Львівський національний університет імені Івана Франка

Фізичний факультет

Кафедра астрофізики

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

«Модельна перевірка калібрувальних методів визначення хімічного вмісту в зонах H II»

Виконав студент групи ФзФм-21

спеціальності «Фізика та астрономія»

Шелестюк Д.В.

Керівник доктор ф.-м. наук, ст. н. с.

зав. кафедри астрофізики Мелех Б. Я.

Рецензент ст. н. с. Астрономічної обсерваторії

канд. ф.-м. наук Кулініч Ю.А.

м. Львів – 2023 р.

АНОТАЦІЯ

Здійснено детальний огляд різних калібрувальних методів визначення вмісту хімічних елементів у зонах H II, а також описано процедуру розрахунку мультикомпонентної фотоіонізаційної моделі світіння зони H II, що оточує область активного зореутворення. Модельні спектри, отримані для двох різних синтетичних апертур використано для розрахунку хімічного вмісту калібрувальними методами. Отриманий в результаті хімічний вміст порівняно з вмістом, усередненим за модельним об’ємом, який «спостерігається» в апертурах.

Ключові слова: зони H II, галактики:хімічний склад, калібрувальні методи, фотоіонізаційне моделювання.

ABSTRACT

A detailed review of various calibration methods for determining the abundances in the H II zones is carried out, as well as the procedure for calculating the multicomponent photoionization model of the H II zone, which surrounds the region of active star formation, is described. The model spectra obtained for two different synthetic apertures were used to calculate the chemical content by calibration methods. The resulting abundances are compared to the content averaged over the model volume that is "observed" in the apertures.

Key words: H II regions, galaxies:abundances, calibrations, photoionization modelling.

ЗМІСТ

Вступ……4
Розділ 1. Огляд методів визначення часток хімічних елементів……6
1.1. T_e-метод…….....9
1.2. Альтернативна версія T_e-методу……11
1.3.R_{23}-метод. Калібраційні співвідношення МакГоха та Зарицького-Кенніката-Хахри….....13
1.4. Інші калібраційні співвідношення R_{23}-методу……..18
1.5. P-метод Пілюгіна визначення хімічного складу……20
1.6. N2- та O3N2-калібратори як індикатори металічності складу для об’єктів з великим червоним зміщенням……22
1.7. R2D,R3D,S2D,S3D калібровки Пілюгіна……25
Розділ 2. Мультикомпонентне фотоіонізаційне моделювання……29
Розділ 3. Проведення розрахунків значення частки Оксигену для різних калібраційних співвідношень……35
Розділ 4. Висновки……...45
Список використаних джерел……...46

Вступ.

Добре відомо, що на три чверті наш Всесвіт складається з Гідрогену (H) і майже на чверть з Гелію (He), а решта хімічних елементів, які існують в природі, займають лише приблизно 1% маси всієї матерії у Всесвіті. Сам гідроген – це один протон, навколо якого обертається один електрон. В космосі зустрічаються міжзоряні хмари, що складаються з атомарного Гідрогену, і вони відповідно поділяються на зони H I – зони нейтрального, та H II – зони іонізованого водню.

Важливість цих областей в можливості помітити їх на великих відстанях в інших галактиках, що дає можливість визначити відстань до цих галактик, а також хімічного складу речовини в зонах H II.

Визначення точного хімічного складу хмар іонізованого Гідрогену, як і у випадку планетарних туманностей, не є тривіальною задачею. Спектральні дослідження зон H II в галактиках виконували багато науковців. Існує 2 різних методи визначення складу і частки металів (взагалі всіх елементів, окрім Гідрогену та Гелію) в туманностях. Ці методи базуються на різних типах спектральних ліній.

Перший метод розглядає рекомбінаційні лінії, які отримуються в результаті об’єднання (рекомбінації) електронів з протонами. Коли електрон захоплюється йоном на один зі збуджених енергетичних рівнів, електрон починає виконувати каскадні переходи на нижчі рівні, і щоразу під час переходу випромінюється квант, який і відповідає цьому переходу. Під час розрахунків такого спектра припускають, що для кожного енергетичного рівня справджується умова статистичної рівноваги, тобто кількість електронів, які потрапляють на рівень, дорівнює кількості електронів, які цей рівень покидають.

Другий метод – заборонені лінії, джерелом яких є збудження йонів внаслідок їх зіткнень з електронами. У цьому випадку можна розглядати рівняння статистичної рівноваги лише для невеликої кількості рівнів, а всіма рівнями, що лежать вище, знехтувати. Відносне населення рівнів можна розрахувати, використавши для кожного з них умову статистичної рівноваги для переходів (як спонтанних, так і викликаних зіткненнями) на заданий рівень і з нього. Рекомбінаціями на цьому рівні можна знехтувати, оскільки зіткнення відбуваються на декілька порядків частіше.

Але, на жаль, ці два методи окремо один від одного іноді дають дуже різні результати. Пояснення цьому астрономи дають різні: наявність температурних коливань малої амплітуди у вказаній області; холодний розріджений газ з високим вмістом важких елементів і низьким – водню; значні відмінності між спектром абсолютно чорного тіла і спектрами туманностей. Розглянемо детальніше:

У процесі дослідження газових туманностей іноді виникає необхідність визначити температуру зорі в цій туманності, а також розрідження випромінювання в ній. Дослідження виконують двома різними методами: методом відносної іонізації у випадку оптично тонкої туманності та методом Занстра у випадку оптично товстої. Одним із параметрів, який зумовлює фізичні умови в туманностях, є поле іонізуючого випромінювання, яке збуджує газ, змушуючи його світитись.

Теорія світіння газових туманностей дуже добре розвинена. Також розв’язано і обернену задачу – застосування теорії світіння газових туманностей для визначення їх фізичних характеристик. Методи визначення електронної температури, електронної густини та хімічного складу газових туманностей за допомогою ліній заборонених переходів у емісійних спектрах були запропоновані десятки років тому.

Однак, внаслідок покращення якості обрахунків і постійного уточнення значень фізичних констант, що використовуються в даних методах, тому в різні роки автори використовують різні значення величин. Крім того, автори використовують різні моделі для опису зон H II: модель сталої температури всередині всієї туманності, двозонну модель опису розподілу температури всередині туманності, модель дрібномасштабних температурних флуктуацій та інші.

Розділ 1. Огляд методів визначення часток хімічних елементів.

З часом дослідники H II регіонів запропонували велику кількість калібраційних співвідношень для визначення вмісту хімічних елементів за емісійними лініями. Проте, найважливішим недоліком цих співвідношень є обмеженість діапазону металічностей, до яких певна калібровка застосовна. Тому конструюються калібраційні співвідношення для певного діапазону металічностей, або формуються декілька подібних калібровок для певних металічностей (зазвичай поділяються на калібровки для високих та низьких металічностей). В будь-якому випадку, потрібно мати інформацію про металічність певного регіону для визначення застосовності певних калібровок. Відсутність цієї інформації може призвести до неправильного вибору калібраційного співвідношення, що, в свою чергу, призведе до великих неточностей у визначенні хімічного складу H II регіону, що досліджується. Особливо сильно ця проблема помітна у випадку H II регіонів або галактик, металічність яких лежить на межі застосовності калібраційних співвідношень.

Найбільш важливою характеристикою калібровки є вхідні дані, що використовуються в процесі побудови калібраційного співвідношення. Сітки фотоіонізаційних моделей H II регіонів можуть бути використані як джерело для визначення відношення між інтенсивністю сильних емісійних ліній та вмістом Оксигену. Такі калібровки зазвичай називають теоретичними або модельними. З іншого боку, як базис для створення калібровки можна використовувати H II регіони, хімічний склад яких визначений за допомогою прямого T_e-методу. Такі калібраційні співвідношення зазвичай називають емпіричними. Також існують і так звані гібридні калібровки, де використовуються обидва методи.

Існують значні систематичні відмінності між результатами, отриманими за допомогою різних калібраційних співвідношень. Теоретичні/модельні калібровки зазвичай дають в результаті вміст Оксигену, який в 1.5-5 разів вищий, аніж результати, отримані прямим T_e-методом або за допомогою емпіричних калібровок. Тому, на даний момент не існує ніякої «абсолютної» шкали металічностей H II регіонів.

Емпіричні калібровки мають певні переваги над теоретичними. Шкала металічностей для емпіричних калібровок добре визначена через визначення металічностей H II регіонів T_e-методом. В цьому сенсі емпіричну шкалу можна вважати абсолютною. Результати визначення H II регіонів, отримані різними емпіричними калібраційними співвідношеннями співставні між собою, а також із результатами прямого T_e-методу.

Проте побудова емпіричних калібровок має певні складнощі. Не всі прямі визначення хімічного складу є точними, адже вимірювання слабких авроральних ліній може нести в собі значні похибки. Тому вибір H II регіонів, які будуть слугувати основою побудови калібраційного співвідношення не є тривіальною задачею.

Варто коротко поговорити про обґрунтованість та надійність визначення вмісту Оксигену. Це питання можна розглядати на трьох рівнях.

По-перше, точність калібровок залежить від числа та якості точок калібрації, тобто вхідних даних. Як було зазначено вище, бажано отримати більше нових високоточних вимірювань спектрів H II регіонів для підвищення надійності визначення вмісту хімічних елементів за допомогою калібраційних співвідношень.

По-друге, існує розбіжність між значеннями часток хімічних елементів даного H II регіону, отриманими за допомогою прямого T_e-методу та побудови моделей на базі тих самих ударно збуджуваних ліній. Можна піддати сумніву результати, як отримані T_e-методом, так і моделюванням зон H II. З одного боку, необхідно навести цитату з оглядової статті, написані однією з розробниць моделей H II регіонів Стасінської[45]: «Широко поширена думка про те, що фотоіонізаційні моделі дають в результаті найбільш точні значення хімічного складу. Це було б правдою, якби обмеження були достатньо чисельними (не лише обмеження на відношення емісійних ліній, а також на зоряний вміст і розподіл небулярного газу) і якби модельні оцінки були ідеальними (фотоіонізаційний код правильно обробляє всі важливі фізичні процеси та використовує правильні атомні дані). Ці умови ніколи не виконувались на практиці». З іншого боку, є певні фактори, що можуть вплинути на результати, отримані за допомогою прямого T_e-методу. Варто наголосити, що логіка, на основі якої побудований цей метод є бездоганною. Незважаючи на це, практична реалізація цього методу базується на певних припущення, обґрунтованість яких може бути піддана сумніву. І справді, рівняння T_e-методу встановлюють взаємозв’язок інтенсивностей емісійних ліній з електронною температурою та хімічним складом в певному об’ємі за сталих умов (електронної температури та хімічного складу). В реальності, можливі просторові варіації фізичних умов всередині H II регіону можуть вплинути на визначення хімічного складу T_e-методом.

По-третє, зазвичай, для визначення електронної температури та хімічного складу H II регіону використовують ударно збуджувані лінії. Електронну

температуру в H II регіоні можна визначити і з бальмерівського (пашенівського) стрибків, а хімічний склад можна отримати з використанням оптичних рекомбінаційних ліній. Група Гусєвої ([41],[42]) визначила електронні температури бальмерівських та пашенівських стрибків для великої вибірки H II регіонів. Було виявлено, що електронна температура в O^{++} зонах, яка визначається через рівняння T_e-методу (з ударно збуджуваних ліній) не відрізняються, в статистичному сенсі, від електронних температур зон H^+, визначених з бальмерівських/пашенівських стрибків, хоча не варто відкидати можливість розбіжностей порядку 3-5%. Вміст O^{++}, отриманих з оптичних рекомбінаційних ліній систематично вище в 1.5-3 рази від результатів, отриманих T_e-методом.

Було висловлено декілька припущень про природу таких відмінностей в результатах, отриманих з ударно збуджуваних та оптичних рекомбінаційних ліній. Пеймберт[38] припустив, що температура в H II регіонах не є сталою в усіх точках, а флуктуює на невеликих масштабах. Якщо вплив цих флуктуацій достатньо серйозний, то вміст Оксигену, визначений T_e-методом, буде нижчим, а результат, отриманий по рекомбінаційним лініям, не зміниться. Цаміс та Пекіньот[39] запропонували подвійну модель частки хімічних елементів, яка включає в себе невеликі по розміру неоднорідності у вигляді включень зі зниженим вмістом Гідрогену. В такому випадку ні результати, отримані зі збуджуваних ліній, ні з рекомбінаційних є надійними.

Тому, на даний момент, не існує абсолютної шкали визначення металічностей в H II регіонах. Поки не буде вирішена проблема з розбіжністю результатів, отриманих різними шляхами, будуть існувати сумніви щодо обґрунтованості та надійності шкал металічностей.

Наприкінці варто зазначити, що T_e-метод (та більшість калібраційних співвідношень, які беруть за опорну точку результати цього методу) дає в результаті хімічний склад Оксигену в газі H II регіону. Але частина Оксигену також знаходиться в пиловій компоненті небулярного середовища.

В цьому розділі будуть розглянуті основні методи визначення хімічного складу регіонів H II та інших об’єктів (як модельно-теоретичні, так і емпіричні методи), а також отримаємо перелік калібраційних співвідношень, які будемо використовувати в розділі 4.

1.1. T_e-метод Пілюгіна.

Даний метод був запропонований в роботі групи дослідників під керівництвом Леоніда Пілюгіна в роботі «On the relation between electron temperatures in the O^+ zones in high-metallicity H II regions».[1]

Досить точні значення вмісту різних хімічних елементів можна отримати, знаючи електронну температуру T_e H II регіону, використовуючи класичний T_e – метод. Для цього методу важливою є точність атомних даних, які необхідні для виведення рівнянь цього методу. В різних роботах (наприклад [2],[3]) було визначено, що рівняння розрахунку йонних часток Оксигену є достатньо якісними, щоб за даного набору електронних температур t_2 та t_3 рівняння, отримані різними авторами, давали близькі один до одного результати.

Електронні температури t_2 та t_3 визначаються відповідними діагностичними співвідношеннями. Для t_3 використовується відношення інтенсивностей $[O\ III]\lambda\lambda 4959{,}5007$ до $[O\ III]\lambda 4363$. Для t_2 - $[O\ II]\lambda 3727$ до $[O\ II]\lambda\lambda 7320{,}7330$. Проте для t_2 значення мають дуже велику похибку, адже лінія $[O\ II]\lambda 7320 + \lambda 7330$ – це слабка авроральна лінія, і виміри її інтенсивності можуть мати великі випадкові похибки. Також друге відношення може залежати від рекомбінації(див. роботи [4],[5]). Але Ізотовим та його групою[3] було показано, використовуючи вказані вище співвідношення, що ці дві електронні температури задовольняють відношення між ними, яке було отримане з фотоіонізаційних моделей, але мають значне розсіяння даних. Це розсіяння, за припущенням вчених, спричинене великими потоковими похибками в визначенні інтенсивності слабкої емісійної лінії $[O\ II]\lambda\lambda 7320{,}7330$.

Також для визначення t_2 може використовуватися і відношення інтенсивностей ліній $[N\ II]\lambda\lambda 6548{,}6584$ до $[N\ II]\lambda 5755$. Таке відношення дає точніші результати. Проте, вклад рекомбінації в збудження $[N\ II]\lambda 5755$ може впливати на температуру, визначену цим співвідношенням.[4],[5] Також варто зазначити, що t_2 за лініями Нітрогену визначається лише в регіонах, де можна визначити співвідношення $([O\ III]\lambda\lambda 4959{,}5007)/[O\ III]\lambda 4363$.

Зазвичай, набір рівнянь для визначення йонних часок O^{++}/H^+ та O^+/H^+ застосовується до всієї туманності. Але, якщо застосувати рівняння для O^{++}/H^+ лише до O^{++} зони, то ми отримаємо чисте відношення O/H. Немає причин припускати, що вміст Оксигену в зонах O^{++} та O^+ відрізняється. Тому необхідною умовою є те, щоб рівняння O^{++}/H^+ для зон O^{++} та O^+/H^+ для зон O^+давали однакові результати. Ця умова дозволяє отримати залежність між t_2 та

t_3. Рівняння для O^{++}/H^{+} можна використати для зон O^{++} лише при наявності інформації про вклад цих зон в потік H_β в H II регіоні.

Для розрахунків використовуються такі позначення[1]:

$$R_2 = I_{[O\ II]\lambda3727+\lambda3729}/I_{H_\beta}$$

$$R_3 = I_{[O\ III]\lambda4959+\lambda5007}/I_{H_\beta}$$

$$R = I_{[O\ III]\lambda4363}/I_{H_\beta}$$

$$R_{23} = R_2 + R_3$$

$$N_2 = I_{[N\ II]\lambda6548+\lambda6584}/I_{H_\beta}$$

$$S_2 = I_{[S\ II]\lambda6717+\lambda6731}/I_{H_\beta}$$

$$P = R_3/(R_2 + R_3) \tag{1.1}$$

Класична версія T_e – методу.

