

А.Б. Манапбаева^{1,2} , Н.Ш. Алимгазина¹ , А.Ж. Наурзбаева¹ ,
 А.Ж. Омар¹ , Т. Көмеш^{1,3} , М.Т. Қызгарина^{1*} ,
 А.М. Демесинова¹ , Қ.М. Түреханова¹ 

¹Эксперименттік және теориялық физика институты,

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

²Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан

³Назарбаев университеті, Астана, Қазақстан

*e-mail: meir83physics@gmail.com

N64 шаң көпіршігі аймағындағы жас жұлдызды объектілер

Қазіргі заманғы астрофизиканың басым бағыттарының бірі жас жұлдызды объектілерді зерттеу болып табылады, себебі мұндай объектілер жұлдыздар мен планеталық жүйелердің қалыптасуымен қатар жүретін физикалық процесстерді тікелей зерттеуге мүмкіндік береді. Бұл мақаладағы зерттеудің мақсаты – N64 шаң көпіршігі аймағын зерттеу және осы аймақтағы жас жұлдызды объектілерді анықтау және жіктеу. Астрономиялық каталогтардан алынған инфрақызыл деректерді қолданып, жас жұлдызды объектілерді іздеу жұлдыздардың пайда болу процесстерін зерттеудің ең тиімді әдістерінің бірі екені белгілі. Жас жұлдыздар мен олармен байланысты құрылымдар, әдетте, газ бен шаңның тығыз бұлттарында орналасады, бұл оларды оптикалық толқын ұзындықтарында бақылауға айтарлықтай кедергі келтіреді. Көрінетін жарықтан айырмашылығы, инфрақызыл сәулелену мұндай орталарға еніп, оптикалық бақылауларға қол жетпейтін объектілерді анықтауға және талдауға мүмкіндік береді. Бұл зерттеуде жас жұлдызды объектілерді анықтау Gutermuth және т.б. (2008) ұсынған әдісті қолдану арқылы жүргізілді. Зерттеуде *Spitzer* ғарыштық телескопынан алынған мұрағаттық инфрақызыл деректер (IRAC: 3.6-8.0 мкм; MIPS: 24 мкм) және 2MASS каталогынан алынған деректер (J, H, K_s) қолданылды. Барлық анықталған жас жұлдызды объектілер үшін түрлі эволюциялық кезеңдерге сәйкес келетін сипаттамалық аймақтарға қатысты олардың орналасуын көрсететін түс-түс диаграммалары жасалды. Сонымен қатар, спектрлік индекстер есептелді және анықталған объектілердің жіктелуі мен эволюциялық мәртебесін растайтын спектрдегі энергияның таралуы тұрғызылды. N64 шаң көпіршігіндегі эволюцияның алғашқы кезеңдеріндегі жас жұлдызды объектілердің кеңістіктік таралуын талдау жіп тәрізді құрылымдар бойындағы сәулелену көздерінің айқын концентрациясын анықтады, бұл олардың пайда болуы мен шаң бұлтының морфологиясы арасындағы байланысты көрсетеді.

Түйін сөздер: көпіршік, инфрақызыл сәулелену, IRAC, 2mass, жас жұлдызды объектілер, эволюциялық кезең.

A.B. Manapbayeva^{1,2}, N.Sh. Alimgazina¹, A.Zh. Naurzbayeva¹,
 A.Zh. Omar¹, T. Komeshe^{1,3}, M.T. Kyzgarina^{1*}, A.M. Demessinova¹, K.M. Turekhanova¹

¹Institute of Experimental and Theoretical Physics, Farabi University Almaty, Kazakhstan

²Kazakh National Women's Teacher Training University Almaty, Kazakhstan

³Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan

*e-mail: meir83physics@gmail.com

Young stellar objects in the region of dust bubble N64

The study of young stellar objects is one of the priority areas of modern astrophysics, since such objects allow us to directly study the physical processes that accompany the formation of stars and planetary systems. The goal of this study is to study the N64 dust bubble region and classify young stellar objects. Searching for young stellar objects using infrared data from

astronomical catalogs is one of the most effective methods for studying the processes of star formation. Young stars and their associated structures are usually located in dense gas and dust clouds, which significantly hinders their observation at optical wavelengths. Unlike visible light, infrared radiation penetrates environments, allowing the detection and analysis of objects that are inaccessible to optical observations. In this study the detection of young stellar objects was performed using the method proposed by Gutermuth et al. (2008). The study used archival infrared data from *Spitzer* Space Telescope (IRAC: 3.6–8.0 μm ; MIPS: 24 μm) and data from 2MASS catalog (J, H, K_s). For identified young stellar objects, color-color diagrams were created showing their location relative to characteristic regions corresponding to different evolutionary stages. In addition, spectral indices were calculated and spectral energy distributions were constructed to support the classification and evolutionary status of the detected objects. Analysis of the spatial distribution of young stellar objects in the early stages of evolution in N64 dust bubble revealed a clear concentration of sources along filamentary structures, indicating a connection between their formation and morphology of the dust cloud.

Keywords: bubbles, infrared radiation, IRAC, 2mass, young stellar objects, evolutionary stages.

А.Б. Манапбаева^{1,2}, Н.Ш. Алимгазинова¹, А.Ж. Наурзбаева¹,
А.Ж. Омар¹, Т. Көмеш^{1,3}, М.Т. Кызгарина^{1*}, А.М. Демесинова¹, К.М. Туреханова¹

¹Институт экспериментальной и теоретической физики, Казахский национальный университет
имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан

³Назарбаев Университет, Астана, Казахстан

*e-mail: meir83physics@gmail.com

Молодые звездные объекты в регионе пылевого пузыря N64

Изучение молодых звёздных объектов является одним из приоритетных направлений современной астрофизики, поскольку такие объекты позволяют непосредственно исследовать физические процессы, сопровождающие формирование звёзд и планетных систем. Целью данной работы является изучение области пылевого пузыря N64, а также идентификация и классификация молодых звёздных объектов. Поиск молодых звёздных объектов с использованием инфракрасных данных, полученных из астрономических каталогов, является одним из наиболее эффективных методов исследования процессов звездообразования. Молодые звёзды и сопутствующие им структуры, как правило, находятся внутри плотных газо-пылевых облаков, что существенно затрудняет их наблюдение в оптическом диапазоне. В отличие от видимого света, инфракрасное излучение способно проникать через такие среды, обеспечивая возможность обнаружения и анализа объектов, недоступных для оптических наблюдений. Идентификация молодых звёздных объектов в рамках данного исследования выполнена с использованием методики, предложенной Gutermuth et al. (2008). В исследовании использованы архивные инфракрасные данные *Spitzer* Space Telescope (IRAC: 3.6–8.0 мкм; MIPS: 24 мкм) совместно с данными каталога 2MASS (J, H, K_s). Для всех выявленных молодых звёздных объектов построены цвет-цветовые диаграммы, отражающие их положение относительно характерных областей, соответствующих различным эволюционным стадиям. Кроме того, рассчитаны спектральные индексы и сформированы спектральные распределения энергии, которые подтвердили классификацию и эволюционный статус обнаруженных объектов. Анализ пространственного распределения молодых звёздных объектов ранних стадий эволюции в пределах пылевого пузыря N64 выявил выраженную концентрацию источников вдоль нитевидных структур, что указывает на связь их формирования с морфологией пылевого облака.

