безпилових та пилових моделей на форму спектра іонізуючого випромінювання, на розподіл електронної температури у третьому та четвертому компонентах, на потік у лінії $\text{H}\beta$ 4861 Å, на відношення відносної інтенсивності лінії $[\text{O III}]5007/\text{H}\beta$ та на діагностичні співвідношення $[\text{O III}]5007/[\text{O III}]4363$ та $[\text{S II}]6717/[\text{S II}]6731$, а також на параметр збуждення туманності

$$P = [\text{O III}]4959, 5007 / ([\text{O II}]3727, 3729 + [\text{O III}]4959, 5007).$$

Показано, що вплив наявності чи відсутності пилу в зоні Н II на форму вихідного *Lyc*-спектра та на температурний розподіл у зовнішніх компонентах є незначний, проте для вищезгаданих відносної інтенсивності та діагностичних співвідношень прослідковується вплив наявності пилу, який зростає зі збільшенням металічності зони Н II та проявляє себе пониженням чи підвищенням значень досліджуваних відношень.

У підрозділі 4.4 було проведено порівняння результатів мультикомпонентного фотоіонізаційного моделювання світіння зон Н II з даними спостережень. Із загальної множини отриманих моделей для подальших досліджень були вибрані ті, які найкраще відтворюють дані спостережень. Вільні параметри таких моделей характеризуються наступними значеннями: $t = 1 - 10$ млн. років у випадку *Geneva v40*, $n_0 = 0.05 - 100 \text{ cm}^{-3}$, в діапазоні металічності Z

$= 0.00029 - 0.0035 (12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 7.1 - 8.2)$.

На рис. 4а – 4г порівнюються результати наших МФМС з даними спектроскопічних спостережень зон Н ІІ, при цьому використовуються інтенсивності наступних сильних емісійних ліній:

$$R_2 = ([\text{OII}]3727 + [\text{OII}]3729)/\text{H}\beta; \quad R_3 = ([\text{OIII}]4959 + [\text{OIII}]5007)/\text{H}\beta;$$

$$N_2 = ([\text{NII}]6548 + [\text{NII}]6584)/\text{H}\beta; \quad S_2 = ([\text{SII}]6717 + [\text{SII}]6731)/\text{H}\beta.$$

У якості спостережуваних даних використана компіляцію Л. С. Пілюгіна [37, 38, 39] відносних інтенсивностей сильних ліній у зонах Н ІІ в спіральних та неправильних галактиках, у яких спостерігається хоча б одна авроральна лінія.

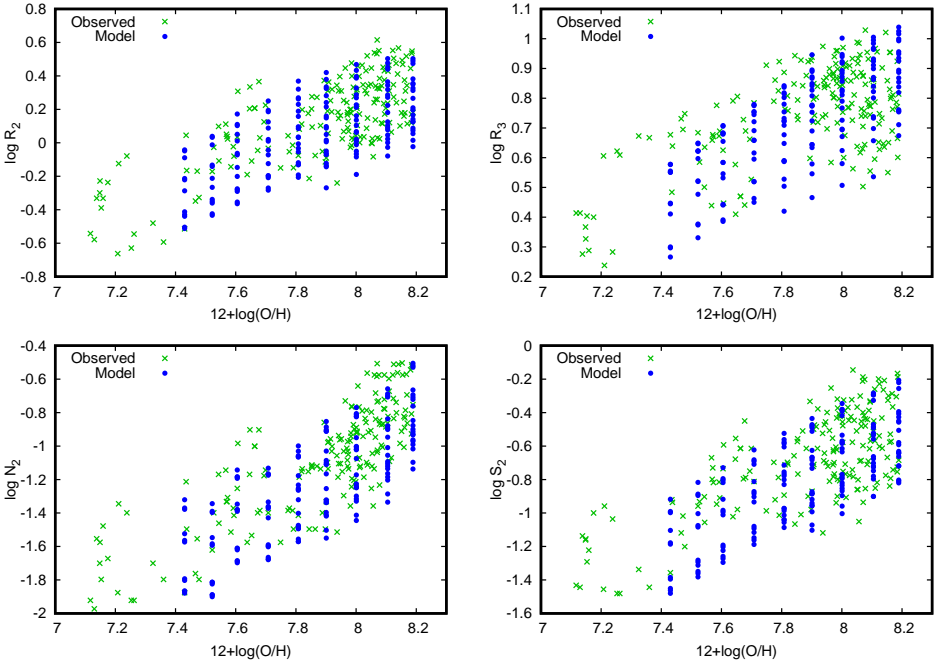


Рис. 4. Порівняння модельних (кружки, “Model”) та спостережуваних (зірочки, “Observed”) значень відносних інтенсивностей (R_2 , R_3 , N_2 , S_2) сильних емісійних ліній як функції від $12 + \log(\text{O}/\text{H})$

У розділі 5 “Перевизначення хімічного вмісту низькометалічних зон Н ІІ” представлено застосування результатів мультикомпонентного ФМС низькометалічних зон Н ІІ у БККГ до перевизначення хімічного вмісту цих об’єктів та уточнення значення вмісту первинного гелію та темпу його збагачення.