Для визначення хімічного складу регіону H II зазвичай використовується двозонна модель температурної структури([3]). За цим методом, електронна температура t_3 в зоні $[O\ III]$ в одиницях 10^4 K задається наступним співвідношенням[1]:

$$t_3 = \frac{1.432}{log(R_3/R) - \log C_T}$$

де $C_T = (8.44 - 1.09t_3 + 0.5t_3^2 - 0.08t_3^3)v,$ (1.2)

$$v = \frac{1 + 0.0004x_3}{1 + 0.044x_3}, x_3 = 10^{-4}n_e t_3^{-1/2}$$

Йонний вміст Оксигену відповідно задається наступними рівняннями[1]:

$$12 + \log(O^{++}/H^{+}) = log\left(\frac{I_{[O\ III]\lambda4959+\lambda5007}}{I_{H_\beta}}\right) + 6.200 + \frac{1.251}{t_3} - 0.55logt_3 - 0.014t_3, \tag{1.3}$$

$$12 + \log(O^{+}/H^{+}) = log\left(\frac{I_{[O\ II]\lambda3727+\lambda3729}}{I_{H_\beta}}\right) + 5.961 + \frac{1.676}{t_2} - 0.40logt_2 - 0.034t_2 + \log(1 + 1.35x_2), x_2 = 10^{-4}n_e t_2^{-\frac{1}{2}}. \tag{1.4}$$

n_e – електронна концентрація в см$^{-3}$.

Загальний вміст Оксигену можна отримати з наступного рівняння:

$$\frac{O}{H} = \frac{O^+}{H^+} + \frac{O^{++}}{H^+}. \quad (1.5)$$

Електронну температуру t_2 можна визначити з рівняння залежності між t_2 та t_3, що визначається з моделей H II регіонів. Широко використовується відношення, запропоноване Кемпбеллом([6]) за моделями Стасінської([7])

$$t_2 = 0.7t_3 + 0.3, \quad (1.6)$$

проте за $t_3 < 1.0$ моделі схожі на ізотермічні туманності, тому в такому випадку $t_2 = t_3$.[8]

1.2. Альтернативна версія T_e-методу.

Розглянувши наступне рівняння[1]

$$12 + \log(O^{++}/H^+) = log\left(\frac{I_{[O\,III]\lambda4959+\lambda5007}}{I_{H_\beta}}\right) + 6.200 + \frac{1.251}{t_3} - 0.55logt_3 - 0.014t_3, \quad (1.7)$$

ми бачимо, що потоки, необхідні для визначення R_3 і лінії H_β виходять з різних частин туманності. Джерелом потоку випромінювання лінії H_β є весь H II регіон, в той час як потік R_3 відповідає регіонам з O^{++}. Якщо це рівняння застосовується лише до O^{++} регіону, то воно дає загальне значення відношення вмісту Оксигену до Гідрогену в середовищі. В такому випадку даний вираз можна переписати наступним чином:

$$12 + \log(O/H) = log\left(\frac{I_{[O\,III]\lambda4959+\lambda5007}}{w*I_{H_\beta}}\right) + 6.200 + \frac{1.251}{t_3} - 0.55logt_3 - 0.014t_3, \quad (1.8)$$

де w – частка потоку H_β в O^{++} зоні. Використовуючи позначення, запропоновані на початку, можна переписати це рівняння наступним чином:

$$12 + \log(O/H) = log(R_3/w) + 6.200 + \frac{1.251}{t_3} - 0.55logt_3 - 0.014t_3. \quad (1.9)$$

Аналогічно може бути переписано і рівняння для відношення O^+/H^+:

$$12 + \log(O/H) = log\left(\frac{R_2}{1-w}\right) + 5.961 + \frac{1.676}{t_2} - 0.40logt_2 - 0.034t_2 + \log(1 + 1.35x_2) \quad (1.10)$$

Немає причин сумніватися в тому, що в зонах O^+ і O^{++} різний вміст Оксигену. Тому ми можемо прирівняти між собою праві частини цих двох рівнянь:

$$log(R_3/w) + 6.200 + \frac{1.251}{t_3} - 0.55logt_3 - 0.014t_3 = log\left(\frac{R_2}{1-w}\right) + 5.961 + \frac{1.676}{t_2} - 0.40logt_2 - 0.034t_2 + \log(1 + 1.35x_2) \quad (1.11)$$

Це рівняння може бути розв'язане для t_2 за умови, що відомі значення t_3, n_e та w. [9],[10]

Для оцінки частки потоку H_β в O^{++} зоні нам необхідні точні виміри значень потоків ліній Оксигену в високометалічних H II регіонах. Маючи ці результати, можна вивести наступне співвідношення[11]:

$$\log R = -4.151 - 3.118\log P + 2.958\log R_3 - 0.680(\log P)^2 \quad (1.12)$$

Частка випромінювання в зоні O^{++} може бути оцінена таким чином:

$$w = R_3^{obs}/R_3^{P=1}. \quad (1.13)$$

Проте ця оцінка не є найточнішою, адже значення цього параметра залежить від багатьох величин, серед яких і електронна температура, і вміст Оксигену та інші.

Так як коефіцієнт випромінювання H_β, $E_{4,2}^0$ залежить від електронної температури ([12])

$E_{4,2}^0 = 1.387t^{-0.983}10^{-0.0424/t}$, то вклад w_c зони $[O\ III]$ до загального потоку лінії H_β в регіоні H II задається наступним виразом:

$$w_c = \frac{E_{4,2}^0(t_3)w}{E_{4,2}^0(t_3)w + E_{4,2}^0(t_2)(1-w)} \quad (1.14)$$

Використовуючи цю інформацію, можна отримати співвідношення, що зображує залежність між електронними температурами t_2 та t_3

$t_2 = 0.729t_3 + 0.257$, що хоч і відрізняється від загальноприйнятого вигляду цієї залежності, але дає результати, близькі до тих, що отримуються з її допомогою. Проте і загальноприйнята версія цієї залежності має право на життя, адже результат, отриманий класичним співвідношенням, достатньо точний.

1.3. R_{23}-метод. Калібраційні співвідношення МакГоха та Зарицького-Кеннікатa-Хахри.

Гарною працею по опису визначення хімічного складу віддалених галактик R_{23}-методом є робота Кобульницького, Кеннікатa та Пізаньо «On measuring nebular chemical abundances in distant galaxies using global emission-line spectra.» [13]

Порівняно до дослідження ліній поглинання, для яких необхідна наявність ліній віддалених квазарів в полі зору, дослідження емісійного спектру небулярних середовищ можливе у будь-якій галактиці з наявними H II регіонами. В небулярній спектроскопії проблеми з невизначеностями в ширині спектральних ліній, ефектами насичення, наявності багатьох параметрів, пов'язаних зі швидкістю та іонізаційними корекціями є незначними і зачасту нехтовними. Найбільшими проблемами наземної небулярної спектроскопії є обмежене відношення сигналу до шуму (сигнал може зливатись з фоновим шумом через слабкість ліній випромінювання) та низька роздільна здатність зображень, отриманих на Землі під час спостережень віддалених регіонів. Типовий елемент з роздільною здатністю в $1''$, який при червоному зміщенні в 0.5 має розмір порядку 5 кпк, що може бути більше ніж вся досліджувана галактика.

Зазвичай, хімічний аналіз H II регіонів вимагає вимірювань рекомбінаційних ліній H та He, а також ударно збуджувані лінії одного або декількох ступенів іонізації важчого елементу. Оксиген завжди був найчастіше використовуваним індикатором металічності міжзоряного середовища через його високу відносну частку та сильні емісійні лінії в оптичній частині спектру (наприклад, лінії $[O\ II]\lambda 3727$ та $[O\ III]\lambda\lambda 4959{,}5007$). В найкращому випадку, електронна температура іонізованого середовища може бути визначена з відношення авроральної лінії вищого рівня збудження, наприклад $[O\ III]\lambda 4363$, до лінії $[O\ III]\lambda\lambda 4959{,}5007$. На практиці може виявитись, що виміри лінії $[O\ III]\lambda 4363$ можуть бути ускладнені, адже інтенсивність цієї лінії складає лише кілька відсотків від лінії H_β навіть в найменш багатих на важкі елементи регіонах

(I Zw 18: $(O/H) = 0.02(O/H)_{Sun}$) і стає занадто слабкою для вимірювань в регіонах з вищою металічністю. [13]

Також електронну концентрацію середовища можна наближено визначити, використовуючи чутливе до концентрації відношення в дублетах $[S\ II]\lambda6713/[S\ II]\lambda6731$ або $[O\ II]\lambda3727/[O\ II]\lambda3729$. У випадку наявності яскравих H II регіонів можна досить точно визначити вміст Гелію, Карбону, Неону, Силіцію, Сульфуру та Аргону в близьких галактиках. Проте, в віддалених H II регіонах лише найяскравіші лінії достатньо чіткі для проведення вимірювань, навіть якщо використовувати найкращі телескопи та інструменти доступні вченим на даний момент. Роздільна здатність сучасних наземних інструментів така, що один роздільний елемент буде покривати площу багатьох галактик з різними фізичними характеристиками.

Є три основні ефекти, які впливають на результати вимірювань просторово інтегрованих емісійних спектрів галактик порівняно до значень, які можна отримати, вимірюючи спектри окремих H II регіонів з використанням апаратури з кращою роздільною здатністю (порядку десятків парсек на елемент):

1. В зображення можуть входити як і декілька H II регіонів одночасно, так і звичайний газ з подібною металічністю, але іншими умовами іонізації.
2. В зображення можуть потрапити регіони з великою різницею в рівнях металічності.
3. В полі зору можуть опинитися як джерела емісійних, так і абсорбційних спектрів, що може негативно вплинути на вимірювання еквівалентних ширин ліній та інтенсивності емісійних ліній. [13]

Було визначено, що електронна температура гарно описується емпіричним наближенням фотоіонізаційних моделей:

$$T_e(O^+) = 2[T_e^{-1}(O^{++}) + 8 * 10^{-5}]^{-1}. \quad (1.15)$$

Вищі ступені іонізації та вклад нейтрального Оксигену дуже слабко впливають на загальний результат і ними можна знехтувати.

Порівнявши кінцевий результат вмісту Оксигену в середовищі з відношенням сигналу до шуму лінії $[O\ III]\lambda4363$, можна помітити закономірність: чим вища електронна температура в апертурі при спостереженні певної галактики, тим менший вміст Оксигену. Цього можна очікувати, адже за сталого вмісту Оксигену електронна температура T_e та емісійність ударно збуджуваної лінії ϵ залежні як

$$\epsilon \propto T_e^{-1/2} e^{h\nu/kT_e}. \quad (1.16)$$

Глобальні спектри постійно дають в результаті вищі електронні температури (нижчий вміст Оксигену), ніж у випадку спостереження окремих H II регіонів тієї самої галактики. В більшості випадків це можна пояснити тим, що глобальний спектр дає в результаті електронні температури, що відповідають найвищим значенням серед отриманих при використанні менших апертур. Одним із можливих пояснень може бути переоцінка лінії $[O\ III]\lambda 4363$ в зв'язку з нижчим відношенням сигнал-шум в глобальних спектрах. Але більш імовірним варіантом є домінація в таких спектрах регіонів з найвищою поверхневою небулярною яскравістю., які, в свою чергу, мають найвищу електронну температуру. Так як глобальний спектр по своїй суті є усередненим зваженим за інтенсивністю спектром, результати переважно відбираються з регіонів найвищої поверхневої яскравості, які досить вірогідно були іонізовані наймолодшими, найгарячішими зірками і тому мають найвищу електронну температуру. Експоненційна залежність лінії $[O\ III]\lambda 4363$ від T_e впливає на виміри, зміщуючи електронну температуру до більших значень. Тому флуктуації температури в полі зору інструмента будуть викликати штучне зростання електронної температури, виміряної з ударно збуджуваних ліній, що спостерігалось в індивідуальних H II регіонах і широко обговорювалось у літературі. [13]

Є декілька ефектів, які можуть викликати зниження оцінки частки Оксигену в глобальному спектрі на 0.05-0.2 декс порівняно з аналізом конкретних H II регіонів. Так як частки хімічних елементів, визначені з ударно збуджуваних ліній спектру чутливі до оцінки електронної температури, найбільш вірогідною причиною розбіжності в визначенні вмісту різних елементів може бути невизначеність температури або її флуктуація в спостережуваному регіоні. Галактики, які містять один або більше великих H II регіонів будуть містити в собі суміш газів з різною електронною температурою. В результаті буде отримуватись глобальний спектр, який буде важко описати за допомогою однієї електронної температури; в такому випадку зазвичай використовується двозонне наближення $T_e(O^+), T_e(O^{++})$.

Інший фактор, який може вплинути на виміри хімічного складу в глобальних спектрах, навіть у випадку відсутності температурних флуктуацій, це зміни в іонізаційному параметрі $U = Q_{Ly\alpha}/(4\pi R^2 n_H c)$, концентрації іонізуючих фотонів. Дифузний іонізований газ із низьким іонізаційним параметром ($\log U \cong -3.5$) відповідає за 20-50% від всього випромінювання

Бальмерівських ліній в неправильних та спіральних галактиках. Такий газ в основному фотойонізований і в ньому відношення $[O\ II]/[O\ III]$ приблизно на порядок вище, аніж у H II регіонах. [13]

Для галактик, досліджених обома методами, було визначено, що кореляція між іонізаційним параметром та різницею між вимірами вмісту Оксигену в глобальному спектрі та для окремих регіонів слабка або її не існує.

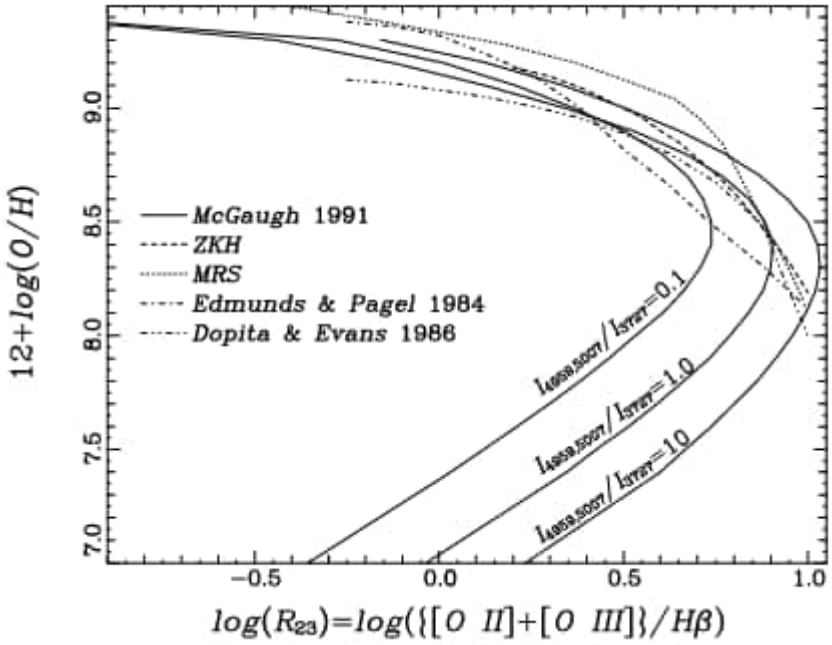

Рис.1.1. Поведінка різних калібраційних співвідношень, залежних від R_{23}, взятих з робіт різних авторів: верхня частина графіку називається верхньою, або високометалічною гілкою, а нижня – нижньою (низькометалічною). В районі $12 + \log(O/H) = 8.4$ невизначеність значення досягає 0.25 декс. В інших частинах графіку – порядку 0.15 декс. За низьких металічностей, результат буде відрізнятись, залежно від параметру іонізації, зображеного на графіку за калібраційного співвідношення МакГоха (McGaugh 1991), позначеного прямою лінією. Пунктиром позначене калібраційне співвідношення Зарицького-Кеннікатa-Хахри(ZKH), крапками – МакКола-Рибського-Шиєлдса (MRS), крапка-тире – Едмундса-Пейджела (Edmunds & Pagel 1984), дві крапки-тире – Допіти-Еванса (Dopita & Evans 1986). Джерело - [13]

Спіральні галактики з регіонами активного зореутворення також можуть мати різні іонізаційні та температурні умови в міжзоряному середовищі. Проте, вони також показують значні хімічні градієнти, часто відрізнячись на порядок (окрім галактик з яскравою оптичною перемичкою).[14-16] Глобальні спектри спіральних галактик обов'язково покриватимуть широкий діапазон металічностей. В високометалічних H II регіонах ($12 + \log(O/H) \geq 8.5$) чутлива до температури лінія $[O\ III]\lambda 4363$ дуже слабка, і часто не може бути

зареєстрована. Незважаючи на це, вміст Оксигену можна оцінити, використовуючи лише $[O\ II]\lambda 3727$ та $[O\ III]\lambda\lambda 4959{,}5007$, а також лінію H_β. Для таких регіонів існує монотонна залежність між відношенням інтенсивностей спостережуваних ударно збуджуваних емісійних ліній R_{23}, та вмістом Оксигену в туманності. На практиці з пари ліній $[O\ III]\lambda\lambda 4959{,}5007$ необхідна лише одна, адже існує пряма залежність їх інтенсивностей для будь-яких температур та густин, що можуть зустрічатися в H II регіонах. В більшості високометалічних H II регіонів R_{23} мінімальне, адже висока металічність призводить до ефективного охолодження, знижуючи електронну температуру і рівень ударного збудження. R_{23} зростає в більш бідних на метали туманностях, так як менших їх вміст означає послаблення охолодження, зростання електронної температури та підвищення рівня ударного збудження. Проте, за умови $12 + \log(O/H) < 8.4$ з'являються проблеми в розрахунках. У випадку високої металічності різні калібраційні методи дають відхилення не більше 0.2 декс за умови $R_{23} = const$. Це відхилення зумовлене певними невизначеностями в калібраційних методах, які базуються на фотоіонізаціних моделях та спостереженнях H II регіонів. У випадку низької металічності, окрім того, що зниження металічності послабляє охолодження середовища та підвищує електронну температуру, інтенсивність ліній $[O\ II]$ та $[O\ III]$ падає по причині сильного падіння вмісту Оксигену в міжзоряному середовищі. Також стає важливим вплив іонізаційного параметра. [13]

Проте у просторово-інтегрованих спектрів є свої недоліки, про які було сказано раніше.