Ключевые слова: пузырь, инфракрасное излучение, IRAC, 2mass, молодые звездные объекты, эволюционная стадия.

Кіріспе

Соңғы жылдары шаң көпіршіктері және онымен байланысты жұлдыз түзілу аймақтары зерттеушілердің назарын көбірек аударды [1-5], себебі оларды талдау жұлдызаралық ортада жұлдыздар мен планеталардың пайда болуына ықпал ететін физикалық жағдайлар туралы маңызды түсініктер береді. Мұндай құрылымдардың морфологиясы мен эволюциясын зерттеу жас жұлдыздарды қоршаған газ бен шаңның өзара әрекеттесуін көрсетеді. Шаң көпіршіктеріне тән пішін көбінесе жұлдыз түзілу процесстерінің басталуының белгісі болып саналады. Атап айтқанда, көпіршіктің кеңеюі соққы фронтының пайда болуымен қатар жүреді. Ол қоршаған молекулалық газды қысып, бұрыннан бар тығыз ядролардың гравитациялық коллапсын тудыруы мүмкін. Қызығушылықтың артуына қарамастан, басталған жұлдыз түзілу механизмі әлі де толық зерттелмеген, бұл оның ғылыми өзектілігі жоғары екенін көрсетеді.

Жас жұлдызды объектілер (ЖЖО) – эволюциясының алғашқы сатысындағы жұлдыздар, олар қоршаған молекулалық бұлттардан зат жинау процесінде болады. Бұл кезеңде олардың ядроларындағы термоядролық

реакциялар әлі басталмады немесе тұрақты күйге жетпеді, бұл мұндай объектілерді көбінесе протожұлдыздар деп жіктеуге әкеледі. Оларды бақылау оптикалық диапазондағы сәулелену жұтылатын газ бен шаңның тығыз қабықтарымен айтарлықтай күрделене түседі. Сонымен қатар, жас жұлдыздардың айналасындағы қыздырылған зат инфрақызыл сәулеленуді тиімді түрде шығарады, бұл инфрақызыл бақылауларды жас жұлдыздарды анықтау және зерттеудің негізгі құралына айналдырады. Жұлдыз түзілетін аймақтар мен жас жұлдызды объектілерді эволюциясының әр түрлі кезеңдерінде зерттеу бізге жұлдыздар мен протопланеталық дискілердің пайда болуының негізгі кезеңдерін бақылауға, сондай-ақ жұлдызаралық заттың тығыздығын, температурасын және динамикасын қоса алғанда, қоршаған ортаның физикалық параметрлерін сипаттауға мүмкіндік береді. Мұндай деректерді толқын ұзындықтарының кең диапазонында талдау жұлдыздардың пайда болу механизмдерін, протопланеталық дискілердің эволюциясын және планеталық жүйелердің пайда болуына әкелетін жағдайларды тереңірек түсінуге ықпал етеді.

Теориялық бөлім

Деректер. Бұл зерттеуде *Spitzer* ғарыштық телескопынан алынған мұрағаттық деректер пайдаланылды [6], ол 3,6; 4,5; 5,8 және 8,0 мкм [7] фотометриялық арналарындағы IRAC (Infrared Array Camera) құралдарын және 24 мкм толқын ұзындығындағы MIPS (Multiband Imaging Photometer for *Spitzer*) [8] көмегімен жоғары сезімтал орта инфрақызыл бақылауларды, сондай-ақ J(1,25 мкм), H(1,65 мкм) және K_s (2,17 мкм) диапазондарындағы [9] 2MASS каталогынан алынған жақын инфрақызыл деректерін ұсынады. Талдау үшін сенімді фотометриялық өлшемдері және сәулелену ағынының мәндері нөлге тең болмайтын сәулелену көздері таңдалды. Сапа критерийлері ретінде фотометриялық қателік шектері (0,2 mag-тан аз) пайдаланылды.

N64 шаң көпіршігі. N64 инфрақызыл көпіршігі – осы типтегі ықшам галактикалық нысандардың бірі және ол Churchwell және т.б. [10] жасаған инфрақызыл көпіршіктер каталогында көрсетілген. N64 көпіршігі центрі $l = 34.760^\circ$, $b = -0.669^\circ$, нүктелерінде орналасқан және өлшемі 20 бұрыштық минут болатын шаң көпіршігі болып табылады. N64 морфологиялық тұрғыдан B типіне жатады, оның құрылымы сынған және толық емес сақина тәрізді (1-сурет).

Жас жұлдызды объектілерді іздеу және анықтау

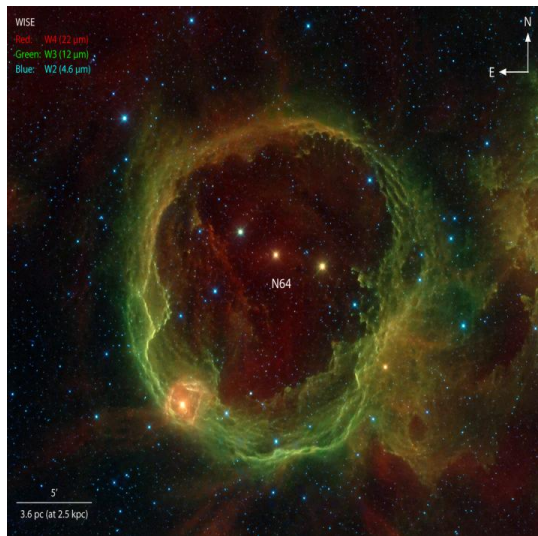
Жас жұлдызды объектілерге үміткерлер *Spitzer* ғарыштық телескопынан және 2MASS каталогынан алынған инфрақызыл деректер негізінде таңдалды. Зерттеліп жатқан аймақ және көрсетілген іздеу радиусында анықталған сәулелену көздері туралы негізгі ақпарат 1-кестеде келтірілген.

Бұл зерттеуде жас жұлдызды объектілерді анықтау үшін Gutermuth және т.б. [11] ұсынған әдістемеге негізделген алгоритм қолданылды. Эволюциялық кезеңіне байланысты жас жұлдызды объектілер бірнеше класқа бөлінеді: 0 класс (протожұлдыздар), I және II класс, өтпелі дискілері бар объектілер және III класс [12]. Жас жұлдызды объектілерді анықтау процедурасы осы жіктеуге сәйкес дәйекті түрде жүргізілді.

