

УДК 524.3

DOI: <https://doi.org/10.17721/BTSNUA.2023.67.23-27>

Василь ПОНОМАРЕНКО, канд. фіз.-мат. наук

ORCID ID: 0000-0003-3964-7664

e-mail: vasylyponomarenko@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Артем ІВАНОВ, студ.

ORCID ID: 0009-0006-2704-9906

e-mail: art_iv3@ukr.net

Житомирський державний університет імені Івана Франка, Житомир, Україна

АНАЛІЗ МАСИВУ ВІДКРИТИХ ЕКЗОПЛАНЕТ ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ІСНУВАННЯ ЖИТТЯ ЗЕМНОГО ТИПУ

Вступ. Екзопланети в зоні життя є особливо цінними об'єктами для досліджень. Вони дають детальне розуміння про умови виникнення життя, і водночас розуміння, чи могло існувати життя на Марсі або інших об'єктах Сонячної системи.

Методи. На основі інформації з відкритої бази даних (<https://exoplanet.eu>), за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення на мові програмування Python, здійснено вибірку з усіх підтверджених екзопланет, а також з усіх кандидатів в екзопланети.

Результати. Проведено аналіз мінімальних умов для появи життя, його існування і подальшого розвитку до складних і навіть до розумних форм. Установлено, що для можливості існування життя центральна зоря має належати спектральному класу G, K або M, а сама екзопланета повинна відповідати таким умовам: $M < 5M_{\oplus}$; $\rho > 3000 \text{ кг/м}^3$; $R < 2,05R_{\oplus}$; $\varepsilon < 0,21$; $a \in (0,05 \text{ а. о.}, 1,5 \text{ а. о.})$; $T < 500 \text{ K}$.

Висновки. В результаті селекції нами відібрано 5 екзопланет. Указані екзопланети заслуговують на детальніше вивчення за допомогою сучасних телескопів і нових космічних місії (JWST та ін.) для аналізу їхніх атмосфер.

Ключові слова: екзопланети, елементи орбіти, зона життя, Python, планети земного типу.

Вступ

Ще з моменту доведення помилковості геоцентричної системи світу постало питання про існування інших земель, на яких можуть жити інші істоти. Першим, хто припустив можливість існування планет поза Сонячною системою, був Джордано Бруно у XVI ст. Початок "телескопічної ери" все ще не дозволяв безпосередньо виявляти екзопланети – об'єкти досліджень були занадто малими і занадто далеко, і відбите від них світло було у мільйони разів слабше за світло їхніх центральних зір. Революційними стали дослідження англійського науковця-дослідника Ісаака Ньютона щодо світлового спектра у XVII ст., які лягли в основу перших телескопів-рефракторів, а також методу пошуку екзопланет, що ґрунтується на доплерівському зміщенні світла, яке ми спостерігаємо від центральної зорі. Проте відкриття першої екзопланети, яке здійснили польський і канадський астрономи Александер Вольцан і Дейл Фрейл, підтверджено тільки 1992 р. Нині існує багато способів виявлення екзопланет: транзитний метод (проходження екзопланети по диску центральної зорі), доплерівський зсув (за червоним зміщенням), гравітаційне мікролінзування (відхилення світла, що проходить біля масивних тіл) (Barnes, Meadows, & Evans, 2015; Новосядлий, 2016). Екзопланети в зоні життя є особливо цінними об'єктами для досліджень, оскільки дають детальніше розуміння про умови виникнення життя, і водночас розуміння, чи могло існувати життя на Марсі або інших об'єктах Сонячної системи. Із запуском James Webb Space Telescope (JWST) темпи і глибина досліджень ще більше зростають. Тому необхідними стали програмні комплекси, які будуть здатні автоматично обробляти нові результати спостережень і визначати найцінніші об'єкти для подальших досліджень (Barnes, Meadows, & Evans, 2015; Новосядлий, 2016).

Методи

Метою нашої статті є аналіз необхідних базових умов для зародження та розвитку життя земного типу на екзопланетах, розроблено відповідні параметри для відбору зір та екзопланет.

Огляд літератури та принципи відбору зорі й екзопланет. Кількість відкритих екзопланет швидко зростає останнім часом. У зв'язку із цим нині немає стандартизованих принципів аналізу придатних до життя екзопланет. Є лише поодинокі праці з вказівкою на окремі екзопланети, як оптимально придатні до життя (Habitable Zone Gallery, 2023. <http://www.hzgallery.org/>). Тому прийнято рішення визначати параметри екзопланет самостійно.

Перш за все необхідно визначитися з параметрами центральної зорі кожної відкритої екзосистеми, оскільки для життя земного типу це має вирішальне значення.