У випадку відсутності достатньо достовірних вимірювань лінії $[O\ III]\lambda 4363$ пропонується декілька калібраційних співвідношень.

1. ZKH (Zaritskiy-Kennicutt-Huchra)[16]

$$12 + \log(O/H) = 9.265 - 0.33x - 0.202x^2 - 0.207x^3 - 0.333x^4,$$
$$x = \log R_{23}. \qquad (1.17)$$

Це калібраційне співвідношення працює в регіонах з високою металічністю.

2. McGaugh[17]

$$12 + \log(O/H)_l = 12 - 4.944 + 0.767x + 0.602x^2 - y(0.29 + 0.332x - 0.331x^2) \qquad (1.18)$$

Це співвідношення працює для бідних на метали регіони.

$$12 + \log(O/H)_u = 12 - 2.939 - 0.2x - 0.237x^2 - 0.305x^3 - 0.0283x^4 - y(0.0047 - 0.0221x - 0.102x^2 - 0.0817x^3 - 0.00717x^4) \quad (1.19)$$

$$y = \log \frac{I_{[O\ III]\lambda\lambda 4959,5007}}{I_{[O\ II]\lambda 3727}}$$

Друге співвідношення працює для високометалічних регіонів.

1.4. Інші калібраційні співвідношення R_{23}-методу.

В 1979 році Пейджел з колегами[44] запропонували використовувати для оцінки вмісту Оксигену в тих H II регіонах, де не вдається виміряти авроральні лінії Оксигену, і тому неможливо застосувати прямий метод, використовувати сумарну інтенсивність сильних ліній Оксигену $([O\ III]\lambda\lambda 4959{,}5007 + [O\ II]\lambda 3727)/H_\beta$, тобто запропонували калібровку виду $O/H = f(R_{23})$. Використовуючи в якості калібраційних точок області H II з вмістом Оксигену, що були пораховані прямим методом, та фотоіонізаційні моделі цих регіонів, Едмундс та Пейджел[19] знайшли залежність $O/H = f(R_{23})$ у вигляді таблиці. Проте, ці результати можна апроксимувати поліномом для більш зручного використання при обрахунках. Через особливість даної залежності в результаті отримуються дві функції, одна для верхньої гілки, та друга – для нижньої.

$$12 + \log(O/H)_{EP,u} = 9.342 - 0.454x - 0.843x^2 - 0.401x^3 + 0.545x^4,$$

$$12 + \log(O/H)_{EP,l} = 1.81x + 6.24.$$

$$x = \log R_{23}. \quad (1.20)$$

Перше калібраційне співвідношення відповідає верхній гілці (умова $12 + \log(O/H) \geq 8.2$, друге відповідно – нижній. Самі автори зазначали, що їх калібраційне співвідношення дає завищені значення в високометалічних H II регіонах. Причиною цього стало використання модельної оцінки вмісту Оксигену в H II регіоні Searle 5 спіральної галактики M101, яка була отримана Шиєлдсом та Сірлом. Ця оцінка вмісту Оксигену не підтвердилась в наступних дослідженнях, вміст Оксигену в цьому регіоні виявився значно нижчим, ніж результати Шиєлдса та Сірла.

Скілман[32] отримав залежність $O/H = f(R_{23})$ для нижньої гілки у дещо іншому вигляді:

$$12 + \log(O/H)_{Sk,l} = 1.21x + 6.64. \quad (1.21)$$

Можна побачити, що коефіцієнти, отримані ним, значно відрізняються від результатів Едмундса та Пейджела, хоча вони використовувати аналогічні методи, але з іншими вхідними даними.

Допіта та Еванс розрахували сітку фотоіонізаційних моделей, після чого знайшли залежність $O/H = f(R_{23})$ для верхньої гілки[20]. Їх результати добре апроксимуються поліномом

$$12 + \log(O/H)_{DE,u} = 9.072 - 0.170x - 0.0037x^2 - 0.371x^3 - 0.330x^4. \quad (1.22)$$

МакКол, Рибський та Шиєлдс провели аналогічну роботу[18], і в результаті отримали дані, що апроксимуються наступним поліномом:

$$12 + \log(O/H)_{MRS,u} = 9.327 - 0.171x + 0.113x^2 - 0.561x^3 - 0.593x^4. \quad (1.23)$$

Згадані вище Зарицький, Кеннікат та Хахра виміряли інтенсивності сильних ліній в спектрах 159 регіонів H II в 14 спіральних галактиках. Для кожного регіону вони визначили вміст Оксигену за допомогою описаних вище варіантів калібраційного співвідношення. Як істинне вони приймали середнє значення з трьох результатів, а відмінності в результатах трактували як похибки визначення вмісту. В результаті ними було запропоновано поліном, що поданий в роботі вище. Проте вони зазначити, що дисперсія значень, отриманих за допомогою різних калібраційних співвідношень вища, аніж очікувана похибка вимірювання сильних ліній.

При порівнянні різниці результатів робіт Зарицького, Кеннікатa та Хахри, Едмундса та Пейджела і вмістом Оксигену, отриманим за допомогою прямого T_e-методу в залежності від параметру збудження даного небулярного середовища P, можна побачити пряму залежність цієї різниці від параметру збудження.

Ще один варіант такої калібровки був запропонований Тремонті та ін.[33]

$$12 + \log(O/H)_{Tr,u} = 9.185 - 0.313x - 0.264x^2 - 0.321x^3, \quad (1.24)$$

Для нижньої гілки також було запропоновано калібровку Уіна[34]

$$12 + \log(O/H)_{Yin,l} = 1.401x + 6.486. \quad (1.25)$$

В цьому випадку калібраційними точками були галактики огляду SDSS, голубі компактні галактики та окремі регіони H II, в яких значення вмісту Оксигену були визначені за допомогою прямого T_e-методу. Для калібровки було використано понад 700 об'єктів.

1.5. *P*-метод Пілюгіна визначення хімічного складу.

Леонід Пілюгін тривалий час досліджував калібраційні співвідношення різних видів. Однією з найважливіших робіт була ідея по використанню параметру збудження P, запропонована в роботі «On the oxygen abundance determination in H II regions».[31]

Дослідження хімічних властивостей галактик дуже важливе для розвитку теорії структури та еволюції галактик. Є кілька причин, чому Оксиген грає ключову роль в розумінні еволюції хімічного складу галактик. По-перше, зараз вже доступний великий масив даних спектроскопії для великого числа галактик і є багато робіт, в яких опубліковані дані щодо вмісту Оксигену, визначеного за інтенсивностями ліній. По-друге, джерело появи Оксигену, судячи з досліджень, досить добре зрозуміле, на відміну від Карбону та Нітрогену. Вміст Оксигену може бути інструментом дослідження еволюції галактик.

Точні значення вмісту Оксигену можуть бути визначені з вимірювань чутливих до температури відношень типу $[O\ III]\lambda\lambda 4959{,}5007/[O\ III]\lambda 4363$ (так званий T_e-метод). На жаль, в багатих на Оксиген H II регіонах чутливі до температури лінії важко зареєструвати. Також існує і R_{23}-метод, який базується на відношенні $R_{23} = (I_{[O\ II]\lambda 3727+\lambda 3729} + I_{[O\ III]\lambda 4959+\lambda 5007})/I_{H_\beta}$. Проте і у цього методу є свої недоліки, про які говорилось вище. Тому був запропонований так званий P-метод, де $P = R_3/(R_2 + R_3)$ – параметр збудження. Цей параметр є гарним показником того, наскільки жорстким є іонізаційне випромінювання. А самі показник жорсткості іонізаційного випромінювання та R_{23} є параметрами, через які можна задати значення відношення Оксигену до Гідрогену.

Відносна сталість показника R_{23} в конкретній туманності означає, що залежність його від іонізаційного параметра якщо і є, то дуже слабка. Це дає причину очікувати, що значення O/H це функція R_{23} та жорсткості іонізаційного випромінювання. В свою чергу, це означає, що в регіонах з середнім рівнем металічності R_{23} в основному залежить від вмісту Оксигену в H II регіоні та показника жорсткості випромінювання і це очевидно випливає з наступних

спостережуваних фактів: значення R_{23} відносно стале у конкретному H II регіоні та відсутність відповідності між цим значенням та вмістом Оксигену. [31]

Часто спостерігаються спектри не всього H II регіону, а лише його частини. Варто зазначити, що значення P є гарним індикатором жорсткості іонізаційного випромінювання лише за умови, що виміряний потік випромінювання відображає відносний вклад різних ліній до загального спектру туманності. Цей факт, разом з якістю отриманих спектрів, варто взяти до уваги при підборі H II регіонів, що використовуються для побудови емпіричного співвідношення між інтенсивностями сильних ліній та вмістом Оксигену.

Широко прийнята думка, що вміст Оксигену можна визначити з вимірювань відношення температурно-залежних ліній, наприклад, T_e-метод. Загалом, в різних роботах, значення вмісту Оксигену в тому ж H II регіоні відрізняються по наступним причинам: різні атомні дані, що використовувались в розрахунках, різні інтерпретація температурної структури та похибки в вимірюванні інтенсивностей ліній.

Зручно почати пошук відношення між вмістом Оксигену та параметрами P та R_3 з такого поліному:

$k_0 R_3 = k_1 P + k_2 P^2 + k_3 P^3$. Доданок нульового степеня поліному має бути рівним нулю, так як P та R_{23} рівні нулю одночасно за означенням. Враховуючи відносне положення H II регіонів з різною металічністю на діаграмі $P - R_3$, коефіцієнти k_j будуть мати форму $a_j + b_j Z$, де $Z = 12 + \log(O/H)$. Враховуючи це, поліном можна переписати в наступному вигляді:

$$R_3 = \frac{(a_1+b_1Z)P+(a_2+b_2Z)P^2+(a_3+b_3Z)P^3}{1+b_0Z} \tag{1.26}$$

Коефіцієнт a_0 прирівняний до 1 після ділення чисельника та знаменника на a_0. Це рівняння можна розв'язати відносно Z.

$$12 + \log(O/H)_P = \frac{R_3 - a_1 P - a_2 P^2 - a_3 P^3}{b_1 P + b_2 P^2 + b_3 P^3 - b_0 R_3} \tag{1.27}$$

Враховуючи, що $R_3 = PR_{23}$, можна переписати попереднє співвідношення наступним чином

$$12 + \log(O/H)_P = \frac{R_{23} - a_1 - a_2 P - a_3 P^2}{b_1 + b_2 P + b_3 P^2 - b_0 R_{23}}$$

(1.28)

Існують різні набори коефіцієнтів, які дають точність визначення вмісту Оксигену нижче 0.1 декс. Для розрахунків було вибрано наступне калібраційне співвідношення[31]

$$12 + \log(O/H)_P = \frac{R_{23} + 54.2 + 59.45P + 7.31P^2}{6.07 + 6.71P + 0.371P^2 + 0.243R_{23}},$$

(1.29)

яке дає дуже гарне відношення між інтенсивністю сильних ліній та вмістом Оксигену, і може використовуватися для H II регіонів середнього рівня металічності зі спектрами без явних температурно-чутливих ліній.

1.6. $N2$- та $O3N2$-калібратори як індикатори металічності складу для об'єктів з великим червоним зміщенням.

Автори роботи «New light on the search for low metallicity galaxies. I. The $N2$ calibrator»[22] запропонували використання параметру $N2$ як індикатору металічності, що дозволяє досить просто оцінити цю величину для об'єктів з великим червоним зміщенням.

Параметр $N2$ визначений як $N2 = \log([N\ II]\lambda 6584/H_a)$. Цей параметр досить добре корелює з вмістом Оксигену і здатний описати весь діапазон металічностей, починаючи з найбідніших регіонів, і закінчуючи найбагатшими на метали галактиками.

Хоч і досить тісне, відношення між $N2$ та вмістом Оксигену має розсіяння, яке може бути більшим, ніж похибка спостереження. Порівняння моделей і спостережуваних даних натякає на те, що частина цих розсіянь відношення $N2/(12 + \log(O/H))$ може залежати від ступеня іонізації туманності, що, в свою чергу, може залежати від віку об'єкта. Вивчивши зв'язок між розсіянням і чутливим до віку параметром – еквівалентною шириною лінії H_β, $EW(H_\beta)$. Залежність $EW(H_\beta)$ від віку кластера заключається в тому, що еквівалентна ширина емісійної лінії досягає декількох сотень ангстрем для H II регіону, фотоіонізованого первинними зорями, і зменшується зі зростанням віку кластера та його еволюції.[23] Проглядається чіткий тренд для об'єктів з високою точністю визначення O/H та $EW(H_\beta)$. Цей результат дозволяє припустити, що

вік об’єктів, що використовувалися як вхідні дані, може бути відповідальним за частину розсіяння даних відношення $N2$ до вмісту Оксигену.

Також варто очікувати відхилень значення металічності в 0.05-0.2 декс через відмінності між глобальними спектрами та спектрами з малою апертурою[13]. Ця різниця стає важливішою при порівнянні галактик з малим червоним зміщенням з просторовим спектром галактик із високим червоним зміщенням. Причини такого явища були описані вище. Тому варто розглядати вимірювання емісійних спектрів та визначення вмісту хімічних елементів з глобальних спектрів як нижню границю значення.

Параметр $N2$ має чіткі переваги спостережень для визначення металічностей в галактиках із зореутворенням. Окрім того, що параметр має лише одне значення для певних умов, він також має тісніший зв’язок із вмістом Оксигену, ніж R_{23}; проте, є недолік, який полягає в використанні заборонених ліній Нітрогену, що в свою чергу, означає чутливість калібраційного співвідношення до відношення N/O.

Враховуючи слабкості та обмеження емпіричного визначення вмісту хімічних елементів, калібратор $N2$ як метод визначення металічності дає декілька переваг: в цьому калібраційному співвідношенні використовуються лінії, що легко виміряти для великого діапазону червоних зміщень (до $z{\sim}2.5$); залежність N2-металічність монотонна; лінії $[N\,II]$ та H_a можуть бути відокремлені навіть у спектрах середньої якості; відношення $N2$ не залежить від поправок на почервоніння або калібровки потоку. З іншого боку, відношення N2 чутливе до іонізації та варіації N/O, що означає використання цієї калібровки лише для загальногалактичного вмісту хімічних елементів. Цікаво, що порівняння з фотоіонізаційними моделями показує відповідність N2 до комбінації первинного і вторинного джерел утворення Нітрогену. [22]

Серед емпіричних калібраційних співвідношень вперше індикатор $[O\ III]/[N\ II]$ запропонував використовувати Алуан.[24] Одну з таких калібровок можна знайти в роботі Петтіні та Пейджела «$[O\ III]/[N\ II]$ as an abundance indicator at high redshift».[46]

Позагалактичні H II регіони є одним із центрів досліджень вмісту різних хімічних елементів у Всесвіті. Точні вимірювання цих величин вимагають визначення електронної температури, яка, в свою чергу, зазвичай отримується з відношень інтенсивностей авроральних до небулярних ліній, наприклад, $[O\ III]\lambda4363/[O\ III]\lambda\lambda4959{,}5007$, так званий «прямий» T_e-метод. Добре відома

проблема цього методу полягає в тому, що зі зростанням металічності електронна температура падає і авроральні лінії стають занадто слабкими для реєстрації. Наприклад, К'юлі та Допіта [25] використовували комбінацію моделей формування зоряної популяції та фотоіонізаційних моделей для розробки набору іонізаційних параметрів та діагностичних співвідношень для часток хімічних елементів, що базується лише на оптично сильних емісійних лініях. Їх «оптимальний» метод базувався на відношеннях між лініями $[N\ II]$, $[O\ II]$, $[O\ III]$, $[S\ II]$, $[S\ III]$ та ліній серії Бальмера, які всі є набором сильних небулярних ліній, які доступні для спостереження з поверхні Землі. Побудова телескопів з зеркалами 8-10 метрів діаметром дозволила розширити спостереження цих ліній для великих червоних зміщень. Проте, за таких умов спостереження небулярних ліній зустрічають нові перепони. Першою і найбільш очевидною відмінністю є те, що зі зростанням відстані до об'єкта різко падає потік випромінювання. Проблема підсилюється тим фактом, що лінії зазнають червоного зміщення в близьку інфрачервону ділянку спектру, де фонове випромінювання неба на порядки вище, ніж в оптичному діапазоні. По-друге, за даного червоного зміщення лише частина сильних ліній потрапить в атмосферне вікно і буде доступною з Землі. Навіть за досить підходящого значення червоного зміщення, такого як, наприклад, $z \simeq 2.3$, яке зсуває лінії $[O\ II]$, $[O\ III]$ та H_β, H_a та, що відповідно потрапляють у смуги J, H та K, неможливо отримати значення інтенсивностей цих ліній за одне спостереження. Навпаки, необхідно використовувати різні налаштування спектрографа, що додає похибку у визначення відносних потоків ліній. [22]

Тому виникла необхідність пошуку простіших індикаторів часток хімічних елементів, що базуються на кількох емісійних лініях, бажано близьких довжин хвиль. Такі вимірювання, хоч і менш точні, аніж повноцінні дослідження спектру, можуть бути достатньо якісними для характеризації хімічного складу віддалених галактик. Ідею такого індикатора було запропоновано в праці Сірлі [14], де автор звернув увагу на деякі вимірювання $[O\ III]$ в M33, які показують, що зі збільшенням галактоцентричної відстані у гігантських H II регіонах пізніх спіральних галактик зростає відношення $[O\ III]/H_\beta$ та, відповідно, падає відношення $[N\ II]/H_a$. Було висловлено припущення, що ця закономірність, скоріше всього була викликана наявністю радіального градієнта розподілу хімічних елементів, і тому можна використовувати ці два відношення як загальні параметри, що показують хімічних склад об'єкта. Такий індикатор може бути відкалібрований відносно більш точних і відомих калібраційних співвідношень, що базуються на вимірюваннях авроральних ліній або на детальних

фотоіонізаційних моделях для встановлення їх емпіричної точності. Найбільш вдалими калібраційними співвідношеннями стали формули запропоновані МакГохом[17] (на базі фотоіонізаційних моделей) та Пілюгіним[26] (емпірична формула). Обидва співвідношення були покращені використанням як іонізаційного параметра відношення $[O\ III]/[O\ II]$. Але навіть так, існували систематичні відхилення порядку 0.5 декс між R_{23}- та T_e-методами. Поєднуючи це з подвійною поведінкою залежності O/H до R_{23}, ми отримуємо діапазон невизначеності величини O/H для галактик за $z \simeq 3$ в 10+ разів. [46]

Частково для того, щоб обійти цю проблему, були запропоновані калібраційні співвідношення на основі Сульфуру: $S_{23} = ([S\ II] + [S\ III])/H_\beta$ та $S_{234} = ([S\ II] + [S\ III] + [S\ IV])/H_\beta$. Хоч ці лінії Сульфуру зникають за вищих металічностей, аніж R_{23}, вони є слабшими за їх відповідники для Оксигену, і те, що вони знаходяться в червоній та інфрачервоній частинах спектру означає неможливість зареєструвати їх з поверхні Землі у випадку червоного зміщення $z \geq 1.5$.