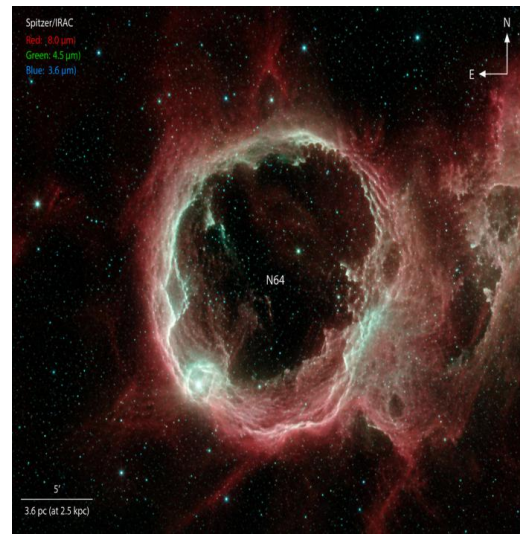
Жас жұлдызды объектілерді анықтау үшін бірінші қадам ЖЖО құрамына кірмейтін сәулелену көздерін алып тастауды, яғни негізгі ластаушы факторларды жоюды қамтыды. Оларға белсенді галактикалық ядролар (AGN), стационар жұлдыздар және полициклді ароматты көмірсутектердің (PAH) және соққыдан қозған

газдың шығарылуымен байланысты сәулелену көздері жатады [11]. Алдын ала тазалаудан кейін барлық объектілер үшін жеке жұлдызаралық жұтылу коэффициенттері есептеліп, ескерілді.

Соңғы қадам ЖЖО-лерді фотометриялық критерийлер мен спектрлік индекстер негізінде жіктеуді қамтыды.



а) WISE



ә) Spitzer

1-сурет. N64 көпіршігінің жақын және орташа инфрақызыл толқын ұзындықтарындағы көрінісі

1-кесте. Объектілерді іздеу параметрлері

Аймақ	R.A. диапазоны (deg)	Decl. диапазоны (deg)	Іздеу радиусы (arcmin)	Табылған объектілер саны
N64	$284.294 \leq \alpha \leq 284.306$	$+1.24 \leq \delta \leq +1.403$	5	3314

Объектілерді жіктеу Gutermuth және т.б. (2008) әдісіне сәйкес [11] жүргізілді, мұнда екі тәуелсіз диагностикалық ерекшелік қолданылды: инфрақызыл фотометриялық түс индекстері және инфрақызыл диапазондағы спектрдегі энергияның таралуының (SED) көлбеуін сипаттайтын спектрлік индекс α [13]. Бұл критерийлерді бірге қолдану бізге жұлдыз айналасындағы шаңның жылулық сәулеленуінен туындаған сәулелену көздерінің түс ерекшеліктерін де, олардың SED пішінін де ескеруге мүмкіндік береді, бұл жас жұлдызды объектілердің эволюциялық жіктелуінің сенімділігін арттырады.

Бірінші кезеңде жұлдыз айналасындағы шаңның, дискілердің және протожұлдыз қабықтарының сәулеленуіне сезімтал IRAC (Spitzer) инфрақызыл түстеріне негізделген ЖЖО-дің эволюциясының жіктелуі жүргізілді. Негізгі диагностикалық түстер жұлдыздық шамалардың айырмашылықтары ретінде анықталады: [3.6]-[4.5], [4.5]-[5.8], [5.8]-[8.0] [11].

Протожұлдыздарды анықтау (I класс). I класс объектілері ЖЖО эволюциясының бақыланатын ең ерте кезеңін білдіреді. Олар жұлдыздар айналасындағы тығыз қабықтың болуымен және заттың белсенді аккрециясымен сипатталады. Олардың спектрлік энергиясы қабық пен дискідегі шаңның сәулеленуіне байланысты күшті инфрақызыл артықшылықты көрсетеді [11].

Инфрақызыл түс-түс диаграммаларында мұндай сәулелену көздері ең жоғары түс индекстері бар аймақты («қызыл» объектілерді) алады, бұл оларды II класс объектілерінен тиімді түрде бөлуге мүмкіндік береді [14].

Протожұлдыздардың жіктелуі (I класс) келесі критерийлер негізінде іске асырылады [14]:

$$[4.5] - [5.8] > 1.0,$$

немесе $0.7 < [4.5] - [5.8] \leq 1.0,$

және $[3.6] - [4.5] > 0.7.$

II класс объектілерінің жіктелуі (дискілік ЖЖО). II класс объектілері жұлдыз айналасындағы дисктері бар негізгі тізбекке дейінгі сатыдағы жас жұлдызды объектілер болып табылады. Олардың спектрлік энергиясы дискідегі шаңнан шығарылатын жылулық сәулелерге байланысты орташа инфрақызыл артықшылықпен сипатталады [15].

Инфрақызыл түс-түс диаграммаларда мұндай объектілер протожұлдыздар (I класс) мен фотосфералық сәулеленуі бар көздер (III класс) арасындағы аралық орын алады. Оларды ажырату үшін 3.6–8.0 мкм толқын ұзындығы диапазонындағы түс индекстері қолданылады, бұл ЖЖО-лердің эволюциялық сатыларын тиімді түрде ажыратады [14].

II класс объектілерінің жіктелуі келесі критерийлерге негізделген [14]:

$$[4.5] - [8.0] > 0.5,$$

$$[3.6] - [5.8] > 0.35,$$

$$[3.6] - [5.8] \leq \frac{0.14}{0.04} \cdot ((([4.5] - [8.0]) - 0.5) + 0.5).$$

IRAC түстері шаңның жылулық сәулелерінің таралуын көрсетеді:

- $[3.6] - [4.5]$ пен $[4.5] - [5.8]$ өсуі $\rightarrow$ ыстық шаң мен қабықтың (протожұлдыздардың) үлесінің артуы;
- орташа мәндер $\rightarrow$ оптикалық жұқа дискінің болуы (II класс);
- артықшылықтың болмауы $\rightarrow$

Нәтижелер және талқылау

2-суретте инфрақызыл диапазонда есептелген және спектрлік индексі α бойынша зерттелген сәулелену көздерінің таралуы көрсетілген. Гистограмма эволюциялық класстар бойынша объектілердің таралуын көрсетеді және олардың үлгідегі статистикалық байланыстарын көрсетеді.

3-суретте фотометриялық қателіктері мен ықтимал ластаушы заттары бар объектілер алынып тасталғаннан кейін эволюциялық класс бойынша сәулелену көздерінің таралуының статистикалық диаграммасы (спектрлік индекс негізінде) көрсетілген. Соңғы үлгіге 378 сенімді сәулелену көздері кірді. Олардың ішінде 5 объект I классқа, 31 объект II классқа, бір сәулелену көзі протожұлдыздық табиғатымен сипатталатын «жалпақ» спектр (Flat spectrum) сатысына сәйкес келді және 209 объект III классқа жіктелді. 132 сәулелену көздері үшін фотометриялық деректердің жеткіліксіздігіне немесе белгіленген

фотосфералық сәулелену көздері (III класс/өрістік жұлдыздар).

Осылайша, IRAC түс кеңістігі инфрақызыл сәулеленуге негізделген ЖЖО эволюциялық сатыларын тиімді бөлуге мүмкіндік береді [11].