Спектральний клас і металічність – два найважливіші параметри зорі. Тривалість життя зір спектрального класу O, B, A, F занадто мала для зародження життя або для його довготривалої еволюції до складніших форм. Також слід врахувати, що такі зорі занадто гарячі й часто нестабільні за світністю. Тому обмежимося зорями спектральних класів G, K та M. Для розвитку екзопланет також має значення покоління зорі, адже це впливає на багатство металів у складі екзопланет: зорі першого або другого покоління занадто бідні на важкі елементи, щоб у їхніх системах могли сформуватись планети земного типу, тому нам потрібно обирати такі, що мають металічність, близьку до сонячної (третє або четверте покоління зір):

$$[Fe/H] \sim 0, \text{ якщо вважати } [Fe/H] = \lg \left(\frac{N_{Fe \text{ star}} / N_{H \text{ star}}}{N_{Fe \odot} / N_{H \odot}} \right).$$

Значення металічності центральної зорі системи ми перевіряли вручну для кожної відібраної за іншими параметрами екзопланети (Exoplanets Sheet; Habitable Zones in Multiple Star Systems; NASA exoplanet archive).

Виконавши аналіз щодо мінімальних вимог до зорі, необхідно розглянути параметри екзопланети. Для початку визначимося з масою екзопланети. Оскільки зі збільшенням маси, гравітація планети теж збільшуватиметься, то у разі занадто великої маси на планеті буде важко сформуватись і еволюціонувати достатньо складним формам життя. Тож ми взяли верхню межу маси екзопланети у $5M_{\oplus}$.

Маса та розміри екзопланети визначають її густину. Екзопланеті, як будь-якій планеті земного типу, має бути притаманна достатньо велика густина, що складатиме понад 3000 кг/м³. Беручи цю інформацію та обмеження щодо маси екзопланети, ми можемо оцінити її радіус. Маємо рівняння

$$\frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{M_{\oplus}}{\rho} \Rightarrow R = \sqrt[3]{\frac{3M_{\oplus}}{4\pi\rho}}$$

Вважаємо, що екзопланета має сферичну форму. Радіус екзопланети рахуватимемо у радіусах Землі. Маючи мінімальне значення густини і максимальне значення маси, можемо знайти максимальний радіус екзопланети:

$$R_{\max} = 2.05R_{\oplus}$$

Ексцентриситет орбіти визначає коливання температур на екзопланеті, що також має суттєве значення. Для приблизного розрахунку скористаємось тими міркуваннями, що у Сонячній системі життя можливе між орбітою Землі та Марса (зона рідкої води), та розрахуємо ексцентриситет такої еліптичної орбіти, перигелій якої лежатиме на орбіті Землі (взятої як коло), а афелій – на коловій орбіті Марса:

$$\varepsilon = \frac{c}{a} = \frac{a_{\text{Марс}} - a_{\oplus}}{a_{\text{Марс}} + a_{\oplus}} \approx 0.21,$$

оскільки орбіта екзопланети має бути максимально близькою до колової, то ексцентриситет її орбіти має бути < 0,21.

Велика піввісь визначає те, скільки світла від своєї зорі отримуватиме екзопланета. Установимо межі для великої піввісі (*a*): 0,05 а. о. < *a* < 1,5 а. о. Вибрані межі випливають з можливості існування придатної до життя екзопланети земного типу із центральною зорею пізніх спектральних класів (К, М), які мають значно нижчу за Сонце температуру фотосфери.

Температура поверхні. Відповідно ми додаємо обмеження для температури поверхні екзопланети, адже не кожна екзопланета із задовільними параметрами, які зазначені вище, придатна для життя. Визначення середньої температури поверхні екзопланети з достатньою точністю є дуже складною, а інколи й технічно нерозв'язуваною задачею. Тому візьмемо верхню межу температури на рівні *T* < 500 К (з поправкою на можливу похибку оцінювання). Оцінку температури поверхні ми також братимемо з відкритого каталогу екзопланет (Catalogue of Exoplanets, 2023. <http://exoplanet.eu/>; Habitable Zone Gallery, 2023. <http://www.hzgallery.org/>).

Результати

Підсумки. Зоря має належати до спектрального класу G, K або M і мати значення металічності близьке до 0 (відносно Сонця). Параметри екзопланети: *M* < 5*M*_⊕; *ρ* > 3000 кг/м³; *R* < 2,05*R*_⊕; *ε* < 0,21; *a* ∈ (0,05 а. о., 1,5 а. о.); *T* < 500 К.

Особливості роботи програмного забезпечення. Для селекції екзопланет ми використали дані з відкритого каталогу (<http://exoplanet.eu/>), рис. 1. Для самого відбору екзопланет напишемо код мовою програмування Python. Для початку ми проаналізували особливості роботи сайту, а також структури запитів до бази даних (Catalogue of Exoplanets, 2023; NASA exoplanet archive, 2023).