Більш багатообіцяючими є методи, в яких використовуються лінії $[N\ II]$ та H_a.[22] Їх відношення сильно чутливе до металічності, яка виміряна через відносну частку Оксигену O/H, внаслідок комбінації двох ефектів. Зі зниженням значення відношення O/H нижче рівня Сонця, з'являється тенденція до зростання іонізації (внаслідок жорсткості іонізаційного спектру, іонізаційного параметру, або обох), знижуючи відношення $[N\ II]/[N\ III]$, і, більше того, відношення N/O падає за високої металічності внаслідок вторинної природи Нітрогену. З поверхні Землі реєструвати обидві лінії $[N\ II]$ та H_a можна до червоного зміщення $z \simeq 2.5$ (межа смуги K). Хоча $N2$ в межах $\log(O/H) \simeq 8.2 \pm 0.2$ різко змінює своє значення (від -1.8 до -0.8) і тому лінійна апроксимація не є ідеальною, було отримано таке співвідношення[22]:

$$12 + \log(O/H) = 8.90 + 0.57 * N2. \quad (1.30)$$

Трохи точнішим є наближення поліномом третього порядку[22]

$$12 + \log(O/H) = 9.37 + 2.03 * N2 + 1.26 * N2^2 + 0.32 * N2^3, \quad (1.31)$$

що діє в межах $(-2.5 < N2 < -0.3)$. За цим калібратором можливо оцінити вміст Оксигену з похибкою в 2.5 рази із точністю 95%, що знаходиться приблизно на одному рівні з R_{23}-методом.

Тепер варто розглянути можливість використання двох відношень, $[N\ II]\lambda6584/H_a$ та $[O\ III]\lambda5007/H_\beta$, одночасно. Включення другого

співвідношення дозволить вирішити проблему насичення лінії $[N\ II]$ у регіонах з високою металічністю, де $[O\ III]$ в свою чергу продовжує спадати.

Цей метод майже повністю втрачає свою користь за $O3N2 \geq 2$, але за нижчих значень отримується відносно тісна, лінійна та різка залежність між $O3N2$ та $\log(O/H)$. Найкраще лінійне наближення дає таке калібраційне співвідношення[46]:

$$12 + \log(O/H) = 8.73 - 0.32 * O3N2. \quad (1.32)$$

Незважаючи на обмеженість даних, у випадку високометалічних регіонів цей метод виглядає багатообіцяючим і натякає на необхідність розширення бази даних вимірювання спектрів близьких H II регіонів для збільшення статистичної вибірки.

При застосуванні цього методу до галактик з великим червоним зміщенням, ці два індикатори мають перевагу над більш знайомим R_{23}-методом. По-перше, N-індекси мають монотонну залежність від (O/H). По-друге, обидва індикатори залежать від відношень близьких емісійних ліній, тому відсутня необхідність введення корекцій від червоного зміщення та точна калібровка потоків спектру. По-третє, обидва індекси дуже чутливі до вмісту Оксигену і тому добре підходять для аналізу даних спектрів з середнім відношенням сигналу до шуму. Відношення $[N\ II]\lambda6584/H_a$ достатньо знати з точністю порядку 25%. Підвищення точності визначення $[N\ II]\lambda6584/H_a$ майже не покращує точність виміру вмісту Оксигену, адже випадкові помилки не будуть давати достатнього вкладу, на відміну від систематичної похибки 0.4 декс. Аналогічно і з $O3N2$, хоч точність у високометалічних регіонах вища, і сильніше змінюється зі зміною (O/H).

Висока чутливість $O3N2$ до вмісту Оксигену також допомагає вирішити ще одну проблему, яка з'являється в основному за умови високого червоного зміщення. У галактик в діапазоні червоних зміщень $z = 1 - 3$, для яких можна провести спектроскопічні спостереження, спостерігається дуже великий рівень зореутворення, на один-два порядки вищий за спостережуваний в близькому космосі. Також збільшується обсяг даних, які вказують на те, що навіть в таку давню епоху еволюції Всесвіту, подібні галактики уже досягали металічності, близької до сучасного Сонця. Коли хімічна еволюція галактики проходить на таких високих швидкостях, темп утворення первинного Нітрогену з зір низької та середньої маси може бути нижчим, аніж темп утворення Оксигену з наднових типу II.[27] Наскільки відношення N/O відхиляється від «рівноважного»,

залежить від темпів зореутворення, металічності та погано встановленої хронології для утворення первинного Нітрогену.

1.7. $R2D, R3D, S2D, S3D$ калібровки Пілюгіна

Проблеми визначення хімічного складу з використанням T_e- та R_{23}-методів наштовхнули дослідників на пошук нових альтернатив. Однією з таких робіт стала праця Пілюгіна та Гребель «New calibrations for abundance determinations in H II regions.» [21]

Відбір даних для наступних калібраційних співвідношень був заснований на наступній ідеї: якщо H II регіон належить до послідовності фотоіонізованих небулярних середовищ та інтенсивність його ліній визначена з достатньою точністю, то різні методи, що базуються на різних емісійних лініях повинні давати в результаті подібні фізичні характеристики (такі як електронна температура та хімічний склад) для цього об'єкту.[28],[29]

Оцінка даних, отриманих з H II регіонів дозволяє зробити оцінку умови розділення калібровок на верхню та нижню гілки, відповідно до металічності. Ця умова - $\log N_2 \sim -0.6$, проте варто зазначити, що використання цієї умови як чіткої межі переходу між двома гілками є спрощенням. Для точності результату варто застосовувати більш конкретні межі. Такі як фіксована електронна температура або частка Оксигену.

Загалом, відношення між часткою Оксигену в H II регіоні та інтенсивністю ліній R_2 в спектрі залежить від двох параметрів: електронної температури та ступеня збудження. Можна записати цю залежність у вигляді простого лінійного виразу

$12 + \log(O/H) = a(t, P) + b(t, P) \log R_2$, де a та b залежать від електронної температури та параметру збудження. Якщо використовувати $P = R_3/(R_2 + R_3)$ як індикатор ступеня збудження, а $\log N_2$ як індикатор електронної температури, і припустити, що обидва параметри залежать від них лінійно, можна переписати попередній вираз наступним чином

$$12 + \log(O/H) = a_1 + a_2 \log(R_3/R_2) + a_3 \log N_2 + (a_4 + a_5 \log(R_3/R_2) + a_6 \log N_2) \log R_2 \quad (1.33)$$

Використовуючи вхідні дані, та розділивши H II регіони на високо- та низькометалічні, можна отримати коефіцієнти a_n для відповідних виразів[21]

$$12 + \log(O/H)_{R,U} = 8.589 + 0.022\log(R_3/R_2) + 0.399\log N_2 + (-0.137 + 0.164\log(R_3/R_2) + 0.589\log N_2)\log R_2 \quad (1.34)$$

$$12 + \log(O/H)_{R,L} = 7.932 + 0.944\log(R_3/R_2) + 0.695\log N_2 + (0.970 - 0.291\log(R_3/R_2) - 0.019\log N_2)\log R_2 \quad (1.35)$$

Ці дві формули працюють для регіонів з $\log N_2 \geq -0.6$ та $\log N_2 < -0.6$ відповідно.

Проте, існує багато об існує багато об'єктів, для яких лінії R_2 неможливо виміряти, наприклад, спектри близьких галактик в Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Попередньо було висловлено припущення, що визначити вміст Оксигену можна і без цих ліній.[30] Один із способів – заміна ліній R_2 на S_2. За таких самих умов розділення на дві гілки, ми отримуємо наступні вирази[21]

$$12 + \log(O/H)_{S,U} = 8.424 + 0.030\log(R_3/S_2) + 0.751\log N_2 + (-0.349 + 0.182\log(R_3/S_2) + 0.508\log N_2)\log S_2 \quad (1.36)$$

$$12 + \log(O/H)_{S,L} = 8.072 + 0.789\log(R_3/S_2) + 0.726\log N_2 + (1.069 - 0.170\log(R_3/S_2) + 0.022\log N_2)\log S_2 \quad (1.37)$$

Ці дві формули працюють аналогічно з попередньою парою для регіонів з $\log N_2 \geq -0.6$ та $\log N_2 < -0.6$ відповідно.

Калібраційні співвідношення, описані вище, є тривимірними, тобто залежать від трьох величин. Можна зазначити, що для високих температур помітна чітка залежність вмісту Оксигену від величини параметру збудження P за високої електронної температури (нижня гілка), і ця залежність зникає за низьких температур (верхня гілка). Тому можна висловити припущення про можливість просто знехтувати залежністю вмісту Оксигену від параметру збудження для верхньої гілки та записати відповідне двовимірне калібраційне співвідношення[21].

$$12 + \log(O/H)_{R,2D} = 8.589 + 0.329\log N_2 + (-0.205 + 0.549\log N_2)\ \log R_2 \quad (1.38)$$

$$12 + \log(O/H)_{S,2D} = 8.445 + 0.699\log N_2 + (-0.253 + 0.217\log N_2)\ \log S_2 \quad (1.39)$$

Розділ 2. Мультикомпонентне фотоіонізаційне моделювання.

Дана магістерська робота пов’язана з роботою Мелеха, Рекі, Генслера та Бугаєнка «Фотоіонізаційний аналіз хемодинамічних симуляцій карликових галактик».[36]

Аналізуючи результати проведених ними хемодинамічних симуляцій, автори роблять наступні висновки:

Іонізований газ можна розділити на дві компоненти. Перший – порожнина, наповнена розрідженим гарячим газом від вибухів наднових та видута супервітром з центральної області зореутворення. В цій компоненті дуже високий вміст важких елементів, що також є наслідком еволюції зір. Оскільки температура в цій частині іонізованого газу визначається ударними хвилями, то її просторовий розподіл розраховується хемодинамічними симуляціями карликової галактики і потім отримані результати використовуються для мультикомпонентного фотоіонізаційного моделювання. Другий компонент – так звана «стіна», яка формується ударною хвилею і незбурюється супервітром. Густина цієї частини карликової галактики набагато вища, а вміст важких елементів подібний до складу речовини міжзоряного середовища. «Стіна» та середовище за нею мають низьку гідродинамічну температуру. Проте, переважна частина фотонів центральної області зореутворення та дифузні іонізуючі фотони першої компоненти проникають сюди, іонізуючи газ.

Другий висновок в тому, що для опису просторового розподілу температури та концентрації хімічних елементів не можна використовувати ні плоскопаралельну, ні сферично-симетричну, ні циліндричну системи координат. Проте, можна використати наявну аксіальну симетрію задачі.[36]

Як базову програму для моделювання було вирішено використати код Г. Ферланда *CLOUDY 08.00*.[35] Проте в цій програмі немає можливості виконати необхідні розрахунки для аксіально-симетричної системи, адже такий функціонал не передбачений в коді. Тому Моріссетом[37] було розроблено псевдо-3D доповнення *Cloudy-3D* для реалізації моделювання небулярних середовищ, використовуючи велику кількість одновимірних фотоіонізаційних моделей. Проте, було прийнято рішення не використовувати даний код, а розробити свою програму для мультикомпонентного фотоіонізаційного моделювання небулярної складової карликової галактики. Було розроблено власний інструмент *DiffRay* для розрахунку емісійних лінійчастих спектрів у синтетичних апертурах з можливістю задання користувачем параметрів та

позицій. Ця програма інтегрує потоки в емісійних лініях за тілесним кутом, визначеним позицією апертури відносно позиції спостерігача. Варто наголосити, що розробники програми планують надати вільний доступ до програми для мультикомпонентного фотоіонізаційного моделювання та програми *DiffRay*.

При мультикомпонентному моделюванні об'єм хемодинамічних симуляцій розділявся на сектори, виділені тілесними кутами. Хемодинаміка розраховувалась у припущенні циліндричної симетрії, тобто достатньо лише чверті всього об'єму для отримання необхідного результату. Досліджуваний регіон було поділено на 20 секторів, де сектор 1 прилягає до галактичної площини, а сектор 20 – до осі симетрії.

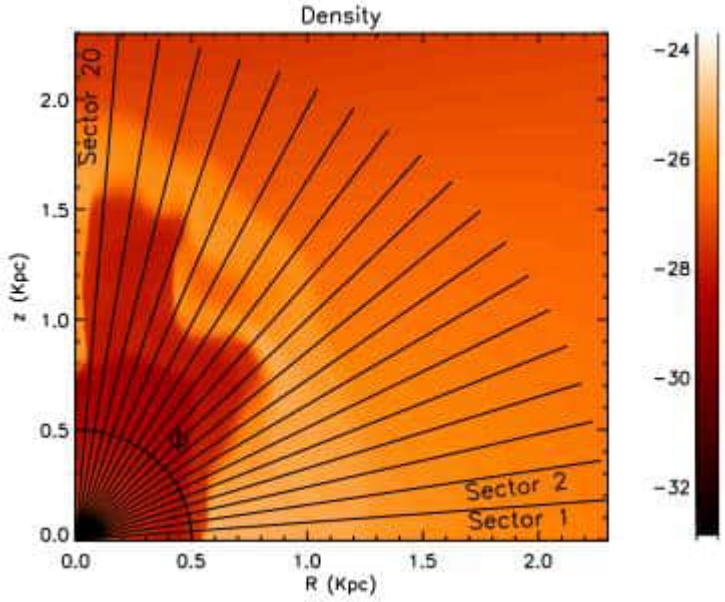

Рис. 2.1. Схема поділу досліджуваного регіону на сектори. Джерело – [36]

Кожний із секторів, в свою чергу, був розбитий на 200 однакових за товщиною радіальних компонент. Кожна з компонент мала товщину 11.5 пк, на відстані понад 2.3 кпк середовище уже вважалось міжгалактичним і моделювання там не проводилось. Проте, програма *CLOUDY* вибирає товщину модельних шарів самостійно, і ці шари зазвичай менші, ніж задане радіальне розбиття кожного сектору. Тому подальша інтерполяція результатів проводилася саме програмою *CLOUDY*.

У кожному секторі за результатами хемодинамічних симуляції були задані наступні параметри та їх радіальний розподіл:

- концентрація Гідрогену;

- електронна температура (лише для компоненти супервітру);

- відносний вміст 8-ми хімічних елементів He/H , $C/H, O/H, N/H, Mg/H,$ S/H , Si/H , Fe/H.

Межа між гарячою компонентою супервітру та «стіною» визначається регіоном з найбільшим градієнтом концентрації Гідрогену.