Әрі қарай, сәулелену көздері инфрақызыл диапазондағы спектрдегі энергияның таралуының (SED) көлбеуін сипаттайтын және жас жұлдызды объектілердің эволюциялық кезеңін бағалауға мүмкіндік беретін спектрлік индекс α көмегімен анықталды:

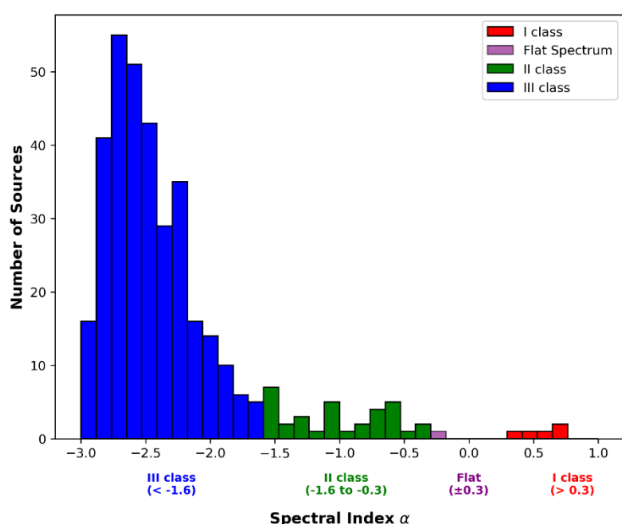
$$\alpha = \frac{d \log(\lambda F_{\lambda})}{d \log(\lambda)}.$$

Іс жүзінде спектрлік индекстің мәні 2MASS, WISE және *Spitzer* каталогтарынан алынған ағындарды пайдаланып, ~2-24 мкм толқын ұзындығы диапазонындағы дискретті фотометриялық деректерден анықталды. Есептеу үшін $\log(\lambda F_{\lambda})$ тәуелділігінің $\log(\lambda)$ -ға сызықтық жуықтауы қолданылды.

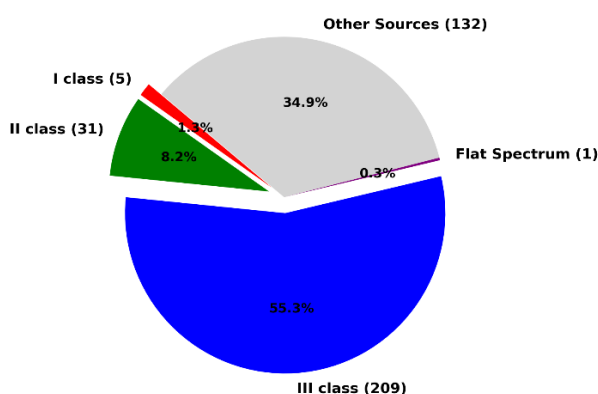
Алынған α мәндеріне сүйене отырып, сәулелену көздері жалпы қабылданған схема бойынша жіктелді: $\alpha > 0.3$ болатын объектілер I классқа жатқызылды, $-0.3 \leq \alpha \leq 0.3$ болатын сәулелену көздері жазық спектрлі объектілер ретінде жіктелді, $-1.6 \leq \alpha < -0.3$ кезінде II класс объектілері және $\alpha < -1.6$ кезінде III класс объектілері анықталды. Бұл тәсілді қолдану SED пішінін санды түрде сипаттауға және зерттеліп жатқан сәулелену көздерінің эволюциялық кезеңдерін нақтылауға мүмкіндік берді [16].

іріктеу критерийлеріне сәйкес келмеуіне байланысты жіктеу жүргізілмеді.

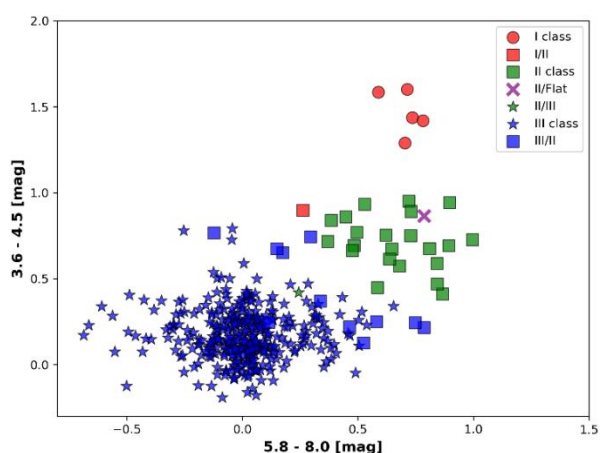
Зерттеудің келесі кезеңінде екі идентификациялау әдісі де салыстырылды, нәтижесінде толығымен сәйкес келетін жіктеулері бар сәулелену көздері анықталды, бұл ЖЖО-нің «таза» класстарын, сондай-ақ «түс-түс» диаграммалары мен спектрлік индексмен алынған нәтижелер сәйкес келмейтін аралас типті объектілерді құрады. Зерттелген аймақтағы 378 жас жұлдызды объектілерді жіктеу нәтижесінде келесі таралу алынды: басым бөлігі III класс (фон жұлдыздары және дискісіз объектілер) 337 объектіні (89,2%) құрайды, II класс объектілеріне (қалың дискілері бар жас жұлдыздар) 22 объект (5,8%) кіреді, I классқа (протожұлдыздар) 5 объект (1,3%), ал аралас және өтпелі класстар (I/II, II/III, II/Flat, III/II класс) 14 объектіні (3,7%) құрайды.



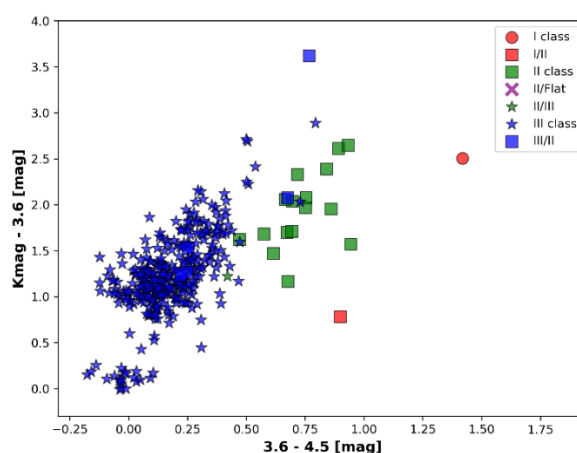
2-сурет. N64 шаң көпіршігі айналасындағы ЖЖО үміткерлерінің спектрлік индексі.



3-сурет. N64 аймағындағы ЖЖО-дің класс бойынша (I – III класс және Flat spectrum) таралуы.



а)



ә)

4-сурет. N64 шаң көпіршігі аймағындағы ЖЖО үміткерлер үшін «түс-түс» диаграммасы.

I класс ЖЖО үміткерлері қызыл шеңбермен, II класс объектілер жасыл шаршылармен, өтпелі

дискілері бар сәулелену көздері көк шаршылармен және III класс ЖЖО үміткерлері

I класс (II класс, III класс) – сәулелену көздерінің эволюциялық класы фотометриялық түс шектеулеріне де, спектрлік индекс α мәніне де толық сәйкес келеді [11, 13, 17]. Бұл сәйкестік түс сипаттамаларының SED пішінімен сәйкестігін көрсетеді және класс үшін жұлдыз айналасындағы ортаның типтік құрылымын көрсетеді.

I/II, II/III – фотометриялық түстерге негізделген жіктеу нәтижелері мен спектрлік индекс α сәйкес келмейтін өтпелі жағдайлар [11]. Қиғаш сызық алдында көрсетілген класс түс критерийлеріне негізделіп анықталады, ал қиғаш сызықтан кейінгі класс α мәніне сәйкес келеді. Мұндай объектілер әр түрлі SED пішіндерімен фотометриялық түстердің ұқсастығын немесе әр түрлі индекстерімен SED беткейлерінің ұқсастығын көрсетеді, бұл аралық эволюциялық сатылар мен жұлдыз айналасындағы шаңның күрделі геометриясына тән [13, 17].