Для отримання нових виразів для визначення ІКМ, які враховують неспостережувані стадії іонізації, використано хімічний вміст A/H , прийнятий під час розрахунку МФМС низькометалічних зон Н ІІ, та іонний вміст A^{+i}/H^+ , отриманий на основі результатів розрахунку таких моделей шляхом усереднення цього вмісту, із зважуванням за електронною концентрацією, за модельни-

ми об'ємами третього та четвертого компонентів. У цих компонентах виникає більшість спостережуваних емісійних ліній. Використано наступну форму зв'язку між іонним та хімічним вмістом: $\log[(A^{+i}/H^+)/ (A/H)] = f(x)$, $x = X^{+k+1}/X^{+k}$, $f(x) = \sum_{n=0}^4 C_n x^n$, $ICF(x) = 10^{-f(x)}$, де C_n – коефіцієнти полінома, та $f(x)$ – апроксимаційна функція, що визначає ІКМ. Тут $ICF(x)$ – вираз для ІКМ (від англ. ionization-correction factor).

Таким чином, якщо $(A^{+i}/H^+)_{diag}$ та X^{+k+1}/X^{+k}_{diag} – іонний вміст, отриманий, як результат діагностики спектрів низькометалічних зон Н II, то відносний хімічний вміст елемента А в цьому об'єкті може бути розрахований наступним чином:

$$\frac{A}{H} = ICF(X^{+k+1}/X^{+k}_{diag}) \cdot \left(\frac{A^{+i}}{H^+} \right)_{diag}$$

Наприклад, на рис. 5 показані залежності, використані для виводу ІКМ для визначення He/H та O/H.

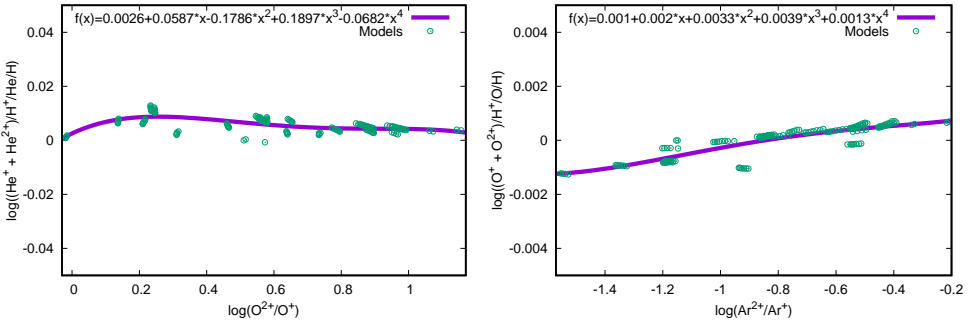


Рис. 5. Приклади виведення ІКМ для He/H та O/H у низькометалічних зонах Н II, де кружками (“Models”) позначено модельні значення, а $f(x)$ – апроксимаційна функція

Обчислений таким чином хімічний вміст He/H та важких елементів був використаний для розрахунку гелієвого вмісту по масі Y і їх залежностей від металічності Z та вмісту O/H:

$$Y = \frac{4y(1-Z)}{1+4y}; \quad Z = \frac{Z_a}{1+4\frac{He}{H} + Z_a}, \quad Z_a = 14\frac{N}{H} + 16\frac{O}{H} + 20\frac{Ne}{H} + 32\frac{S}{H} + 40\frac{Ar}{H};$$

$$y \equiv He/H = (y^+ + y^{++}) \cdot ICF(x), \quad x = O^{2+}/O^+ \text{ або } Ar^{3+}/Ar^{2+}, \quad y^+ = He^+/H^+; \\ y^{++} = He^{++}/H^+.$$

Загалом, було обрано 88 зон Н II у БККГ, використаних для виводу вмісту первинного гелію у працях [29]–[33]. Використовуючи відносний іонний вміст, отриманий у цих працях, та застосовуючи до нього нові ІКМ, отримані в рамках даного дисертаційного дослідження, було отримано хімічний вміст важких елементів та гелію. Межі значень X^{+k+1}/X^{+k} для відселектованих за спостереженнями моделей, дозволили отримати хімічний вміст у 83 об'єктах з

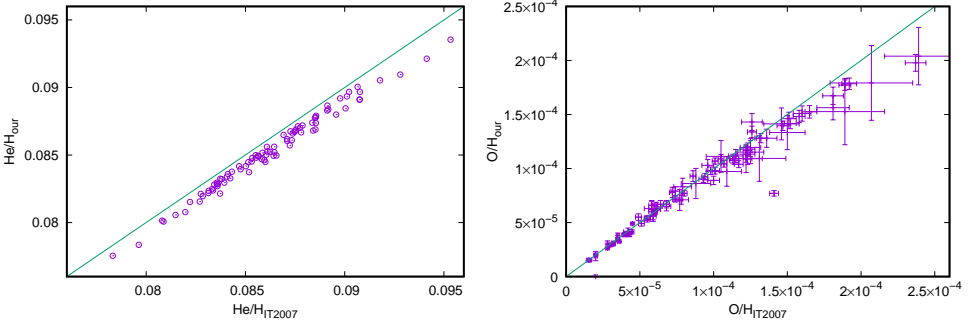


Рис. 6. Порівняння значень отриманого модельного вмісту $\text{He}/\text{H}_{\text{our}}$ та $\text{O}/\text{H}_{\text{our}}$ зон Н II у БККГ із вмістом $\text{He}/\text{H}_{\text{IT2007}}$ та $\text{O}/\text{H}_{\text{IT2007}}$, отриманим Ізотопним та ін. [33]

вибірки вищезгаданих 88 об'єктів. На рис. 6 показано порівняння отриманого вмісту He/H та O/H з отриманим у праці [33]. На цьому рисунку не показані похибки для порівняння значень He/H , щоб можна було побачити відмінності між результатами більш чітко. Видно, що більшість значень He/H , отриманих з використанням нових ІКМ, систематично зміщені вниз у порівнянні з результатами із [33]. Тим не менше, значення вмісту He/H збігаються в межах похибок. З іншого боку, вмісти O/H збігаються дуже добре лише для об'єктів з найнижчими металічностями, а із збільшенням металічності значення O/H , отримані за допомогою нових ІКМ, систематично зменшуються у порівнянні з отриманими у праці [33].