В моделях розглядалися 2 види іонізуючого випромінювання. Перше – випромінювання з області активного зореутворення. Друге – дифузне іонізуюче випромінювання. Дифузне іонізуюче випромінювання було розраховане в наближенні *«outward-only»*, яке є параметром за замовчуванням у програмі *CLOUDY*. В такому наближенні припускається, що потік дифузного іонізуючого випромінювання, випромінений в кожній із компонент, поширюється тільки назовні вздовж секторів з урахуванням поглинання речовиною небулярного газу. Таким чином в цьому випадку кожен сектор в процесі мультикомпонентного фотоіонізаційного моделювання карликової галактики є ізольованим від дифузного іонізаційного випромінювання інших секторів. Це спрощення значно скорочує час, який необхідний для моделювання, хоча такого обмеження на випромінювання не існує в реальних галактиках. Варто зазначити, що дослідники працюють над розробкою методу детального розрахунку дифузної складової іонізуючого випромінювання.

Мультикомпонентне моделювання дозволяє проводити розрахунки мап емісійностей для важливих небулярних емісійних ліній, які в подальшому можуть використовуватися для проведення розрахунків відповідних потоків випромінювання. Такі розрахунки необхідні для порівняння теоретичних спектрів зі спостережуваними.[36]

Навіть відносно гарна роздільна здатність гідродинамічних симуляцій (порядку 4 пк) все ще недостатня для розрахунків ультра-компактних регіонів H II, а тому частка фотонів неперервного спектру, що покидають карликову галактику, імовірно завищена. Проте, австрійські астрофізики працюють над програмою, розробленою для хемодинамічних симуляцій підвищеної роздільної здатності.

Зазвичай синтетичні емісійні лінійчасті спектри небулярного газу отримують з різних позицій апертури. Використовуючи такі спектри і опрацьовуючи їх різними діагностичними методами можна отримати хімічний склад речовини. Процедура такого розрахунку виглядає наступним чином:

Спочатку визначаються центральна та не-центральні (не проходять через центр моделі карликової галактики) апертури. Синтетичний спектр

розраховується, інтегруючи мапу інтенсивностей, отриманих інтегруванням вздовж променя зору, що потрапляє в апертуру. Ці спектри в подальшому використовуються для визначення вмісту Оксигену за допомогою двох різних методів: двозонного T_e-методу та R_{23}-методу (методу сильних ліній). Далі отриманий результат порівнюється зі заздалегідь відомим результатом з хемодинамічних симуляцій.[36]

Апертура, яка відповідала квадрату 49×49 пк, була розбита на менші об'єми $n \times n$; процес є ітеративним, а n представляє собою стадію ітерації. У першій ітерації ця величина була вибрана рівною чотирьом. На кожному етапі потоки випромінювання інтегруються за утвореними після поділу апертури складовими. Після кожного кроку параметр поділу n подвоювався. Процес зупинявся тоді, коли різниця між інтенсивностями ліній двох останніх кроків стає меншим, ніж 2%.

Для порівняння результатів моделювання зі спостережуваними було проведено відбір даних спостережень, у яких відношення H_α/H_β лежить в діапазоні 2.6-3.2, адже саме в такому діапазоні знаходились результати, отримані з мультикомпонентного моделювання. Відносні інтенсивності багатьох з розглянутих ліній не потрапляли в область спостережуваних значень, зазвичай нижче спостережуваних мінімумів вибірки.

Оскільки причиною занадто низького значення інтенсивностей є низька густина, було прийнято рішення модифікувати результати хемодинамічних симуляцій додаванням тонкого шару високої густини (thin dense shell). Цей шар представляє собою компактну область з підвищеною густиною внаслідок впливу ударної хвилі. Цей результат на даний момент неможливо отримати за допомогою хемодинамічних симуляцій, тому що регіон підвищеної густини концентрується на масштабах, набагато менших за роздільну здатність таких симуляцій. Товщина шару складає приблизно 10 пк, а розміри найщільнішої частини сягають приблизно 1 пк. Концентрація Гідрогену в шарі відрізняється від концентрації речовини цього регіону в хемодинамічних симуляціях приблизно в 35 разів. Виявилось, що лише у випадку такої модифікації «стіни» отримуються такі інтенсивності емісійних ліній, що потрапляють у діапазон спостережуваних даних.[36]

Через наявність шару великої густини, на певній відстані від центру карликової галактики (0.7-0.9 пк), температура падає значно нижче іонізаційного фронту. На більших відстанях температура знову зростає внаслідок розрідження

небулярного газу. Таким чином, наявність такого шару може призводити до утворення шару нейтрального газу всередині іонізованого небулярного газу.

Для визначення вмісту Оксигену T_e- та R_{23}-методами потребує інформації про інтенсивності ліній $[O\ III]\lambda 4959, \lambda 5007, \lambda 4363$ та ліній $[O\ II]\lambda 3727, \lambda 3729$, отримані з синтетичних емісійних лінійчастих спектрів. Але, як вже декілька разів наголошувалось, лінія $[O\ III]\lambda 4363$ через низьку інтенсивність часто є занадто слабкою для проведення точних вимірювань. У таких випадках використовуються калібрувальні методи. Авторами праці для цієї роботи було вибрано калібровки МакГоха[17], які були описані вище.

Отже, було зроблено наступні висновки:

1. Такий підхід до поєднання хемодинамічних симуляцій та мультикомпонентного моделювання небулярного середовища дає можливість розрахувати інтенсивність важливих емісійних ліній. Порівняння результатів зі спостережуваними показало, що інтенсивності деяких ліній в модельних результатах, особливо O^+, сильно відхиляються від очікуваних.
2. Штучним збільшенням густини (додаванням тонкого шару високої густини на масштабах, значно менших за роздільну здатність хемодинамічної симуляції), було отримано узгоджені з спостережуваними значення інтенсивностей таких ліній.
3. Калібрувальні методи не дають реальних результатів через розглянуті вище обмеження їх використання.

В 2021 році було опубліковано ерратум[43] до першої роботи, де розглядалися зміни до результатів після виправлення певних технічних помилок та недоліків, які були знайдені в процесі подальшого дослідження теми в коді програми *DiffRay*:

Неточність у вибраній геометрії при розрахунках спектрів. Вибір геометрії для оригінальної роботи виявився невдалим; в ерратумі всі обрахунки виконувались, використовуючи циліндричну (конічну) осесиметричну геометрію. Положення апертур в роботі відрізнялось від тих, які були використані в процесі моделювання. Деякі неоднорідності густини, а також коефіцієнт послаблення випромінювання неправильно опрацьовувались кодом *DiffRay*. Було додано адаптивне інтегрування, що дозволило краще опрацьовувати неоднорідності та покращено розрахунок коефіцієнта послаблення випромінювання.

При розрахунку мультикомпонентної фотоіонізаційної моделі в оригінальній статті для різних секторів використовувались однакові фактори покриття для всіх секторів. У випадку конічно-циліндричної осьової симетрії це рішення є помилковим. Тому мультикомпонентне моделювання було проведено ще раз, використовуючи коректний фактор покриття

$$CovF = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \Delta\theta \cdot SN\right) - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \Delta\theta \cdot (SN - 1)\right), \qquad (2.1)$$

де SN – номер сектору, а $\Delta\theta$ – кут між двома конічними поверхностями, що є межами певного сектору. В моделях галактика розділена на 20 конічних секторів, тому $\Delta\theta = \pi/(2 \cdot 20)$. Ці зміни вплинули на ті результати, де в розрахунках наявна світність.[43]

У підсумку автори погодились, що немає причин відмовлятися або робити значні зміни для жодного з висновків оригінальної статті, незважаючи на знайдені помилки та корекції до процесу моделювання.

Розділ 3. Проведення розрахунків значення частки Оксигену для різних калібраційних співвідношень.

Для визначення вмісту Оксигену в даній карликовій галактиці за допомогою калібраційних співвідношень мною була написана проста програма на мові програмування C++. За вхідні дані були взяті інтенсивності різних важливих ліній, які були отримані в результаті симуляцій та моделювання в роботі [36]. Було взято кілька різних апертур та віків моделей, щоб отримати можливість порівняння результатів обрахунків для різних калібраційних співвідношень і зробити певні висновки щодо їх ефективності, точності та надійності. Для цього порівняння були використані наступні калібраційні співвідношення: два співвідношення Едмундса та Пейджела, взяті з різних джерел[19, 44] (на графіках умовно позначена як EP1, EP2), співвідношення МакГоха[17] (позначено як MG), Скілмана[32] (позначено як Sk), Допіти-Еванса[20] (позначка – DE), МакКола-Рибського-Шиєлдса[18] (MRS), Тремонті[33] (Tr), Уіна[34] (Yin), P-метод Пілюгіна[31] (PP), дві N2-калібровки – лінійна апроксимація та поліном[22] (N2L та N2P відповідно), O3N2-калібровка Петтіні та Пейджела[46] (O3N2), та R2D,R3D,S2D,S3D-калібровки Пілюгіна[21] (R2D,R3D,S2D,S3D).

На графіках крапками відзначаються точки, які відповідають визначений певною калібровкою (вказана над графіком) вміст Оксиген в досліджуваній карликовій галактиці. По осі абсцис відраховується вік в мільйонах років, точки мають крок 10 мільйонів років. По осі ординат вказано величину $\log(O/H)_{sim} - \log(O/H)_{cal}$, де sim означає дані з моделювання, cal – дані, отримані з калібрувальних співвідношень. Зелена лінія відповідає 0 на графіку (співпадіння даних величин), оранжеві лінії відмічають відхилення в 0.5 декс від модельних даних. На всіх рисунках сині крапки – апертура 0 (центральна), оранжеві – апертура 1 (не-центральна) (Рис. 2.1). Для більшості віків вхідні дані для калібровок не є точними, проте для шести кроків (100, 110, 160, 170, 180 та 190 млн. років) дані уточнені, тому їх можна використовувати для відбору калібрувальних співвідношень. Умовою непридатності було вирішено взяти відхилення в 1 декс на одному з цих шести кроків.

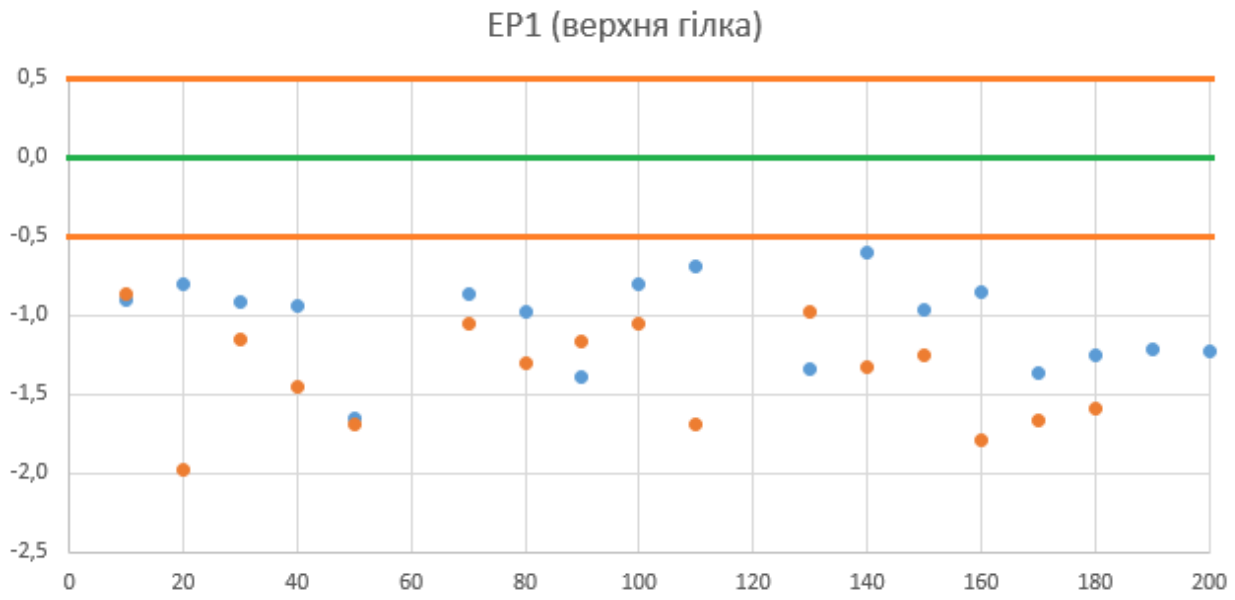
EP1 (верхня гілка)
0,5
0,0
-0,5
-1,0
-1,5
-2,0
-2,5
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200

Рис. 3.1.

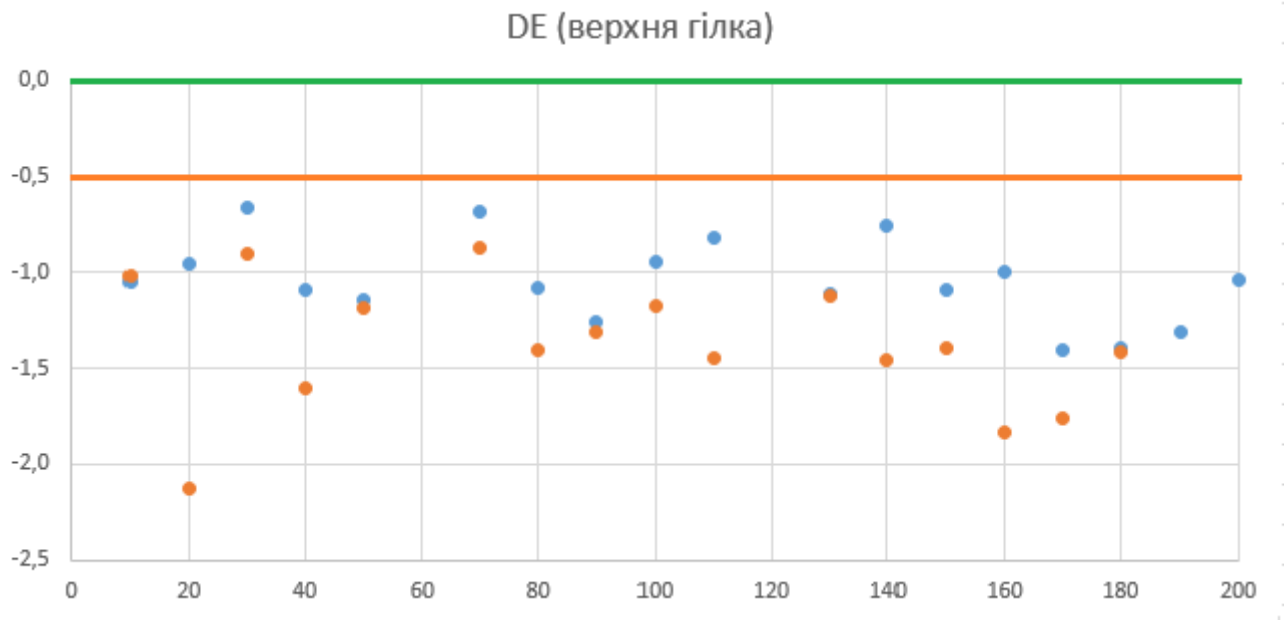
DE (верхня гілка)
0,0
-0,5
-1,0
-1,5
-2,0
-2,5
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200

Рис. 3.2.

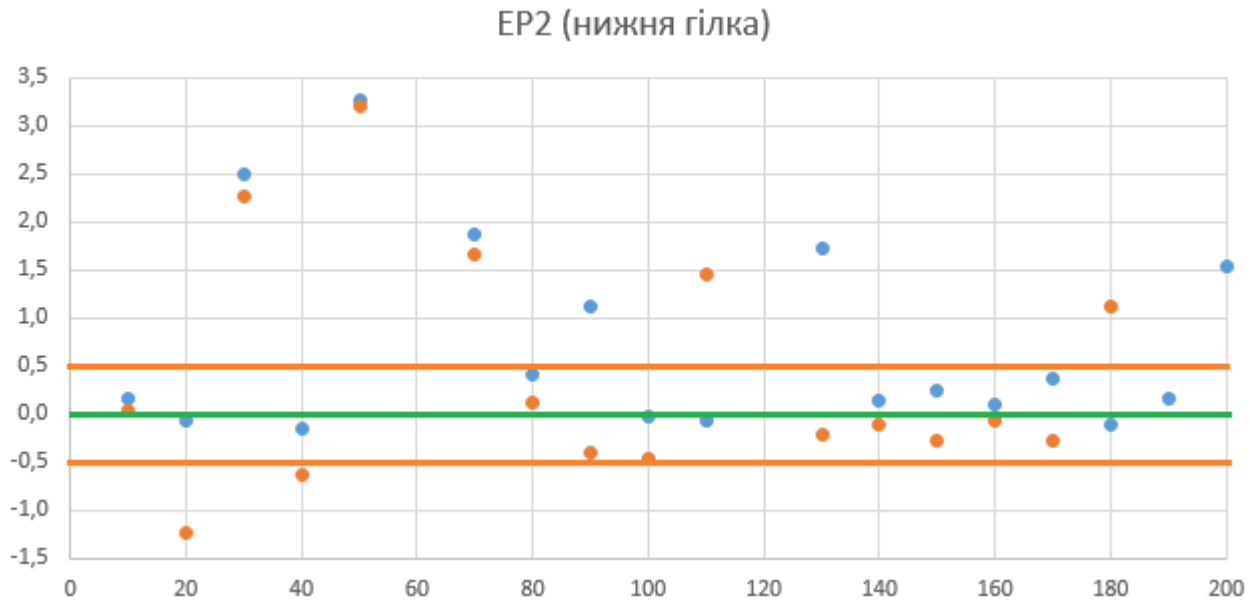
EP2 (нижня гілка)
3,5
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
-0,5
-1,0
-1,5
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200

Рис. 3.3.