Flat – $\alpha \approx 0$ мәні бар, инфрақызыл диапазондағы энергия таралуы жалпақ пішінге жақын сәулелену көздері [17]. Мұндай нысандар I және II класстар арасындағы өтпелі кезең ретінде түсіндіріледі және диск құрылымын сақтай отырып, шаң қабығының ішінара пашырауы немесе жұқаруы арқылы сипатталады.

Анықталған барлық жас жұлдызды объектілер үшін түсті көрсеткіштер есептелді және сәйкес «түс-түс» диаграммалары құрылды (4-сурет). Жоғарғы панельде (K – [3.6]) мәнінің ([3.6] – [4.5]) мәніне, ал төменгі панельде ([3.6] – [4.5]) мәнінің ([4.5] – [5.8]) мәніне тәуелділігі көрсетілген, бұл бізге сәулелену көздерінің инфрақызыл қасиеттерін және олардың эволюциялық күйін зерттеуге мүмкіндік береді [1, 11, 18].

көк жұлдыздармен белгіленген. Аралық сипаттамалары бар объектілер (I/ II және II/III) эволюциялық сатылар арасындағы өтпелі орнын көрсететін қосымша маркерлермен белгіленген. Түсті диаграммаларға негізделген ЖЖО-лерді жіктеудің қолданыстағы әдістері жақсара берген сайын, анықталған сәулелену көздерінің таралуын талдауға болады. Диаграммаларда объектілердің класстарға бөлінуі анық көрсетілген: I класс ЖЖО-лер ең жоғары түс индекстерімен сипатталады, II класс объектілері аралық позицияны алады, ал III класс сәулелену көздері фотосфералық мәндерге жақын төмен мәндер аймағында шоғырланған.

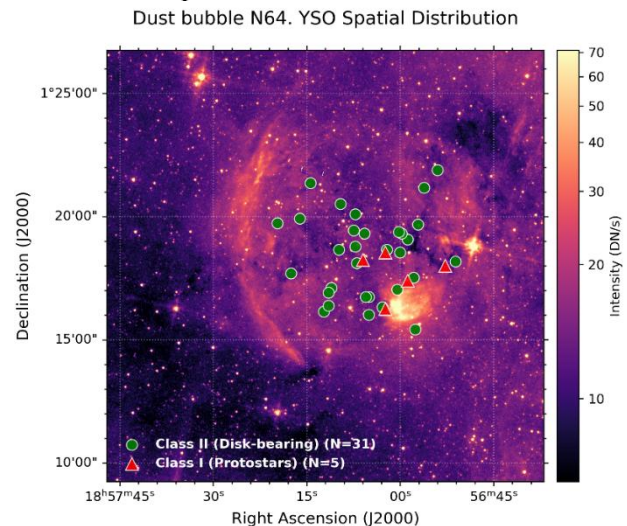
Осылайша, ұсынылған диаграмма ЖЖО таралуының олардың эволюциялық күйіне айқын тәуелділігін көрсетеді және оларды жіктеу үшін инфрақызыл түсті индекстерді пайдаланудың тиімділігін растайды.

Төменде инфрақызыл зерттеу деректерінен алынған N64 инфрақызыл шаң көпіршігі аймағындағы жас жұлдызды объектілердің (ЖЖО) кеңістікте таралуы келтірілген. 5-суретте әр түрлі эволюциялық сатылардағы объектілер көрсетілген: протожұлдыздар (I класс, үшбұрыштармен белгіленген) және протопланеталық дискілері бар объектілер (II класс, шеңберлермен белгіленген). Көптеген ЖЖО көпіршікті қабықта және инфрақызыл жарықтығы жоғары аймақтарға жақын шоғырланғаны анық, бұл олардың пайда болуы мен көпіршіктің кеңею динамикасы және жұлдызаралық ортаның қысылуы арасындағы байланысты көрсетеді.

2-кестеде зерттеудің барлық кезеңдерінде белгілі бір класстың жас жұлдызды объектілерге жататыны расталған ерте эволюциялық класстарға (I және II) және аралас жіктелуге жататын 41 объектінің сипаттамалары келтірілген [19].

Объектілердің белгілі бір ЖЖО түріне жататынын бағалау үшін зерттеліп жатқан объектілердің спектрдегі энергия таралуын модельдік SED-ке сәйкестендіру әдісі де қолданылады [20,21]. Алдыңғы зерттеулерде [22-25] N64 шаң көпіршігі аймағында жас жұлдызды объектілер анықталды және олардың алдын ала жіктелуі спектрлік индекстер мен спектрдегі энергия таралуын (SED) талдау негізінде жүргізілді. Зерттеліп жатқан объектілердің жіктелуінің негізгі нәтижелері және параметрлері 2-кестеде келтірілген. Талдау аймақта I класс протожұлдыздардан бастап эволюциялық тұрғыдан дамыған III класс сәулелену көздеріне дейінгі әр түрлі класстағы объектілердің, сондай-ақ жалпақ спектрлі (Flat) сәулелену көздерінің бар

екенін көрсетті. Алынған нәтижелер N64 шаң көпіршігі аймағындағы жұлдыз түзілу процесстерінің күрделі сипатын растайды және жас жұлдызды объектілерді зерттеу үшін *Spitzer*, 2MASS және SED модельдеу әдістерінен алынған инфрақызыл деректерді пайдаланудың тиімділігін көрсетеді.



5-сурет. N64 шаң көпіршігі аймағындағы ЖЖО таралуы.

Қорытынды

Бұл мақалада *Spitzer* және 2MASS ғарыштық телескоптардың мұрағаттық деректерін пайдалана отырып, N64 инфрақызыл шаң көпіршігі аймағына кешенді зерттеу жүргізілді. Жас жұлдызды объектілер IRAC инфрақызыл түс индекстерін және α спектрлік индексін талдау негізінде Gutermuth және т.б. әдісін қолдана отырып анықталды және жіктелді. Үлгіні галактикадан тыс және фотометриялық ластанудан тазарту, жұлдызаралық жұтылуды есепке алу жұлдыз маңындағы шаңның шығарылуына сезімтал диагностикалық критерийлерді қолдануды қамтитын бірнеше кезенді тәсіл енгізілді.

Зерттеу барысында әр түрлі эволюциялық сатылардағы, яғни I, II және III класстағы жас жұлдызды объектілер, сондай-ақ жалпақ спектрлері мен өтпелі дискілері бар сәулелену көздері анықталды. «Түс-түс» диаграммаларды және спектрлік индекс үлестірімдерін талдау нысандардың эволюциялық кезең бойынша айқын бөлінуін көрсетті, бұл қолданылған фотометриялық критерийлердің сенімділігін растады. Байқалған деректерді модельдік спектрдегі энергия таралуымен салыстыру бізге жеке нысандардың жіктелуін нақтылауға және

өтпелі эволюциялық күйлерді анықтауға мүмкіндік берді.