З моделей отримано наступну залежність $Z - \text{O}/\text{H}$:

$$Z = 15.45 \cdot \text{O}/\text{H} - 5.48 \cdot 10^{-6}.$$

Використовуючи нові значення хімічного вмісту отримано залежності $Y - Z$ та $Y - \text{O}/\text{H}$. Залежності $Y - Z$ та $Y - \text{O}/\text{H}$ та їхні лінійні апроксимації показані на рис. 7. Можна побачити, що отримані величини вмісту первинного гелію: $Y_p = 0.2495 \pm 0.0014$ для залежності $Y - Z$ та $Y_p = 0.2495 \pm 0.0013$ — для залежності $Y - \text{O}/\text{H}$. Величини збагачення гелію під час зоряної хімічної еволюції речовини є наступними: $dY/dZ = 3.43 \pm 0.77$ та $dY/d(\text{O}/\text{H}) = 53.43 \pm 11.69$.

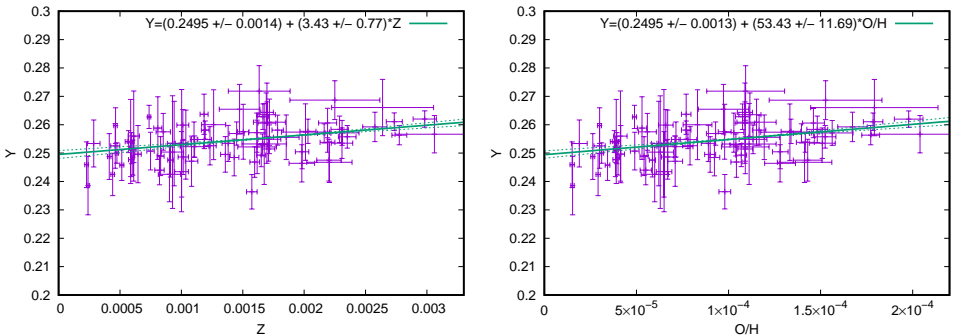


Рис. 7. Визначення вмісту первинного гелію Y_p (із залежності $Y - Z$ і $Y - \text{O}/\text{H}$) та темпу його збагачення dY/dZ і $dY/d(\text{O}/\text{H})$

Отримані величини Y_p та $dY/d(O/H)$ збігаються в межах похибок з величинами, отриманими Ізотовим та Туаном [33] ($Y_p = 0.2516 \pm 0.0011$, $dY/d(O/H) = 40 \pm 7$), але нахил dY/dZ є трохи вищий ніж в [33] ($dY/dZ = 2.19 \pm 0.39$).

У **Висновках** підведено підсумок результатів дисертаційної роботи, отриманих згідно поставлених завдань.

У **Додатках** наведено праці здобувача та додаткові рисунки.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлено підсумки модельних досліджень низькометалічних зон Н II у БККГ навколо спалахів зореутворення, що проводилися з 2010 року до теперішнього часу. Розглянуто коло проблем, пов'язаних із дослідженням та уточненням внутрішньої будови та фізичних параметрів зон Н II, вирішення яких дозволило побудувати більш точні фотоіонізаційні моделі світіння зон Н II та використати результати такого моделювання для визначення та уточнення вмісту первинного гелію та темпу його збагачення. Нижче наведено отримані результати.

1. Розраховано моделі еволюційно-популяційного синтезу для спалахового зореутворення у БККГ. У результаті були отримані еволюційні розподіли таких параметрів, як: сумарний зоряний *Lyc*-спектр від області спалахового зореутворення; кількість іонізуючих квантів, які випромінюються спалахом зореутворення за одиницю часу та здатні іонізувати Н I, He I та He II; відносний хімічний вміст елементів, які надходять від центральної області зореутворення в оточуюче небулярне середовище внаслідок дії супервітру та вибухів наднових; механічна світність супервітру від області зореутворення; темп втрати маси спалахом зореутворення через зоряні вітри та вибухи наднових. Еволюційні розподіли цих параметрів були використані у якості вхідних даних для МФМС низькометалічних зон Н II у БККГ. Вперше порівняно якість різних еволюційних треків, які використовуються під час еволюційно-популяційного синтезу, через відтворюваність МФМС, розрахованими на основі результатів такого синтезу, спостережуваних спектрів.
2. Вперше на основі моделей Шевальє та Клеґа витоку супервітру з області зореутворення [25], гідродинамічної моделі еволюції “бульбашки” зоряного вітру [26] та програми для фотоіонізаційного моделювання *Cloudy* [35] розроблено унікальний підхід до враховування внутрішньої структури зони Н II та її еволюції під час ФМС цих об'єктів.
3. Вперше розраховано сітку МФМС зон Н II у БККГ для різних мас областей зореутворення на основі мульткомпонентного ФМС, описаного вище. Під час моделювання враховано такі компоненти, як область витоку супервітру, каверна супервітру, тонкий шар газу, виметений супервітром, та незбурена гідродинамічно частина зони Н II. Всі моделі сітки таких МФМС перевірено на відповідність спостережуваним даним з огляду неба SDSS. Для подальших досліджень використано тільки ті моделі, які відтворюють сильні емісійні лінії в області спостережуваних значень позагалактичних зон Н II.
4. Вперше, на основі результатів описаної вище сітки МФМС, виокремлено чотири різних види модельних *Lyc*-спектрів при виході з третього компонента