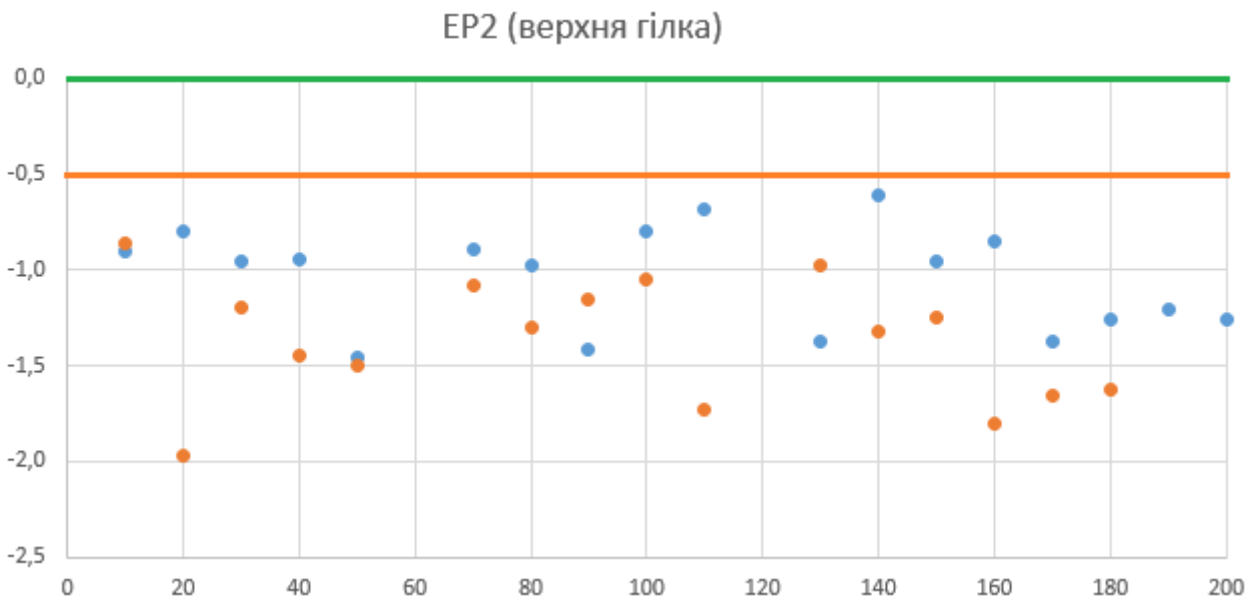
EP2 (верхня гілка)
0,0
-0,5
-1,0
-1,5
-2,0
-2,5
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200

Рис. 3.4.

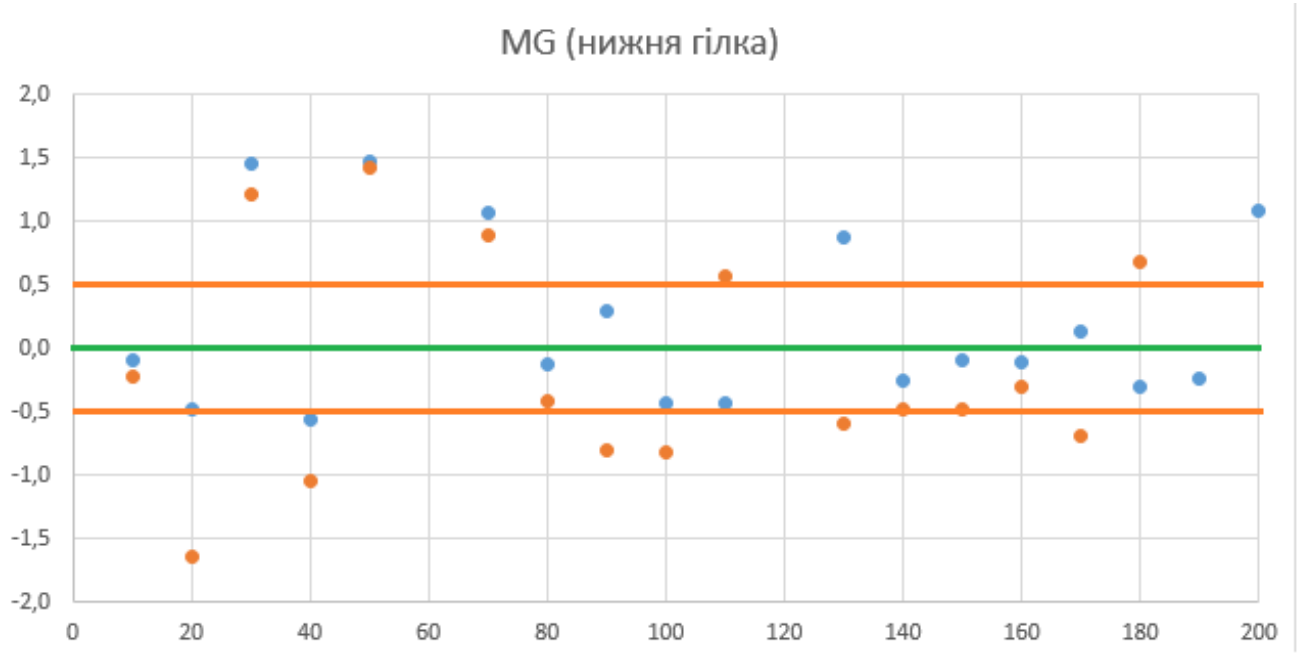
MG (нижня гілка)
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
-0,5
-1,0
-1,5
-2,0
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200

Рис. 3.5.

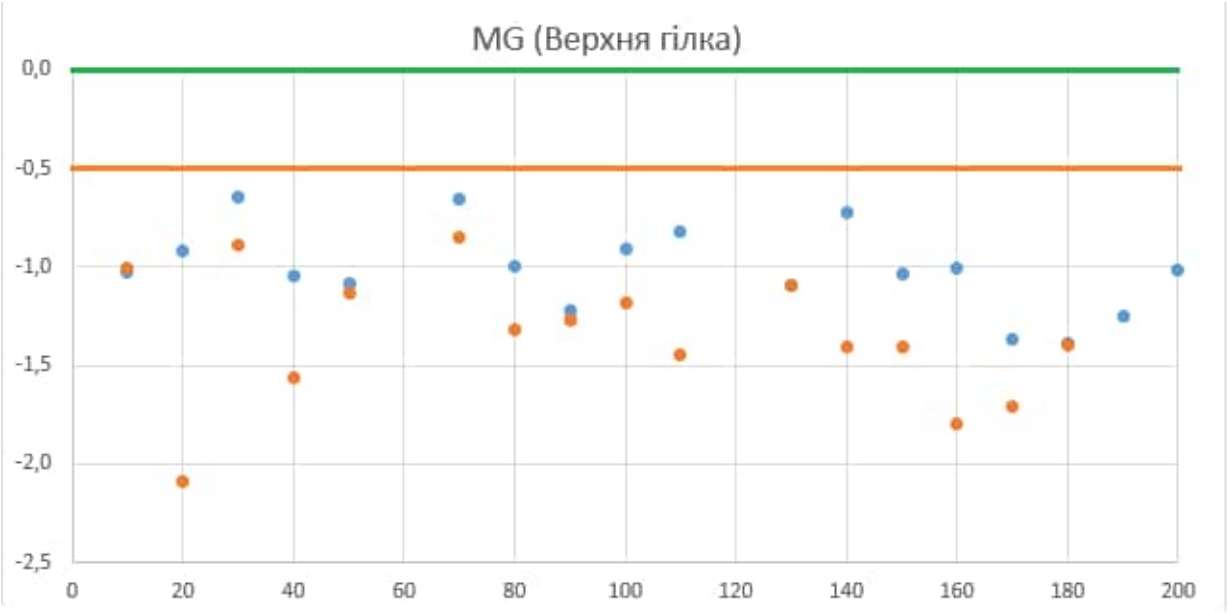
MG (Верхня гілка)
0,0
-0,5
-1,0
-1,5
-2,0
-2,5
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200

Рис. 3.6.

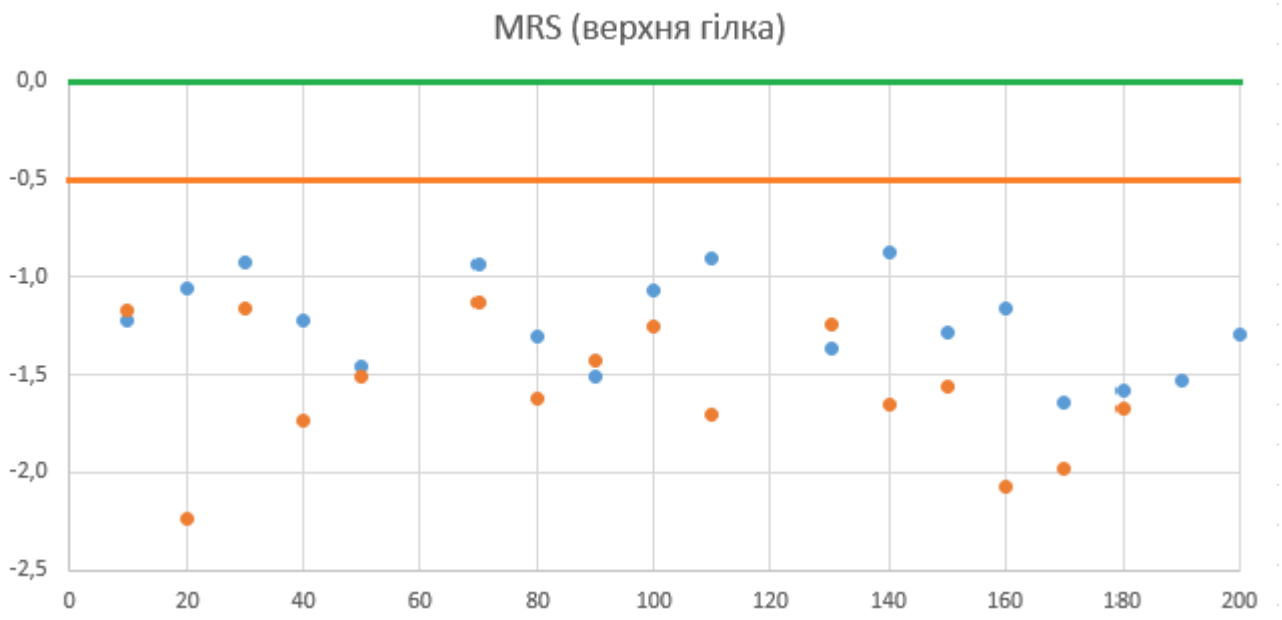
MRS (верхня гілка)
0,0
-0,5
-1,0
-1,5
-2,0
-2,5
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200

Рис. 3.7.

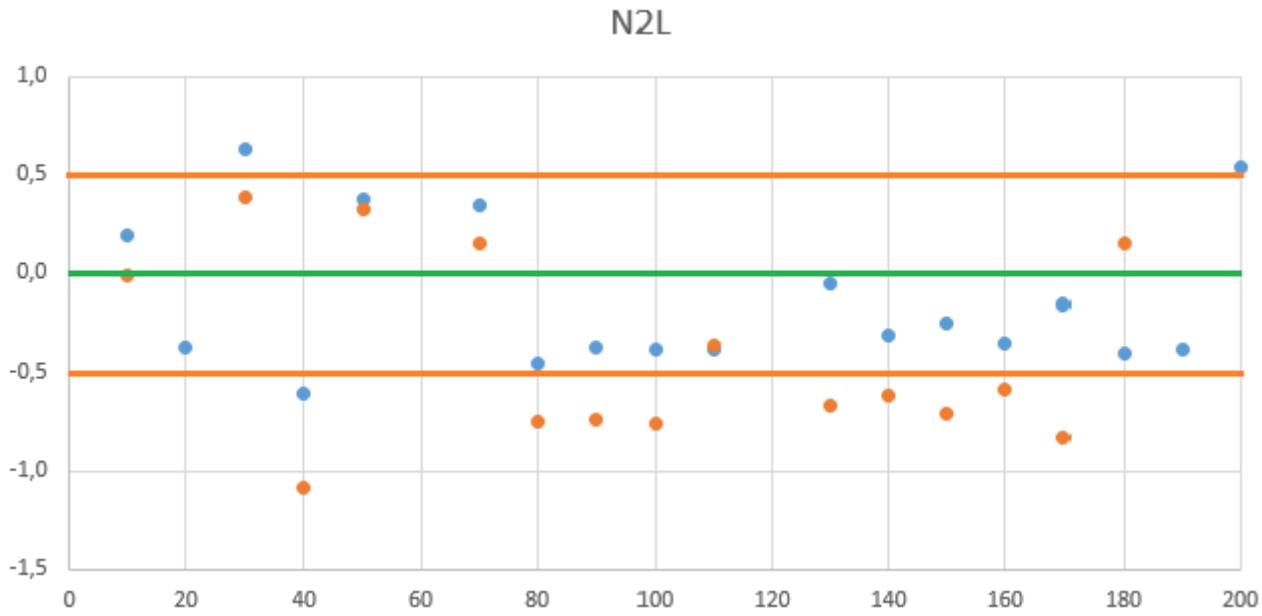
N2L
1,0
0,5
0,0
-0,5
-1,0
-1,5
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200

Рис. 3.8.

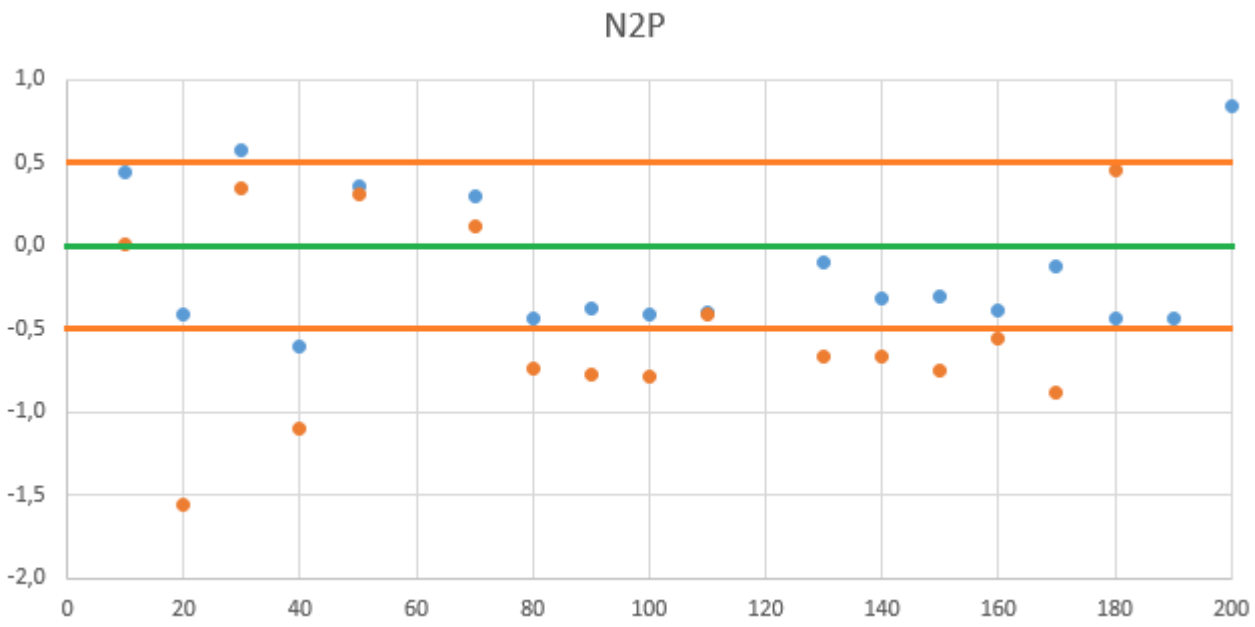

Рис. 3.9.

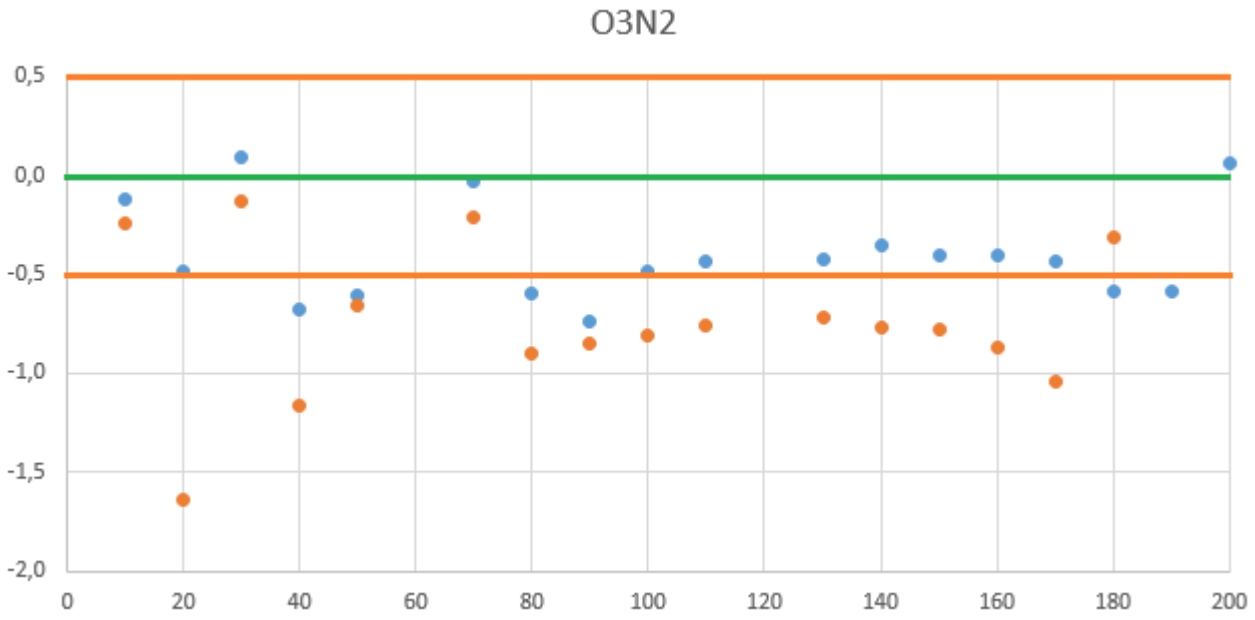

Рис. 3.10.