Жас жұлдызды объектілердің инфрақызыл көпіршікті қабықпен және инфрақызыл сәулеленуі жоғары аймақтармен кеңістіктік корреляциясы бар екені анықталды. Бұл көпіршіктердің кеңею процесстері мен онымен байланысты соққы толқындардың осы аймақта жұлдыз түзілудің басталуына әсер ететінін көрсетуі мүмкін.

Сонымен, алынған нәтижелер N64 инфрақызыл шаң көпіршігі белсенді жұлдыз түзілу аймағы екенін растайды. Фотометриялық жіктеуді, спектрлік индексті талдауды және спектрдегі энергия таралуын модельдеуді біріктіретін интеграцияланған тәсілді қолдану өте сенімді идентификацияны қамтамасыз етеді және күрделі астрофизикалық ортадағы жас жұлдызды объектілердің эволюциялық кезеңдерін егжей-тегжейлі зерттеуге мүмкіндік береді.

2-кесте. ЖЖО үміткерлер

Объект	<i>RA(J2000)</i> <i>h:m:s</i>	<i>DE(J2000)</i> <i>d:m:s</i>	<i>GLIMPSE ID</i>	3.6, <i>mag</i>	4.5, <i>mag</i>	5.8, <i>mag</i>	8, <i>mag</i>	Класс ЖЖО
N64_1	18 56 58.8	+1 17 24.0	G034.7121-00.6446	9.608	8.189	7.205	6.424	I класс
N64_2	18 57 02.4	+1 16 15.6	G034.7020-00.6667	12.686	11.084	9.964	9.250	I класс
N64_3	18 57 02.4	+1 18 32.4	G034.7358-00.6489	12.629	11.191	10.208	9.472	I класс
N64_4	18 57 06.0	+1 18 14.4	G034.7383-00.6643	12.942	11.652	10.667	9.964	I класс
N64_5	18 56 52.8	+1 18 00.0	G034.7088-00.6174	12.510	10.924	9.723	9.135	I класс
N64_6	18 56 58.1	+1 19 15.6	G034.7382-00.6281	13.716	12.817	12.040	11.778	I/II класс
N64_7	18 56 56.2	+1 21 10.8	G034.7633-00.6059	13.370	12.957	12.088	11.223	II класс
N64_8	18 56 57.6	+1 15 25.2	G034.6803-00.6554	12.424	11.850	11.239	10.559	II класс
N64_9	18 56 58.8	+1 19 04.8	G034.7368-00.6320	11.214	10.373	9.803	9.418	II класс
N64_10	18 56 59.8	+1 19 19.2	G034.7420-00.6332	12.320	11.705	10.805	10.168	II класс
N64_11	18 57 00.0	+1 18 32.4	G034.7307-00.6407	11.701	11.252	10.854	10.269	II класс
N64_12	18 57 00.2	+1 19 22.8	G034.7436-00.6350	12.837	12.144	11.643	10.750	II класс
N64_13	18 57 00.5	+1 17 02.4	G034.7099-00.6535	11.536	10.947	10.387	9.545	II класс
N64_14	18 57 02.2	+1 18 39.6	G034.7370-00.6477	12.631	11.877	11.178	10.557	II класс
N64_15	18 57 02.9	+1 16 19.2	G034.7040-00.6676	13.135	12.183	11.336	10.615	II класс
N64_16	18 57 05.0	+1 16 01.2	G034.7032-00.6781	12.291	11.820	11.480	10.637	II класс
N64_17	18 57 05.0	+1 16 44.4	G034.7135-00.6729	11.348	10.488	9.923	9.476	II класс
N64_18	18 57 05.3	+1 19 08.4	G034.7500-00.6554	11.620	10.944	10.299	9.489	II класс
N64_19	18 57 05.5	+1 16 44.4	G034.7150-00.6740	10.714	9.963	9.328	8.600	II класс
N64_20	18 57 07.0	+1 18 07.2	G034.7380-00.6688	12.304	11.587	11.197	10.827	II класс
N64_21	18 57 07.2	+1 20 06.0	G034.7680-00.6553	12.105	11.335	10.829	10.333	II класс
N64_22	18 57 07.4	+1 19 26.4	G034.7589-00.6613	12.970	12.242	11.627	10.632	II класс
N64_23	18 57 09.6	+1 20 31.2	G034.7788-00.6604	12.574	11.909	11.327	10.851	II класс
N64_24	18 57 10.1	+1 18 18.0	G034.7467-00.6797	11.467	10.794	10.301	9.654	II класс
N64_25	18 57 11.5	+1 16 22.8	G034.7214-00.6997	10.543	9.652	9.017	8.288	II класс
N64_26	18 57 14.4	+1 21 21.6	G034.8000-00.6727	10.453	9.520	8.786	8.257	II класс
N64_27	18 57 19.7	+1 19 44.4	G034.7865-00.7045	11.612	10.917	10.135	9.652	II класс
N64_28	18 56 51.1	+1 18 10.8	G034.7085-00.6101	11.821	10.877	10.201	9.305	II класс
N64_29	18 57 07.9	+1 18 14.4	G034.7418-00.6715	13.721	12.855	11.996	11.209	II/Flat класс
N64_30	18 56 54.0	+1 21 39.6	G034.7660-00.5946	11.977	11.557	11.233	10.989	II/III класс
N64_31	18 56 54.0	+1 21 54.0	G034.7694-00.5929	13.429	13.183	12.284	12.169	III/II класс
N64_32	18 56 57.1	+1 19 40.8	G034.7419-00.6207	8.760	8.085	7.548	7.398	III/II класс
N64_33	18 56 57.8	+1 17 31.2	G034.7114-00.6399	13.356	13.139	12.122	11.335	III/II класс
N64_34	18 57 05.8	+1 19 19.2	G034.7539-00.6553	11.593	11.466	10.742	10.218	III/II класс
N64_35	18 57 07.2	+1 18 46.8	G034.7479-00.6655	13.036	12.292	11.518	11.223	III/II класс
N64_36	18 57 09.8	+1 18 39.6	G034.7514-00.6757	12.260	11.608	10.936	10.762	III/II класс
N64_37	18 57 11.0	+1 17 06.0	G034.7310-00.6923	12.654	12.283	11.627	11.290	III/II класс
N64_38	18 57 11.5	+1 16 55.2	G034.7286-00.6956	12.660	12.409	11.848	11.267	III/II класс
N64_39	18 57 12.2	+1 16 08.4	G034.7187-00.7040	12.488	12.243	11.767	11.019	III/II класс
N64_40	18 57 16.1	+1 19 55.2	G034.7820-00.6891	12.125	11.904	11.224	10.760	III/II класс
N64_41	18 57 17.5	+1 17 42.0	G034.7522-00.7114	11.051	10.284	9.364	9.487	III/II класс

Алғыс сөз

Бұл жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің гранттық қаржыландыру бағдарламасы шеңберінде (AP23489575 жобасы бойынша) орындалды.