- (з “бульбашки”) у четвертий, в якому формується більшість спостережуваних сильних емісійних ліній: 1) без “провалу” (значної нестачі квантів) в *Lyc*-спектрі; 2) без “провалу” в *Lyc*-спектрі, але коли вихідний *Lyc*-спектр містить більшу кількість іонізуючих квантів за 5 Ryd за рахунок випромінювання термалізованого розрідженого газу в каверні супервітру (другий компонент); 3) з наявним “провалом” кількості квантів у *Lyc*-спектрі за 4 Ryd; 4) з наявним “провалом” в *Lyc*-спектрі в діапазоні 1.8-4 Ryd. Таким чином, підтверджена можливість формування “провалом” у деяких ділянках *Lyc*-спектра, виявлених раніше за допомогою ОФМС [27, 28] зон Н II у БККГ SBS 0940+544 та SBS 0335-052.
5. Вперше, на основі результатів описаної вище сітки МФМС, продемонстрована можливість формування ліній He II 4686 Å та [Ne V] 3426 Å, які спостерігаються в спектрах деяких зон Н II у БККГ. Зокрема показано, що формування лінії He II 4686 Å відбувається в основному в густому шарі виметеного газу (третьої компонент), а лінії [Ne V] 3426 Å – у гарячій каверні супервітру (другий компонент).
 6. Вперше досліджено вплив наявності пилових зерен на визначення фізичних характеристик та їх просторовий розподіл у процесі вищезгаданого мультикомпонентного ФМС низькометалічних зон Н II. Зокрема, здійснено порівняння *Lyc*-спектрів, еволюцій потоку в лінії H β , відносної інтенсивності лінії [O III] 5007 Å, важливих діагностичних співвідношень та параметра збудження у випадку наявності та відсутності пилу. Виявлено, що за низької металічності вплив наявності пилу на результати моделювання є незначним, проте зі збільшенням металічності вплив пилу зростає.
 7. Вперше отримано вирази для ІКМ на основі результатів розрахунку сітки МФМС зон Н II у БККГ, які враховують внутрішню структуру цих об’єктів та їх еволюцію. Всі ІКМ перевірені на відтворення хімічного складу, заданого у моделях даної сітки. За допомогою цих нових ІКМ та іонного вмісту, отриманого Ізотовим та ін. [29]–[33], перевизначено хімічний вміст 83 зон Н II у БККГ. Виявлено невелике систематичне зміщення вниз вмісту He/H, отриманого за допомогою нових ІКМ, у порівнянні з результатами Ізотова та ін. [33]. Однак, слід зауважити, що цей вміст для всіх об’єктів співпадає в межах похибок. Значення ж вмісту O/H збігаються в межах похибок, а при збільшенні металічності систематично відхиляються вниз у порівнянні з даними Ізотова та ін. [33]. Такі відхилення привели до дещо нижчого значення вмісту первинного гелію ($Y_p = 0.2495 \pm 0.0014$ та $Y_p = 0.2495 \pm 0.0013$) у порівнянні з отриманим у праці [33] ($Y_p = 0.2516 \pm 0.0011$), яке, однак, в межах похибок збігається. Темп збагачення гелію зоряним нуклеосинтезом ($dY/dZ = 3.43 \pm 0.77$) виявився дещо вищим, ніж у [33] ($dY/dZ = 2.19 \pm 0.39$).

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ОПУБЛІКОВАНО В ПРАЦЯХ

У реферованих наукових журналах:

1. Мелех Б. Я. Вплив бульбашкоподібних структур, утворених зоряним вітром, на спектр іонізуючого випромінювання в небулярних об’єктах /

- Б. Я. Мелех, І. О. Кошмак, Р. В. Козел // Журнал фізичних досліджень. – 2011. – Т. 15. – № 3. – С. 3901-1-3901-8.
2. Кошмак І. О. Моделювання світіння зони Н II, що містить бульбашкоподібну структуру / І. О. Кошмак, Б. Я. Мелех // Кінематика і фізика небесних тіл. – 2013. – Т. 29. – № 6. – С. 3-19.
 3. Кошмак І. О. Роль пилу під час моделювання світіння зони Н II, що містить бульбашкоподібну структуру / І. О. Кошмак, Б. Я. Мелех // Журнал фізичних досліджень. – 2013. – Т. 17. – № 4. – С. 4901-1-4901-10.
 4. Кошмак І. О. Мультикомпонентне моделювання світіння низькометалічних зон Н II / І. О. Кошмак, Б. Я. Мелех // Кінематика і фізика небесних тіл. – 2014. – Vol. 30. – № 2. – Р. 70-84.
 5. Кошмак І. О. Моделювання світіння зони Н II, що оточує область зореутворення, з урахуванням еволюції структур, утворених супервітром / І. О. Кошмак, Б. Я. Мелех // Кінематика і фізика небесних тіл. – 2017. – Vol. 33. – № 2. – Р. 39-54.
 6. Koshmak I. O. The primordial helium abundance determination using multi-component photoionization modelling of low-metallicity H II regions / I. O. Koshmak, B. Ya. Melekh // Advances in Astronomy and Space Physics. – 2018. – Vol. 8. – Issue 1. – P. 16-23.