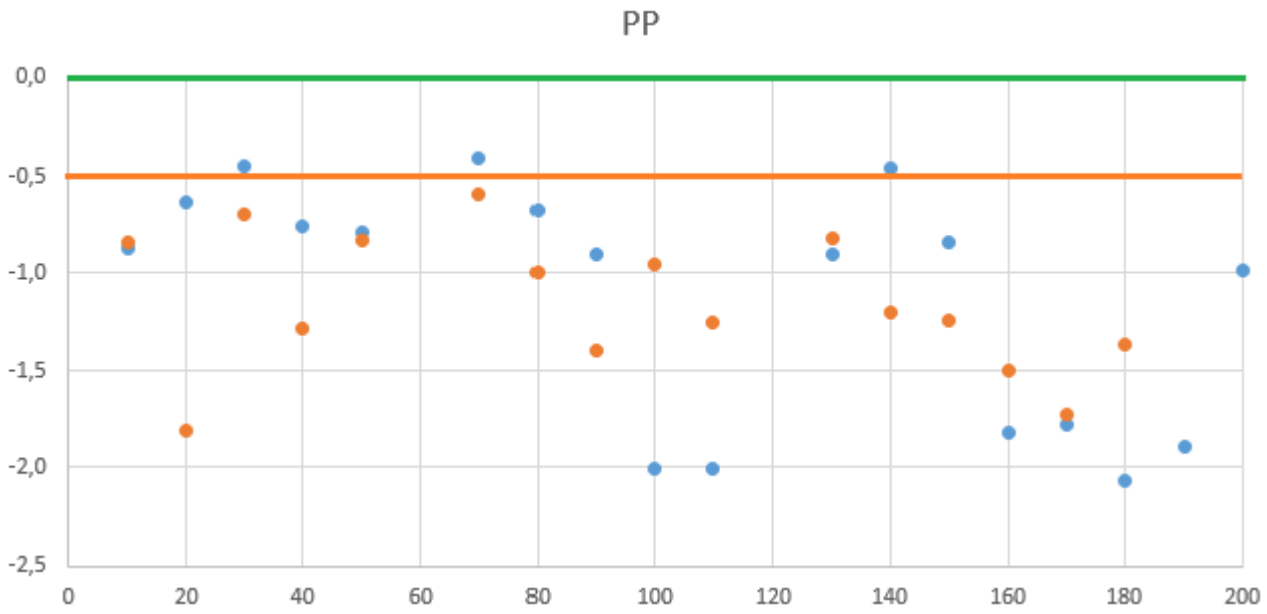

Рис. 3.11.

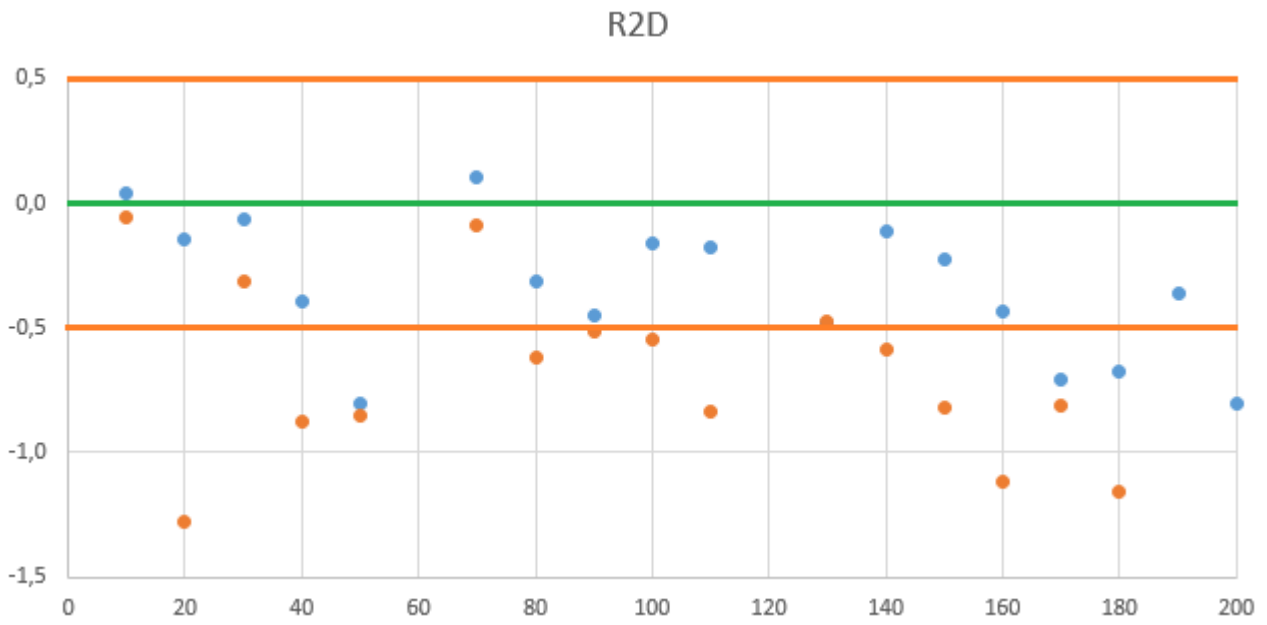

Рис. 3.12.

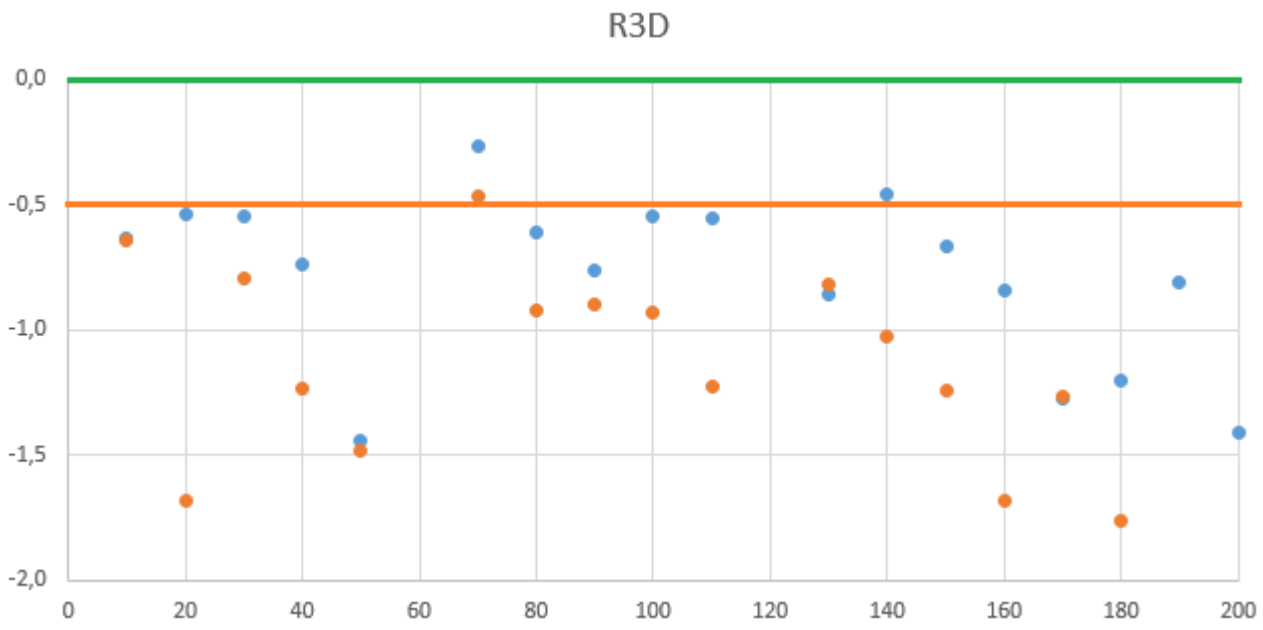

Рис. 3.13.

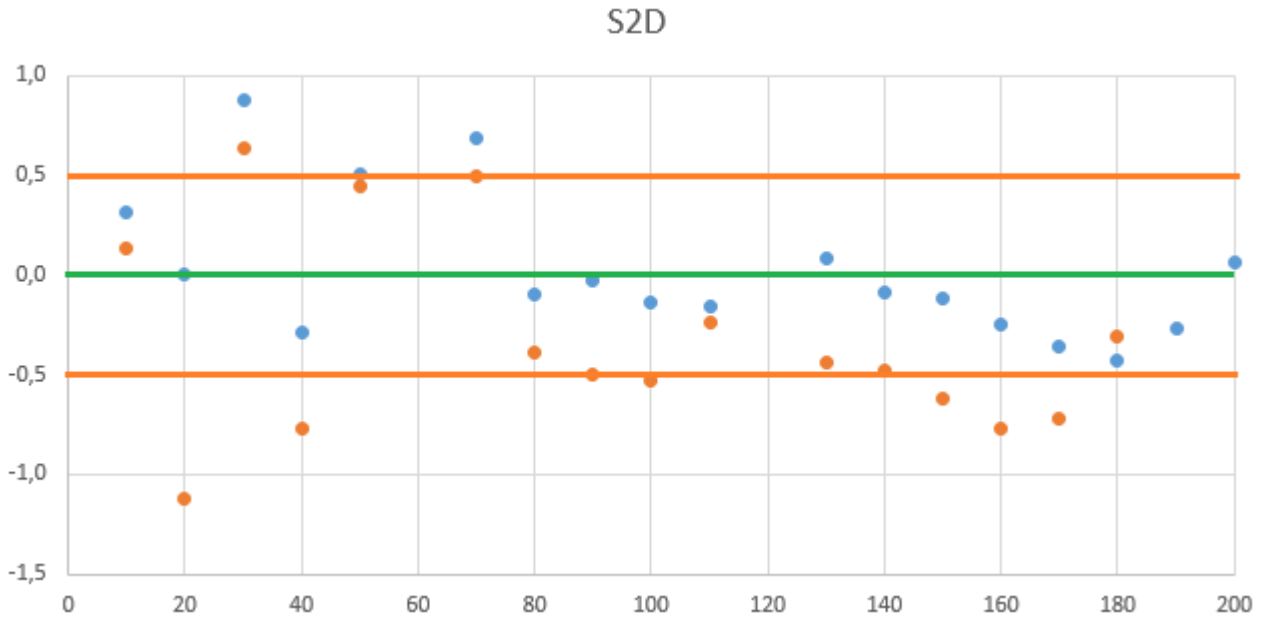

Рис. 3.14.

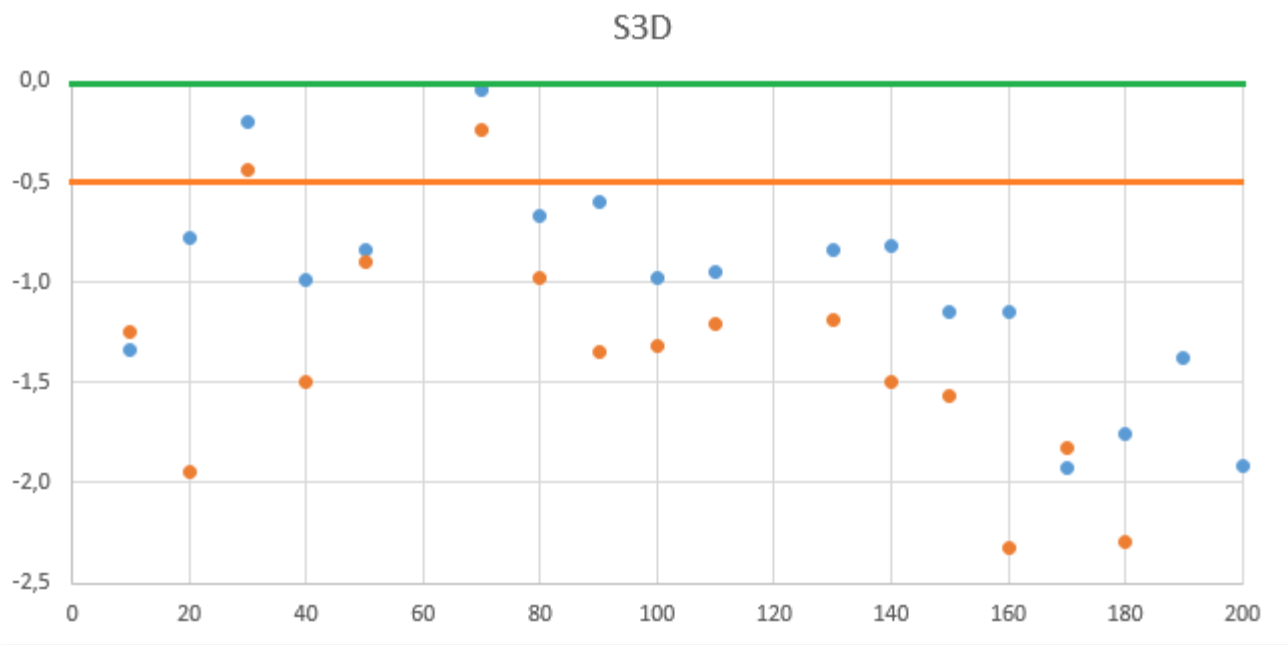

Рис. 3.15.

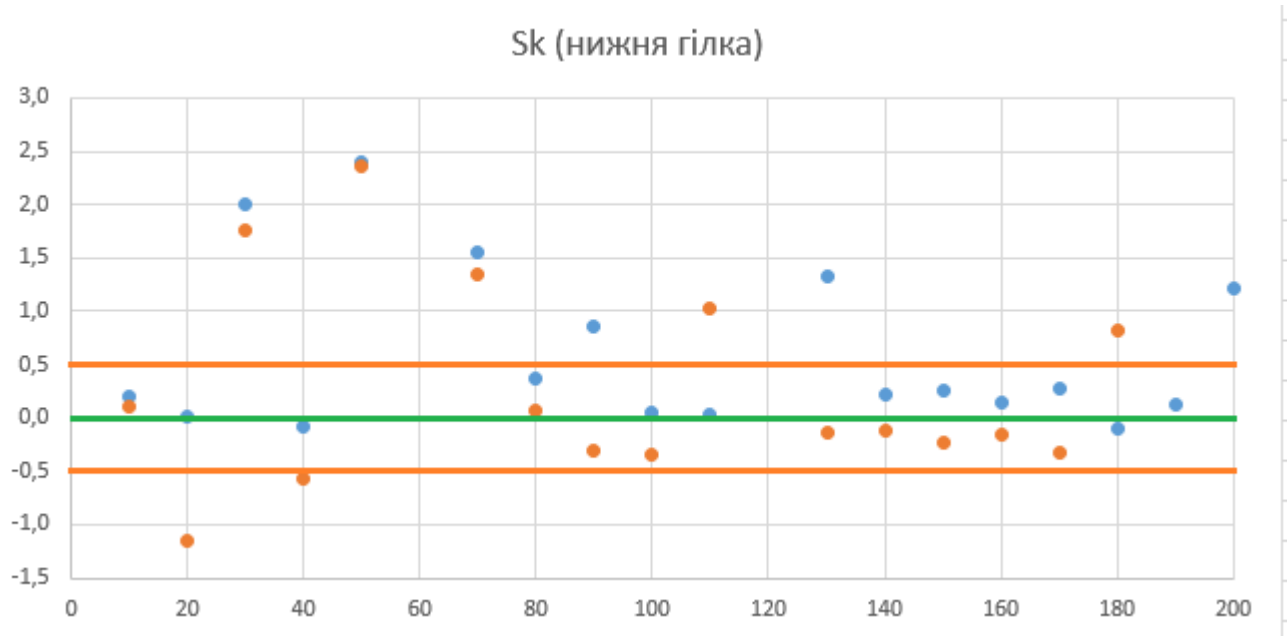

Рис. 3.16.