Авторлардың үлесі

А.Б. Манапбаева: деректерді өңдеу және басқару, зерттеу жүргізу, модельдер жасау, қолжазбаның астапқы нұсқасын дайындау және жазу; **Н.Ш. Алимгазина:** зерттеудің жалпы мақсаттары мен міндеттерін қалыптастыру, әдістеме әзірлеу, зерттеу қызметін жоспарлау, мақаланың бастапқы нұсқасын жазу, ғылыми жетекшілік; **А.Ж. Наурызбаева:** тұжырымдама жасау, формалды талдау, жобалау, мәтінді редакциялау және толықтыру, ғылыми жетекшілік; **А.Ж. Омар:** бағдарламалық қамтамасыз ету әзірлеу, бағдарламалау; **Т. Көмеш:** бағдарламалау, бағдарламалық код пен қолдаушы алгоритмдерді іске асыру, компьютерлік бағдарламаларды жобалау; **М.Т. Кызгарина:** көрнекі материалдар дайындау, тұжырымдама жасау, мәтінді редакциялау және толықтыру; **А.М. Демесинова:** жобалау, пікір білдіру және түзету, модельдер жасау. **К.М. Түреханова:** жобаны басқару, ғылыми жетекшілік.

Әдебиет

1. D. Liu, Y. Xu, Y. Li, Z. Lin, Ch. Hao, WenJin Yang, J. Li, X. Liu, Y. Dong, S. Bian, Molecular Bubble and Outflow in S Mon Revealed by Multiband Data Sets. *The Astrophysical Journal*. **964**(1), 93 (2024). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad24e0>
2. А.Б. Манапбаева, J. Esimbek, Н.Ш. Алимгазина, М.Т. Кызгарина, А.Б. Атамұрат, N22 шаң көпіршіктері жанындағы жас жұлдыз объектілерін анықтау. *ҚР ҰҒА Хабарлары. Физика-математика сериясы* **337**(3), 96–105 (2021). [A.B. Manapbayeva, J. Esimbek, N.Sh. Alimgazina, M.T. Kyzgarina, A.B. Atamurat, Identification of young star objects near the dust bubble N22, *News of the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan Series physico-mathematical*. **337**(3), 96–105 (2021) (in Kaz)].
3. A.B. Nazar, N.Sh. Alimgazina, M.T. Kyzgarina, A.M. Demessinova, A.B. Manapbayeva, Identification of young star objects near dust bubble N10. *Rec. Contr. Phys.* **83**(4), 13–20 (2022). <https://doi.org/10.26577/RCPH.2022.v83.i4.02>
4. A. Alisher, D. Aslan, and K. Turekhanova, Search and identification of young stellar objects in infrared dust bubbles N19, *Rec. Contr. Phys.* **86**(3), 12–20 (2023). <https://doi.org/10.26577/RCPH.2023.v86.i3.02>
5. N. Alimgazina, N.A. Sharipbay, M.T. Kyzgarina, A.B. Manapbayeva, K.M. Turekhanova, A.Zh. Omar, A.M. Demessinova, A.A. Alibek, Study of the N126 dust bubble in the infrared wavelength range, *Rec. Contr. Phys.* **89**(2), 19–26 (2024). <https://doi.org/10.26577/RCPH.2024.v89i2-03>
6. M.W. Werner, T.L. Roellig, F.J. Low, G. H. Rieke, M. Rieke, W. F. Hoffmann, E. Young, J. R. Houck, B. Brandl, G. G. Fazio, The Spitzer Space Telescope Mission. *The Astrophysical Journal Supplement Series* **154**(1), 1–9 (2004). <https://doi.org/10.1086/422992>
7. G.G. Fazio, J.L. Hora, L.E. Allen, M.L.N. Ashby, P. Barmby, L.K. Deutsch, J.-S. Huang, S. Kleiner, M. Marengo, S. T. Megeath, The Infrared Array Camera (IRAC) for the Spitzer Space Telescope. *The Astrophysical Journal Supplement Series* **154**(1), 10–17 (2004). <https://doi.org/10.1086/422843>
8. G.H. Rieke, E.T. Young, C.W. Engelbracht, D. M. Kelly, F. J. Low, E. E. Haller, J. W. Beeman, K. D. Gordon, J. A. Stansberry, K. A. Misselt, The Multiband Imaging Photometer for Spitzer (MIPS). *The Astrophysical Journal Supplement Series* **154**(1), 25–29 (2004). <https://doi.org/10.1086/422717>
9. M.F. Skrutskie, R.M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, S. Schneider, J. M. Carpenter, C. Beichman, R. Capps, T. Chester, J. Elias, The Two Micron All Sky Survey (2MASS). *The Astronomical Journal* **131**(2), 1163–1183 (2006). <https://doi.org/10.1086/498708>
10. E. Churchwell, M. S. Povich, D. Allen, M. G. Taylor, M. R. Meade, B. L. Babler, R. Indebetouw, C. Watson, B. A. Whitney, M. G. Wolfire, The Bubbling Galactic Disk. *The Astrophysical Journal* **649** (2), 759–778 (2008). <https://doi.org/10.1086/507015>
11. R.A. Gutermuth, P.C. Myers, S.T. Megeath, L.E. Allen, J.L. Pipher, J. Muzerolle, A. Porras, E. Winston, and G. Fazio, Spitzer Observations of NGC 1333: A Study of Structure and Evolution in a Nearby Embedded Cluste. *The Astrophysical Journal* **674**(1), 336–356 (2008). <https://doi.org/10.1086/524722>
12. J. Zhou, D. Zhou, J. Esimbek, W.Baan, G. Wu, W. Ji, Y. He, D. Li, S. Sailanbek, T. Komesh. One of the Largest Galactic Infrared Bubbles Showing Strong Evidence of Triggered Star Formation. *The Astrophysical Journal* **897**(1), 74 (2020). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab94c0>
13. T.P. Greene, B.A. Wilking, P. Andre, Young Erick T., Lada Charles J. Further Mid-Infrared Study of the Rho Ophiuchi Cloud Young Stellar Population. *The Astrophysical Journal* **434**, 614–626 (1994). <https://doi.org/10.1086/174763>
14. R.A. Gutermuth, S.T. Megeath, P.C. Myers, L. E. Allen, J.L. Pipher, and G.G. Fazio, A Spitzer Survey of Young Stellar Clusters within One Kiloparsec of the Sun: Cluster Core Extraction and Basic Structural Analysis. *The*