В інших наукових виданнях:

7. Koshmak I. O. The influence of stellar wind bubbles on the ionizing radiation field in H II regions / I. O. Koshmak, B. Ya. Melekh // Advances in Astronomy and Space Physics. – 2012. – Vol. 2. – Issue 2. – P. 149-152.

У матеріалах та тезах конференцій:

8. Козел Р. В. Мультикомпонентне моделювання світіння околів спалахів зореутворення з урахуванням структури каверни зоряного вітру / Р. В. Козел, І. О. Кошмак, Б. Я. Мелех // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “Єврика-2009”. Тези доповідей. Львів. – 2009. – С. В8.
9. Козел Р. В. Детальне мультикомпонентне фотоіонізаційне моделювання зон Н II навколо спалахів зореутворення / Р. В. Козел, І. О. Кошмак, Б. Я. Мелех // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “Єврика-2010”. Тези доповідей. Львів. – 2010. – С. В6.
10. Kozel R. V. Multicomponent Photoionization Modelling of Envelopes with Complicated Structure of Stellar Wind Bubble Surrounding Starburst Region / R. V. Kozel, B. Ya. Melekh, I. O. Koshmak // 17th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts. Kyiv. – 2010. – P. 50.
11. Kozel R. V. Photoionization modelling of stellar wind bubbles surrounding starburst regions / R. V. Kozel, B. Ya. Melekh, I. O. Koshmak // 18th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts. Kyiv. – 2011. – P. 59.
12. Кошмак І. О. Вплив бульбашкоподібних структур, утворених зоряним вітром, на поле іонізуючого випромінювання в зонах Н II / І. О. Кошмак,

- Р. В. Козел, Б. Я. Мелех // Шоста міжнародна наукова конференція пам'яті Б. Т. Бабія "Вибрані питання астрономії та астрофізики". Програма та тези. Львів. – 2011. – С. 74.
13. Kozel R. V. The influence of stellar wind bubbles inside H II regions on it's chemical abundance / R. V. Kozel, I. O. Koshmak, B. Ya. Melekh // The Sixth Scientific Conference in Honor of Bohdan Babiy "Selected Issues of Astronomy and Astrophysics". Program and theses. Lviv. – 2011. – P. 132.
 14. Кошмак І. О. Вплив бульбашкоподібних структур, утворених зоряним вітром, та їх компонент, на поле іонізуючого випромінювання в зонах H II / І. О. Кошмак, Б. Я. Мелех // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики "Еврика-2012". Тези доповідей. Львів. – 2012. – С. А4.
 15. Koshmak I. O. The influence of stellar wind bubbles on the radiation ionizing field in H II regions / I. O. Koshmak, B. Ya. Melekh // 19th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts. Kyiv. – 2012. – P. 53.
 16. Koshmak I. O. Modelling of low-metallicity H II region emission with bubble-like structure inside / I. O. Koshmak, B. Ya. Melekh // 20th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts. Kyiv. – 2013. – P. 56.
 17. Кошмак І. О. Використання інтерпретатора Perl до і після моделювання світіння небулярних об'єктів / І. О. Кошмак, Б. Я. Мелех // The International Research and Practice Conference "FOSS Lviv-2013". Тези доповідей. Львів. – 2013. – С. 81.
 18. Кошмак І. О. Мультикомпонентне моделювання світіння низькометалічних зон H II / І. О. Кошмак, Б. Я. Мелех // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики "Еврика-2013". Тези доповідей. Львів. – 2013. – С. G2.
 19. Koshmak I. O. Multicomponent modelling of low-metallicity H II regions / I. O. Koshmak, B. Ya. Melekh // 13-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School "Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology". Program and abstracts. Odesa. – 2013. – С. 45.
 20. Кошмак І. О. New ICF's for low-metallicity H II regions / І. О. Кошмак, Б. Я. Мелех // Сьома міжнародна наукова конференція пам'яті Б. Т. Бабія "Вибрані питання астрономії та астрофізики". Програма та тези. Львів. – 2014. – С. 30.
 21. Кошмак І. О. Evolutionary photoionization modelling of the nebular environment surrounding the starburst region / І. О. Кошмак, Б. Я. Мелех // Восьма міжнародна наукова конференція пам'яті Б. Т. Бабія "Вибрані питання астрономії та астрофізики". Програма та тези. Львів. – 2016. – С. 36.
 22. Melekh B. Ya. Determination of the chemical composition in the dwarf galaxies using multicomponent photoionization modelling method / B. Ya. Melekh, I. O. Koshmak // 17-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School "Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology". Program and abstracts. Odesa. – 2017. – P. 18.

23. Koshmak I. O. The new ionization correction factors, obtained from results of the multicomponent photoionization modeling of low-metallicity H II regions / I. O. Koshmak, B. Ya. Melekh // 24th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts. Kyiv. – 2017. – P. 22.
24. Koshmak I. O. The primordial helium abundance determined using multicomponent photoionization modelling / I. O. Koshmak, B. Ya. Melekh // 25th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts. Kyiv. – 2018. – P. 36.