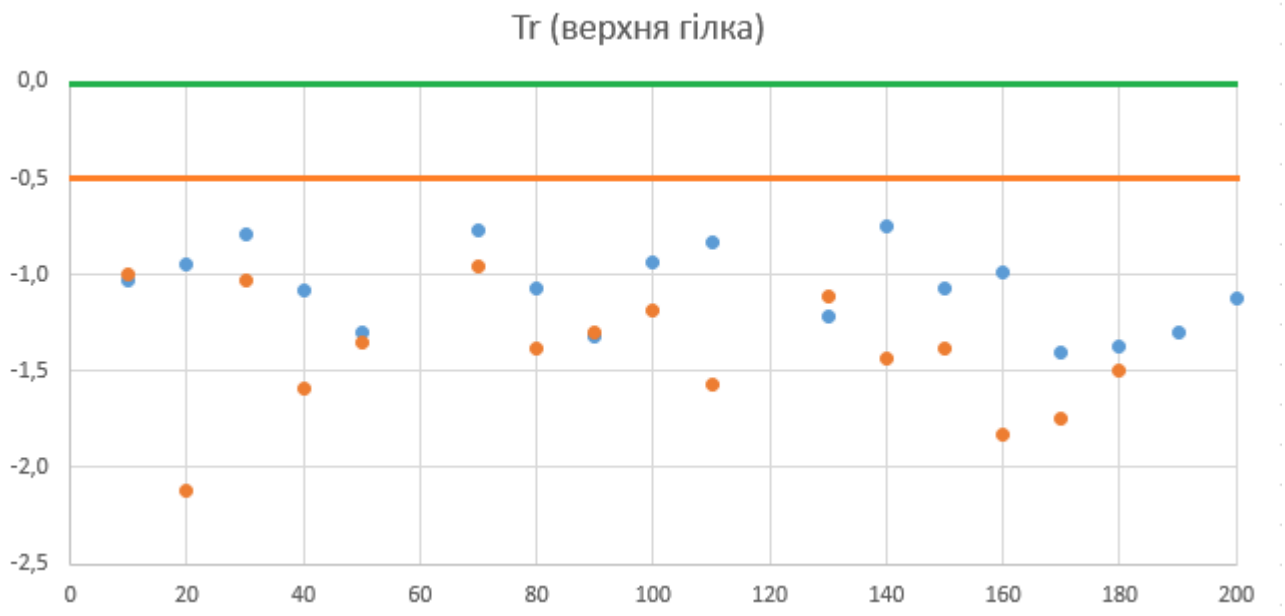

Рис. 3.17.

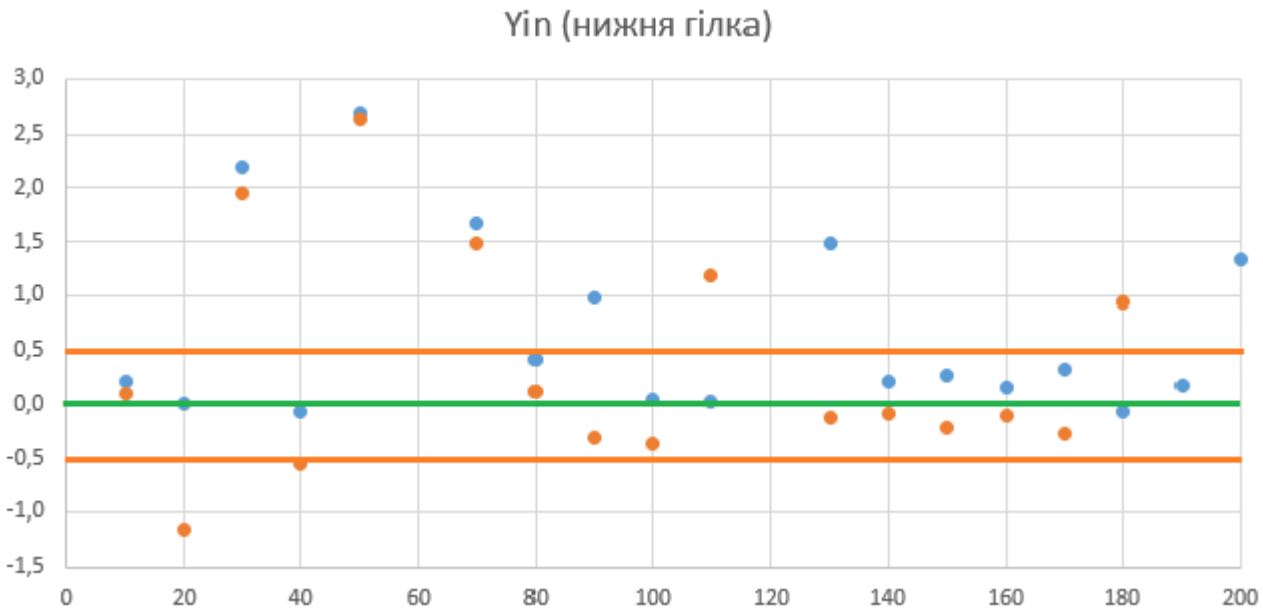

Рис. 3.18.

Розділ 4. Висновки

Проаналізувавши результати, можна зробити наступні висновки:

Різні калібрувальні співвідношення для тих самих вхідних даних дають різні результати. Іноді ця різниця може досягати 1 декс, зрідка – навіть більше. Існують калібровки, які в своєму робочому діапазоні дають достатньо точні результати, проте за межами цього діапазону не є надійними.

Найкращими калібровками для карликової галактики, що досліджувалась у роботі[36], виявились – калібровка МакГоха для нижньої гілки(Рис. 3.5) залежності $R_{23} - \log(O/H)$ (Рис. 1.1), лінійна апроксимація для N2-калібровки (Рис. 3.8), та S2D-калібровка з роботи Пілюгіна (Рис. 3.14).

Калібровки Тремонті, МакКола-Рибського-Шиєлдса, Допіти-Еванса, та 2 версії калібровок Едмундса-Пейджела (для верхньої гілки) не давали якісних результатів, і однією з причин цього є обмеження діапазону, в якому ці калібровки працюють. Калібровки Скілмана та O3N2-калібратор та Уіна мають певні проблеми з точністю. Решта калібраційних співвідношень не показали достатньої ефективності.

Причиною відхилень може бути не лише обмеження в робочому діапазоні, а й фізичні умови спостережуваного середовища, які можуть впливати на інтенсивність калібрувальних ліній.

Для кращої оцінки ефективності різних методів необхідно провести більше досліджень і використовувати точні дані для багатьох різних об’єктів.

Дослідження хімічного вмісту різних елементів регіонів H II є важливою частиною сучасної астрофізики. Ця інформація допомагає дослідникам вивчати еволюцію Всесвіту, галактик, процеси зореутворення як в далекому минулому, так і сучасної епохи. Наявність достатньо точних калібрувальних методів дозволить прискорити дослідження спектрів H II регіонів та областей активного зореутворення. Тому пошук таких співвідношень, та аналіз їх ефективності в різних умовах та для різних по своїй природі об’єктів є важливим питанням, яким займається небулярна астрофізика.

Список використаних джерел

1. Pilyugin, L. S., Vílchez, J. M., & Thuan, T. X. (2006). On the relation between electron temperatures in the O^+ and O^{++} zones in high-metallicity H II regions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 370(4), 1928–1934*. https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10618.x
2. Pagel, B. E. J., Simonson, E. A., Terlevich, R., & Edmunds, M. (1992). The primordial helium abundance from observations of extragalactic H II regions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 255(2), 325–345*. https://doi.org/10.1093/mnras/255.2.325
3. Izotov, Y. I., Stasinska, G., Meynet, G., Guseva, N. G., & Thuan, T. X. (2005). The chemical composition of metal-poor emission-line galaxies in the Data Release 3 of the Sloan Digital Sky Survey. *Astronomy and Astrophysics, 448(3), 955–970*. https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053763
4. Rubin, R. H. (1986). Noncollisional excitation of low-lying states in gaseous nebulae. *The Astrophysical Journal, 309, 334*. https://doi.org/10.1086/164606
5. Tsamis, Y. G., Barlow, M. J., Liu, X., Danziger, I. J., & Storey, P. J. (2003). Heavy elements in Galactic and Magellanic Cloud H ii regions: recombination-line versus forbidden-line abundances. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 338(3), 687–710*. https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06081.x
6. Campbell, A., Terlevich, R., & Melnick, J. (1986). The stellar populations and evolution of H II galaxies - I. High signal-to-noise optical spectroscopy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 223(4), 811–825*. https://doi.org/10.1093/mnras/223.4.811
7. Stasińska, G. (1982). A catalogue of model HII regions. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series, vol. 48, May 1982, p. 299-304*. https://adsabs.harvard.edu/full/1982A%26AS...48..299S
8. Oey, M. S., & Shields, J. C. (2000). Calibration of Nebular Emission-Line Diagnostics. II. Abundances. *The Astrophysical Journal*. https://doi.org/10.1086/309276
9. Zaritsky, D., Kennicutt, R. C., & Huchra, J. P. (1994). H II regions and the abundance properties of spiral galaxies. *The Astrophysical Journal, 420, 87*. https://doi.org/10.1086/173544
10. Pérez-Montero, E., Díaz, A. C., Vílchez, J. M., & Kehrig, C. (2006). An empirical calibration of sulphur abundance in ionised gaseous nebulae. *Astronomy and Astrophysics, 449(1), 193–201*. https://doi.org/10.1051/0004-6361:20054216
11. Pilyugin, L. S., Thuan, T. X., & Vílchez, J. M. (2006). Oxygen abundances in the most oxygen-rich spiral galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 367, Issue 3, pp. 1139-1146*. https://adsabs.harvard.edu/full/2006MNRAS.367.1139P

12. Aller, L. H. (1984). Physics of Thermal Gaseous Nebulae. In *Astrophysics and space science library*. Springer Nature (Netherlands). https://doi.org/10.1007/978-94-010-9639-3
13. Kobulnicky, H. A., Kennicutt, R. C., & Pizagno, J. (1999). On Measuring Nebular Chemical Abundances in Distant Galaxies Using Global Emission-Line Spectra. *The Astrophysical Journal*, *514*(2), 544–557. https://doi.org/10.1086/306987
14. Searle, L. (1971). Evidence for Composition Gradients across the Disks of Spiral Galaxies. *The Astrophysical Journal*, *168*, 327. https://doi.org/10.1086/151090
15. Vila-Costas, M. B., & Edmunds, M. (1992). The relation between abundance gradients and the physical properties of spiral galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 259(1), 121–145.* https://doi.org/10.1093/mnras/259.1.121
16. Zaritsky, D., Kennicutt, R. C., & Huchra, J. P. (1994b). H II regions and the abundance properties of spiral galaxies. *The Astrophysical Journal, 420, 87.* https://doi.org/10.1086/173544
17. McGaugh, S. S. (1991). H II region abundances - Model oxygen line ratios. *The Astrophysical Journal, 380, 140.* https://doi.org/10.1086/170569
18. McCall, M. A., Rybski, P. M., & Shields, G. A. (1985). The chemistry of galaxies. I - The nature of giant extragalactic H II regions. *Astrophysical Journal Supplement Series, 57, 1.* https://doi.org/10.1086/190994
19. Edmunds, M., & Pagel, B. E. J. (1984). On the composition of H II regions in southern galaxies - III. NGC 2997 and 7793. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 211(3), 507–519.* https://doi.org/10.1093/mnras/211.3.507
20. Dopita, M. A., & Evans, I. N. (1986). Theoretical models for H II regions. II - The extragalactic H II region abundance sequence. *The Astrophysical Journal, 307, 431.* https://doi.org/10.1086/164432
21. Pilyugin, L. S., & Grebel, E. K. (2016). New calibrations for abundance determinations in H II regions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 457(4), 3678–3692.* https://doi.org/10.1093/mnras/stw238
22. Denicolo, G., Terlevich, R., & Terlevich, E. (2002). New light on the search for low-metallicity galaxies — I. The N2 calibrator. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 330(1), 69–74.* https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2002.05041.x
23. Leitherer, C., & Heckman, T. M. (1995). Synthetic properties of starburst galaxies. *Astrophysical Journal Supplement Series, 96, 9.* https://doi.org/10.1086/192112
24. Alloin, D., Collin-Souffrin, S., Joly, M., Vigroux, L. (1979). Nitrogen and oxygen abundances in galaxies. *Astronomy and Astrophysics, 78, 200–216.* https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1979A%26A....78..200A/abstract
25. Kewley, L. J., & Dopita, M. A. (2002). Using Strong Lines to Estimate Abundances in Extragalactic H II Regions and Starburst Galaxies.

Astrophysical Journal Supplement Series, 142(1), 35–52. https://doi.org/10.1086/341326

26. Pilyugin, L. S. (2003). Abundance determinations in H II regions. *Astronomy and Astrophysics, 399(3), 1003–1007.* https://doi.org/10.1051/0004-6361:20021669
27. Pettini, M., Rix, S. A., Steidel, C. C., Adelberger, K. L., Hunt, M. P., & Shapley, A. E. (2002). New observations of the interstellar medium in the Lyman break galaxy MS 1512-cB58. *The Astrophysical Journal, 569, 742-757.* https://iopscience.iop.org/article/10.1086/339355/pdf
28. Pilyugin, L. S., Vílchez, J. M., & Thuan, T. X. (2010). NEW IMPROVED CALIBRATION RELATIONS FOR THE DETERMINATION OF ELECTRON TEMPERATURES AND OXYGEN AND NITROGEN ABUNDANCES IN H II REGIONS. *The Astrophysical Journal, 720(2), 1738–1751.* https://doi.org/10.1088/0004-637x/720/2/1738
29. Pilyugin, L. S., Grebel, E. K., & Mattsson, L. (2012). 'Counterpart' method for abundance determinations in H II regions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 424(3), 2316–2329.* https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21398.x
30. Pilyugin, L. S., & Mattsson, L. (2010). Abundance determination in H II regions from spectra without the [O II]λ3727+λ3729 line. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 412(2), 1145-1150.* https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17970.x
31. Pilyugin, L. S. (2001). On the oxygen abundance determination in HII regions. *Astronomy and Astrophysics, 369(2), 594–604.* https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010079
32. Skillman, E. D. (1989). Empirical oxygen abundances and physical conditions for relatively low abundance H II regions. *Astrophysical Journal, 347(1), 883-893.*
33. Tremonti, C., Heckman, T. M., Kauffmann, G., Brinchmann, J., Charlot, S., White, S. D. M., Seibert, M., Peng, E. W., Schlegel, D. J., Uomoto, A., Fukugita, M., & Brinkmann, J. (2004). The Origin of the Mass-Metallicity Relation: Insights from 53,000 Star-forming Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *The Astrophysical Journal, 613(2), 898–913.* https://doi.org/10.1086/423264
34. Yin, S., Liang, Y. F., Hammer, F., Brinchmann, J., Zhang, B., Deng, L., & Flores, H. (2007). Empirical strong-line oxygen abundance calibrations from galaxies with electron-temperature measurements. *Astronomy and Astrophysics, 462(2), 535–546.* https://doi.org/10.1051/0004-6361:20065798
35. Ferland G. J., 2008, Hazy, a Brief Introduction to Cloudy. University of Kentucky, Lexington, Available at: http://www.nublado.org, http://viewvc.nublado.org/index.cgi/tags/release/c08.00/docs/?root=cloudy
36. Melekh, B. Y., Recchi, S., Hensler, G., & Buhajenko, O. S. (2015b). Photoionization analysis of chemodynamical dwarf galaxies simulations.

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 450(1), 111–127. https://doi.org/10.1093/mnras/stv569

37. Morisset, C. (2006). Cloudy_3D, a new pseudo-3D photoionization code. *Proceedings of the International Astronomical Union, 2(S234), 467.* https://doi.org/10.1017/s1743921306003772
38. Peimbert, M. (1967). Temperature Determinations of H II Regions. *The Astrophysical Journal, 150, 825.* https://doi.org/10.1086/149385
39. Tsamis, Y. G., & Péquignot, D. (2005). A photoionization-modelling study of 30 Doradus: the case for small-scale chemical inhomogeneity. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 364(2), 687–704.* https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09595.x
40. Guseva, N. G., Izotov, Y. I., & Thuan, T. X. (2006). Balmer and Paschen Jump Temperature Determinations in Low-Metallicity Emission-Line Galaxies. *The Astrophysical Journal, 644(2), 890–906.* https://doi.org/10.1086/503865
41. Guseva, N. G., Izotov, Y. I., Papaderos, P., & Fricke, K. J. (2007). Balmer jump temperature determination in a large sample of low-metallicity HII regions. *Astronomy and Astrophysics, 464(3), 885–893.* https://doi.org/10.1051/0004-6361:20066067
42. Kennicutt, R. C. (1998). The Global Schmidt Law in Star-forming Galaxies. *The Astrophysical Journal, 498(2), 541–552.* https://doi.org/10.1086/305588
43. Melekh, B., Recchi, S., Hensler, G., & Buhajenko, O. S. (2021). Erratum: Photoionization analysis of chemodynamical dwarf galaxies simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 502(1), 1048–1050.* https://doi.org/10.1093/mnras/staa4010
44. Pagel, B. E. J., Edmunds, M., Blackwell, D. E., Chun, M., & Smith, G. (1979). On the composition of H II regions in southern galaxies - I. NGC 300 and 1365. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 189(1), 95–113.* https://doi.org/10.1093/mnras/189.1.95
45. Stasinska G. in *Cosmochemistry: The Melting Pot of the Elements*. Esteban, C. (2004), 115.
46. Pettini, M., & Pagel, B. E. J. (2004). [O III]/[N II] as an abundance indicator at high redshift. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 348(3), L59–L63.* https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.07591.x