- Astrophysical Journal Supplement Series* **184** (1), 18–83 (2009). <https://doi.org/10.1088/0067-0049/184/1/18>
15. C.J. Lada, Evolution of circumstellar disks around young stellar objects. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **25**, 23-56 (1987).
 16. N. Alimgazinova, Young stellar objects in the region of dust bubble N1, *Rec. Contr. Phys.* **92**(1), 50–59. (2025). <https://doi.org/10.26577/RCPH20259215>
 17. H. Shen, J. Esimbek, C. Henkel, Y. Xu, J. Zhou, D. Li, Y. He, X. Tang, G. Wu, T. Komesch, K. Tursun, D. Zhou, E. Imanaly, and D. Berdikhan, Extended CO(1–0) survey and ammonia measurements towards two bubble regions in W5. *Astronomy and Astrophysics* **689**, A140 (2024). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202347972>
 18. W. Zhang, J. Zhou, J. Esimbek, W. Baan, X. Tang, D. Li, Y. He, G. Wu, D. Zhou, Y. Ma, Coevolution of Giant Molecular Clouds, Filaments, and Clumps as a Function of the Dense Gas Mass Fraction. *Astrophysical Journal Supplement Series* **275**(1), 7 (2024). <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ad7828>
 19. VizieR. Catalogs. <https://vizier.cds.unistra.fr/viz-bin/VizieR-3?-source=II/293&-out.max=50&-out.form=HTML%20Table&-out.add= r&-out.add= RAJ, DEJ&-sort= r&-oc.form=sexa>
 20. T.P. Robitaille, M.R. Meade, B.L. Babler, B.A. Whitney, K.G. Johnston, R. Indebetouw, M. Cohen, M.S. Povich, M. Sewilo, R.A. Benjamin, E. Churchwell. Intrinsically red sources observed by Spitzer in the Galactic midplane. *The Astrophysical Journal* **136**, 2413-2440 (2008). <https://doi.org/10.1088/0004-6256/136/6/2413>
 21. T.P. Robitaille, B.A. Whitney, R. Indebetouw, K. Wood, Interpreting spectral energy distributions from young stellar objects. II. Fitting observed SEDs using a large grid of precomputed models. *The Astrophysical Journal Supplement Series* **169** (2), 328 (2007). <https://doi.org/10.1086/512039>
 22. A.B. Manapbayeva, N. Alimgazinova, Search and analysis of sed of pre-main-sequence stars in the dust bubble N64. Proceedings of the 10th international scientific conference "Modern achievements in physics and fundamental physical education", Almaty, Kazakhstan. 151-152 (2026).
 23. А.М. Демесинова, Н.Е. Абилдаев. N64 шанды көпіршікті аймақтағы жас жұлдызды объектілердің спектрлік индексі анықтау. *Студенттер мен жас ғалымдардың «Фараби әлемі» атты халықаралық ғылыми конференция материалдары*, 185-186 (2025). [A.M. Demesinova, N.E. Abildaev. Determination of the spectral index of young stellar objects in the dust bubble region N64. Proceedings of the International Scientific Conference of Students and Young Scientists "Farabi World", 185-186 (2025) (in Kaz)]
 24. D. Berdikhan, J. Esimbek, C. Henkel, A. Manapbayeva, D. Tuiakbayeva. Cloud-cloud collision and star formation in G013.313+0.193. *Astronomy and Astrophysics* **699**, 137 (2025). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202453285>
 25. Д.М. Әлішер, А.М. Демесинова. Анализ распределений энергии в спектрах молодых звездных объектов в регионе пузыря N64. *Материалы международной научной конференции студентов и молодых ученых «Фараби әлемі»*, 235-236 (2026). [D.M. Alisher, A.M. Demesinova. Analysis of energy distributions in the spectra of young stellar objects in the region of the bubble N64. Materials of the international scientific conference of students and young scientists "Farabi World", 235-236 (2026) (in Kaz)].

Авторлар туралы мәлімет:

Арайлым Манапбаева – PhD, аға оқытушы, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, (Алматы, Қазақстан, email: manapbayeva.arailym@gmail.com).

Назгул Алимгазиева – физ.-мат. ғыл. канд., қауымд. профессор, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, (Алматы, Қазақстан, e-mail: nazgul.alimgazinova@kaznu.edu.kz).

Айша Наурызбаева – физ.-мат. ғыл. канд, проф. м. а., Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, (Алматы, Қазақстан, email: aisha.nuryzbaeva@kaznu.edu.kz).

Аружан Омар – PhD, аға оқытушы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, (Алматы, Қазақстан, email: omaruzhan@gmail.com).

Тоқтархан Көмеш – PhD, постдокторант, Назарбаев Университеті, (Астана, Қазақстан, email: toktarkhan.komesh@nu.edu.kz).

Мейрамгүл Кызгарина (автор-корреспондент) – PhD, аға оқытушы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, (Алматы, Қазақстан, email: meiramgul.kyzgarina@kaznu.edu.kz).

Айзат Демесинова – PhD, аға оқытушы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, (Алматы, Қазақстан, email: aiyat.dem@gmail.com).

Құндыз Туреханова – физ.-мат. ғыл. канд, қауымд. профессор, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, (Алматы, Қазақстан, email: kunduz@physics.kz).

Information about authors:

Arailym Manapbayeva – PhD, Senior lecturer, Kazakh National Women's Teacher Training University, (Almaty, Kazakhstan, email: manapbayeva.arailym@gmail.com).

Nazgul Alimgazinova – Cand. of Phys. and Math. Sc., Ass. Prof, Farabi University, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: nazgul.alimgazinova@kaznu.edu.kz).

Aisha Naurzbaeva – Cand. of Phys. and Math. Sc., Acting Prof., Farabi University, (Almaty, Kazakhstan, email: aisha.nuryzbaeva@kaznu.edu.kz).

Aruzhan Omar – PhD, Senior lecturer, Farabi University, (Almaty, Kazakhstan, email: omaruzhan@gmail.com).

Toktarkhan Komeshe – PhD, Postdoctoral Researcher, Nazarbayev University, (Astana, Kazakhstan, email: toktarkhan.komeshe@nu.edu.kz).

Meiramgul Kyzgarina (corresponding author) – PhD, Senior lecturer, Farabi University, (Almaty, Kazakhstan, email: meiramgul.kyzgarina@kaznu.edu.kz).

Aizat Demessinova – PhD, Senior lecturer, Farabi University, (Almaty, Kazakhstan, email: aizat.dem@gmail.com).

Kunduz Turekhanova – Cand. of Phys. and Math. Sc., Ass. Prof., Farabi University, (Almaty, Kazakhstan, email: kunduz@physics.kz).

Информация об авторах:

Арайлым Манапбаева – PhD, старший преподаватель, Казахский национальный женский педагогический университет, (Алматы, Казахстан, email: manapbayeva.arailym@gmail.com).

Назгул Алимгазина – канд. физ.-мат. наук, ассоц. профессор, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, (Алматы, Казахстан, e-mail: nazgul.alimgazina@kaznu.edu.kz).

Айша Наурызбаева – канд. физ.-мат. наук, и.о. профессора, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, (Алматы, Казахстан, email: aisha.nuryzbaeva@kaznu.edu.kz).

Аружан Омар – PhD, старший преподаватель, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, (Алматы, Қазақстан, email: omaruzhan@gmail.com).

Тоқтархан Көмеш – PhD, постдокторант, Назарбаев Университет, Астана, Казахстан, (email: toktarkhan.komeshe@nu.edu.kz).

Мейрамгул Қызғарина (автор-корреспондент) – PhD, старший преподаватель, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, (Алматы, Казахстан, email: meiramgul.kyzgarina@kaznu.edu.kz).

Айзат Демесинова – PhD, старший преподаватель, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, (Алматы, Казахстан, email: aizat.dem@gmail.com).

Құндыз Түреханова – канд. физ.-мат. наук, ассоц. профессор, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, (Алматы, Казахстан, email: kunduz@physics.kz).

Мақала тарихы: түсті: 14 маусым 2026; түзетілді: 01 тамыз; қабылданды: 03 тамыз 2026.

Article history: received: 04 May 2026; revised: 01 August; accepted: 03 August 2026.

История статьи: поступила: 04 мая 2026; после доработки: 01 августа; принята: 03 августа 2026.