ПЕРЕЛІК ЦИТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

25. Chevalier R. A. Wind from a starburst nucleus / R. A. Chevalier, A. W. Clegg // Letters to Nature. – 1985. – Vol. 317. – P. 44–45.
26. Weaver R. Interstellar bubbles. II - Structure and evolution / R. Weaver, R. McCray, J. Castor, et al. // Astrophys. J. – 1977. – Vol. 218. – P. 377–395.
27. Melekh B. Ya. Optimized Photoionization Modelling of HII Region in Blue Compact Dwarf Galaxy SBS 0940+544 / B. Ya. Melekh // Journal of Physical Studies. – 2006. – Vol. 10. – P. 148–159.
28. Melekh B. Ya. Two-Stages Optimized Photoionization Modelling of HII Region in Blue Compact Galaxy SBS 0335-052 / B. Ya. Melekh // Journal of Physical Studies. – 2009. – Vol. 13. – P. 3901-1–3901-16.
29. Izotov Yu. I. The primordial helium abundance from a new sample of metal deficient blue compact galaxies / Yu. I. Izotov, T. X. Thuan, V. A. Lipovetsky // Astrophys. J. – 1994. – Vol. 435. – P. 647–667.
30. Izotov Yu. I. The Primordial Helium Abundance: Systematic Effects and a New Determination / Yu. I. Izotov, T. X. Thuan, V. A. Lipovetsky // Astrophys. J. Supp. – 1997. – Vol. 108. – P. 1–39.
31. Izotov Yu. I. The Primordial Abundance of ^4He revisited / Yu. I. Izotov, T. X. Thuan // Astrophys. J. – 1998. – Vol. 500. – P. 188–216.
32. Izotov Yu. I. Systematic effects and a new determination of the primordial abundance of ^4He and dY/dZ from observations of blue compact galaxies / Yu. I. Izotov, T. X. Thuan // Astrophys. J. – 2004. – Vol. 602. – P. 200–230.
33. Izotov Yu. I. The primordial abundance of ^4He : a self-consistent empirical analysis of systematic effects in a large sample of low-metallicity HII regions / Yu. I. Izotov, T. X. Thuan // Astrophys. J. – 2007. – Vol. 662. – P. 15–38.
34. Leitherer C. Starburst 99: Synthesis Models for Galaxies with Active Star Formation / C. Leitherer, D. Schaerer, J. D. Goaldader, et al. // Astrophysical Journal Supplement series. – 1999. – Vol. 123. – P. 3–40.
35. Ferland G. J. Hazy, a Brief Introduction to Cloudy / G. J. Ferland // 2008. – University of Kentucky, Physics Department Internal Report. 200, <http://www.nublado.org>
36. Thuan T. X. High-ionization emission in metal-deficient blue compact dwarf galaxies / T. X. Thuan, Yu. I. Izotov // Astrophys. J. – 2005. – Vol. 161. – P. 240–270.
37. Pilyugin L. S. New improved calibration relations for the determination of electron temperatures and oxygen and nitrogen abundances in HII regions / L. S. Pilyugin, J. M. Vilchez, T. X. Thuan // Astrophys. J. – 2010. – Vol. 720. – P. 1738–1751.

38. Pilyugin L. S. “Counterpart” method for abundance determinations in HII regions / L. S. Pilyugin, E. K. Grebel, L. Mattsson // Mon. Not. Roy. Ast. Soc. – 2012. – Vol. 424. – Issue 3. – P. 2316–2329.
39. Pilyugin L. S. The Abundance Properties of Nearby Late-type Galaxies. I. The Data / L. S. Pilyugin, E. K. Grebel, A. Y. Kniazev // Astrophys. J. – 2014. – Vol. 147. – Issue 6. – P. 131–154.

АНОТАЦІЯ

Кошмак І. О. Моделювання світіння низькометалічних зон Н II, які оточують області спалахового зореутворення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія. – Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2018.

Дисертація присвячена розробці методу мультикомпонентного фотоіонізаційного моделювання світіння (МФМС) низькометалічних зон Н II, які оточують області спалахового зореутворення, та застосуванню цього методу для дослідження блакитних компактних карликових галактик (БККГ). Складну структуру зони Н II поділено на внутрішні та зовнішні компоненти. Внутрішніми компонентами є зона вільного поширення супервітру та каверна супервітру, а зовнішніми – густий шар газу, виметений прямою ударною хвилею, та незбурена гідродинамічно частина зони Н II, де формується більшість спостережуваних сильних емісійних ліній. Моделі компонентів розраховувалися у припущенні сферичної симетрії, фотоіонізація газу в них спричинена іонізуючими квантами як прямого, так і дифузного іонізуючого випромінювання, потоки яких розраховувалися під час моделювання за допомогою рівнянь перенесення випромінювання, які враховують всі важливі процеси у зоні Н II, які це перенесення спричиняють. Дифузне іонізуюче випромінювання розраховувалося у наближенні *outward only*. Отримано сумарні зоряні спектри лайманівського континууму (*Ly α* -спектри), загальну кількість іонізуючих квантів, хімічний вміст елементів, які надходять в оточуюче середовище внаслідок дії супервітру та вибухів наднових, темп втрати маси спалахом зореутворення та механічну світність супервітру в зоні його вільного поширення, які визначалися за допомогою еволюційно-популяційного моделювання еволюції області зореутворення з врахуванням обертання WR-зір. В області вільного поширення супервітру хімічний вміст визначено за допомогою еволюційно-популяційних моделей синтезу області зореутворення. Хімічний вміст розрідженого газу в каверні супервітру визначався усередненням за масою значень вмісту в області зореутворення та в зовнішніх компонентах, оскільки враховується випаровування газу із зовнішніх компонентів у каверну. Декремент значень хімічного вмісту елементів O, Ne, S, Ar, Fe брався з аналізу хімічного вмісту зон Н II у БККГ, отриманого Ізотовим та ін. 1994–2005, також враховувалася залежність N/H–O/H. Для визначення радіального розподілу концентрації, швидкості розширення та температури газу у внутрішніх компонентах бульбашки

супервітру використано моделі Шевальє–Клегга (для опису вільного поширення супервітру) і Уівера та ін. (для опису газу в гарячій каверні). Радіальний розподіл електронної температури та концентрації у зовнішніх компонентах обчислено під час моделювання їхнього світіння з фотоіонізаційного рівняння енергетичного балансу. У якості еволюційного стопового критерію для моделювання прийнято умову рівності тиску на межі третього та четвертого компонентів. Розраховано еволюційну сітку мультикомпонентних низькометалічних моделей зон Н II. Показано, що внутрішня структура зони Н II за певних умов може формувати нестачу квантів у спектрі іонізуючого випромінювання. Виокремлено чотири типи оцінки впливу на форму спектра іонізуючого випромінювання під час його перенесення крізь компоненти супервітру. Продемонстровано можливість виникнення ліній [Ne V] та He II в діапазоні відносних інтенсивностей, який перекривається з їх спостережуваними значеннями для БККГ. Проведено аналіз впливу наявності пилових зерен на розподіл фізичних параметрів та важливих діагностичних співвідношень у зоні Н II. Зроблено порівняння модельних спектрів із спостережуваними на основі інтенсивностей сильних емісійних ліній. Для подальшої роботи використовувалися тільки ті моделі, які забезпечили значення інтенсивностей цих ліній у межах спостережуваних значень. Іонний вміст моделей, усереднений за об'ємом, як і хімічний вміст, прийнятий у моделях, використано для виводу нових виразів іонізаційно-корекційних множників, які використано для перевизначення хімічного вмісту 83 зон Н II у БККГ на основі іонного вмісту, отриманого Ізотовим та ін. (2007). У результаті уточнено значення вмісту первинного гелію та темп його збагачення протягом зоряної хімічної еволюції речовини у Всесвіті. Вміст первинного гелію у межах похибки співпав з отриманим Ізотовим та ін. (2007), а вміст кисню співпадає з даними Ізотова та ін. (2007) при низьких металічностях і зменшується у порівнянні з цими даними із збільшенням металічності. Темп збагачення гелію в процесі зоряної хімічної еволюції отримано трохи вищим, ніж у праці Ізотова та ін. (2007).

Ключові слова: газові туманності, зони Н II, спалах зореутворення, первинний гелій.

АННОТАЦІЯ

Кошмак И. А. Моделирование свечения низкометаллических зон Н II, которые окружают области вспышечного звездообразования. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия. – Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова Министерства образования и науки Украины, Одесса, 2018.

Диссертация посвящена разработке метода мультикомпонентного фотоионизационного моделирования свечения (МФМС) низкометаллических зон Н II, которые окружают области вспышечного звездообразования, и применению этого метода для исследования голубых компактных карликовых галактик (ГККГ). Сложная структура зоны Н II была разделена на внутренние и вне-

пные компоненты. Внутренними компонентами являются зона свободного распространения суперветра и каверна суперветра, а внешними – плотный слой газа, выметенный прямой ударной волной, и невозбужденная гидродинамически часть зоны Н II, где формируется большинство наблюдаемых сильных эмиссионных линий. Модели компонентов рассчитывались в предположении сферической симметрии, фотоионизация газа в них вызванна ионизирующими квантами как прямого, так и диффузного ионизирующего излучения, потоки которых рассчитывались во время моделирования с помощью уравнений переноса излучения, учитывающих все важные процессы в зоне Н II, которые этот перенос вызывают. Диффузное ионизирующее излучение рассчитывалось в приближении *outward only*. Получены суммарные звездные спектры лаймановского континуума (*Lyс*-спектры), общее количество ионизирующих квантов, химическое содержание элементов, поступающих в окружающую среду вследствие действия суперветра и вспышек сверхновых, темп потери массы вспышкой звездообразования и механическая светимость суперветра в зоне его свободного распространения, которые определялись с помощью эволюционно-популяционного моделирования эволюции области звездообразования с учетом вращения WR-звезд. В области свободного распространения суперветра химическое содержание определено с помощью эволюционно-популяционных моделей синтеза области звездообразования. Химическое содержание разреженного газа в каверне суперветра определялось усреднением по массе значений содержания в области звездообразования и во внешних компонентах, поскольку учитывается испарение газа с внешних компонентов в каверну. Декремент значений химического содержания элементов O, Ne, S, Ar, Fe взят в результате анализа химического содержания зон Н II в ГККГ, полученного Изотовым и др. 1994–2005, также учитывалась зависимость N/H – O/H. Для определения радиального распределения концентрации, скорости расширения и температуры газа во внутренних компонентах пузыря суперветра использованы модели Шевалье – Клегга (для описания свободного распространения суперветра) и Уивера и др. (для описания газа в горячей каверне). Радиальное распределение электронной температуры и концентрации во внешних компонентах рассчитано во время определения фотоионизационного моделирования их свечения из фотоионизационного уравнения энергетического баланса. В качестве эволюционного стопового критерия для моделирования принято условие равенства давления на границе третьего и четвертого компонентов. Рассчитана эволюционная сетка мультикомпонентных низкометаллических моделей зон Н II. Показано, что внутренняя структура зоны Н II при определенных условиях может формировать дефицит квантов в спектре ионизирующего излучения. Выделены четыре типа оценки влияния на форму спектра ионизирующего излучения во время его переноса сквозь компоненты суперветра. Продемонстрирована возможность возникновения линий [Ne V] и He II в диапазоне относительных интенсивностей, который перекрывается с их наблюдаемыми значениями для ГККГ. Проведен анализ влияния наличия пылевых зерен на распределение физических параметров и важных диагностических соотношений в зоне Н II. Сделано сравнение модельных спектров с наблюдаемыми на основе интенсив-

ностей сильных эмиссионных линий. Для дальнейшей работы использовались только те модели, которые обеспечили значения интенсивностей этих линий в пределах наблюдаемых значений. Ионное содержание моделей, усредненное по объему, как и химическое содержание, принятое в моделях, использованы для вывода новых выражений ионизационно-коррекционных множителей, используемых для переопределения химического содержания 83 зон H II в ГККГ на основе ионного содержания, полученного Изотовым и др. (2007). В результате уточнено значение содержания первичного гелия и темп его обогащения в течение звездной химической эволюции вещества во Вселенной. Содержание первичного гелия в пределах погрешности совпало с полученным Изотовым и др. (2007), а содержание кислорода совпадает с данными Изотова и др. (2007) при низких металличностях и уменьшается в сравнении с этими данными с увеличением металличности. Темп обогащения гелия в процессе звездной химической эволюции получен немного выше, чем в работе Изотова и др. (2007).

Ключевые слова: газовые туманности, зоны H II, вспышка звездообразования, первичный гелий.

ANNOTATION

Koshmak I. O. Modelling of the low-metallicity H II regions radiation surrounding starbursts star-forming regions. – Qualification scientific paper, manuscript.

Thesis for a Candidate degree (PhD) of Physical and Mathematical Sciences in speciality 01.03.02 – astrophysics, radioastronomy. – Odesa I. I. Mechnikov National University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, Ukraine, 2018.

The dissertation is devoted to the developing of the method for multicomponent photoionization modelling (MPhM) of low-metallicity H II regions surrounding starburst star-forming regions and the application of this method for study of blue compact dwarf galaxies (BCDGs). The complex structure of H II region has been divided into internal and external components. Internal components correspond to the region of free expansion of superwind and the cavity of superwind correspondingly, while the external ones – to a thick layer of gas, compressed by a superwind shock, and hydrodynamically undisturbed outer part of H II region, where the most of observed strong emission lines are formed. The components of the model were calculated in the assumption of spherical symmetry. The gas photoionization was caused by ionizing quanta of both direct and diffuse ionizing radiation. Fluxes of this radiation were calculated during simulation using radiative transfer equations which take into account all important processes in the H II region that are causing this transfer. The diffuse ionizing radiation was calculated in the *outward only* approach. The total stellar Lyman continuum spectra (*Lyc*-spectra), the total number of ionizing quanta, the chemical abundance of the elements entering into the surrounding region due to the superwind and supernova explosions, the mass loss rate by starburst region, and mechanical luminosity of superwind in the region of its free expansion have been obtained from the evolutionary-population modelling of the evolution of stars-formation region with taking into account the rotation of the WR-stars. In the region of free expansion of the superwind the chemical

abundances were determined using evolutionary population synthesis models of star-formation region. The chemical abundances of rarefied gas in the cavity of the superwind were determined by averaging over mass of the values of the abundances in the star-formation region and in the external components correspondingly, due to gas evaporation from the external components into the cavity. The decrement of the chemical abundance values for the elements O, Ne, S, Ar, Fe was taken from the analysis of the chemical abundances of H II regions in the BCDG obtained by Izotov et al. 1994–2005, the dependence of $N/H - O/H$ was also taken into account. The models of Chevalier and Clegg (for the description of superwind free expansion) and Weaver et al. (for the description of gas in hot cavity) were used for the determination of radial distributions of the gas density, the expansion velocity as well as the temperature of gas within internal components of superwind. The distribution of the electron temperature and density in the external components was obtained during the calculation of their radiation as solution of the energy balance equation. It was adopted the stop criterion for evolutionary modelling corresponding to the condition of equilibrium of pressure on the boundary between third and fourth components. The evolutionary grid of multicomponent low-metallicity models of H II regions was calculated. It was shown that internal structure of H II region at some conditions can cause the formation of a lack of quanta in the spectrum of ionizing radiation. There were detected four types of impact estimation on the shape of *Lyc*-spectrum of ionizing radiation during its transfer through superwind components. Also, it was demonstrated the possibility of [Ne V] and He II lines formation within range of relative intensities that contains their observed values for BCDG was demonstrated. An analysis of the influence of the presence of dust grains on the distribution of physical parameters and important diagnostic relations in the H II region was carried out. The comparison of modelling spectra with observed ones was done using intensities of strong emission lines. Only models reproducing intensities of these lines within observed ranges were used for the following work. The ionic abundances of models, averaged over volume, and chemical ones adopted in the models were used to derive the new expressions for ionization-correction factors (ICFs). These ICFs were used to redetermine the chemical abundances of 83 H II regions in BCDGs, on the base of ionic abundances obtained by Izotov et al. (2007). As a result, the value of the primordial helium abundance and its enrichment during the stellar chemical evolution of matter in the Universe more precisely. The obtained value of the primordial helium abundance within the errors coincides with one obtained by Izotov and et al. (2007). The oxygen abundance coincides at low metallicity with one from Izotov et al. (2007) and decreases in comparison with these data with increasing metallicity. The value of helium enrichment during stellar chemical evolution of matter was obtained slightly higher than one from Izotov et al. (2007).

Key words: nebula, H II regions, starburst, primordial helium.