Planet	Mass (M _{Jup})	Radius (R _{Jup})	Period (day)	a (AU)	e	i (deg)	Ang. dist. (arcsec)	Discovery	Update
RR Cae (AB) b	—	—	5479	5.2	0	—	—	2012	2023-04-22
WASP-39 b	0.28	1.27	4.055259	0.0486	0	87.83	0.000211	2011	2023-04-22
Kepler-64 (AB) b	0.53	0.553	138.506	0.634	0.0539	90	—	2013	2023-04-21
TOI-2095 c	0.0233	0.1187	28.17221	0.137	0.13	89.9	—	2023	2023-04-20
TOI-2095 b	0.0129	0.1115	17.774872	0.101	0.12	89.67	—	2023	2023-04-20
HD 10647 b	—	—	1003	2.03	0.1	—	0.117341	2003	2023-04-17
HD 16417 b	—	—	17.24	0.14	0.2	—	0.00549	2009	2023-04-17
HD 3651B	53	0.8	—	476	—	—	—	2006	2023-04-17
KELT-16 b	2.75	1.415	0.9689951	0.02044	—	—	—	2016	2023-04-17
GJ 3021 b	—	—	133.71	0.49	0.511	—	0.027809	2000	2023-04-17
OGLE-2012-BLG-0950L b	0.11	—	—	2.7	—	—	—	2016	2023-04-17
Kepler-411 b	0.08055	0.214	3.005156	0.0375	0.146	87.4	—	2013	2023-04-17
Kepler-455 b	—	0.62	1322.3	—	—	89.973	—	2015	2023-04-17
TOI-139 b	6.6119	0.2192	11.07085	—	—	89.32	—	2023	2023-04-16

Рис. 1. Головне вікно сайту exoplanet.eu з базою відкритих екзопланет

Як бачимо, деякі з необхідних параметрів екзопланет відсутні, тому такі екзопланети ми переважно відкидатимемо. У разі, якщо ця інформація доповнюватиметься, можна буде ще раз запустити програму, і вона перегляне їх знову. Екзопланети, про які відомі всі параметри, крім температури поверхні, ми занеситимемо у список "запасних" екзопланет, які заслуговують на детальніше вивчення.



Рис. 2. Потрібні нам параметри запиту

Параметри запиту задають у форматі JSON і, відповідно, результат отримують також у ньому. В результатах не надається значення густини екзопланети, тому ми розраховуватимемо середнє її значення за формулою $\rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}$.

Визначимо ті параметри POST-запиту, які нам потрібні (рис. 2):

- а) номер сторінки (вибираємо першу, щоб отримати всі екзопланети, починаючи з найпершої у списку);
- б) відповідно індекс першої екзопланети та кількість екзопланет для представлення на сторінці (у програмі як індекс вкажемо 0, а як кількість – достатньо велике число, наприклад, 999999);
- в, г) інформація про те, у яких одиницях ми отримуватимемо параметри маси та радіуса екзопланети (за замовчуванням ми їх одержуємо в еквіваленті для Юпітера, тому, щоб отримувати ці значення у величинах для Землі, ставимо, відповідно mearth та rearth);
- д) сайт exoplanet.eu дає можливість передивлятися екзопланети, які мають три статуси: "підтверджені", "кандидати" й "інші". Ми перевірятимемо всі ці категорії, отже, для всіх цих статусів ставимо значення True.

```

1 import requests, lxml
2 from bs4 import BeautifulSoup
3 import json
4
5 MEarth = 5.972e24 #kg
6 REarth = 6.371e6 #m
7
8 def rho(M, R):
9     return M*MEarth / (4/3 * (R*REarth)**3)
10
11
12 req = requests.post("http://exoplanet.eu/catalog/json/",
13                     data = {"sEcho": 1, "iDisplayStart": 0, "iDisplayLength": 999999,
14                             "sSearch": "", "iSortCol_0": 9, "sSortDir_0": "desc",
15                             "mass_unit": "mearth", "radius_unit": "rearth", "status_1": True,
16                             "status_2": True, "status_4": True})
17
18 print(req)
19 res = req.content
20
21 data = json.loads(res)
22 out_list = []
23 reserve_list = []
24 print(len(data["aaData"]))
    
```

Рис. 3. Перша частина програми відбору екзопланет

У першій частині програми (рис. 3) імпортуємо всі необхідні бібліотеки, задаємо константи, функцію для розрахунку густини речовини екзопланети. У 12-му рядку надсилаємо запит за посиланням, яке вказано в DevTools у

вкладці Headers, та виводимо код відповіді, у разі <Response 200> – запит було здійснено успішно. У 20-му рядку конвертуємо отримані дані з формату JSON у словники.

```

24 for planet in data["aaData"]:
25     if None in [planet[1], planet[2], planet[4], planet[5]]:
26         continue
27     if planet[1]<5 and planet[2]<2.05 and ro(planet[1], planet[2])>3000 and 1.5>planet[4]>0.05 and planet[5]<0.21:
28         link = BeautifulSoup(planet[0], "lxml")
29         planet_page = BeautifulSoup(requests.get(link.a["href"]).content, "lxml")
30         star_type = planet_page.find("td", id="star_0_stars_spec_type_0").text
31         planet_temperature = planet_page.find("td", id="planet_temp_calculated_0").text
32         if star_type in ["-", ""] or len(planet_temperature)<2:
33             if len(planet_temperature)<2 or float(planet_temperature[:planet_temperature.index(" ")])<500:
34                 reserve_list[0] += 1
35                 reserve_list.append(str(reserve_list[0])+"|"+link.text+"|"+str(planet[1])+"|"+str(planet[2])+"|"+
36                                     str(planet[3])+"|"+str(planet[4])+"|"+str(planet[5])+"|"+planet_temperature)
37             continue
38         if star_type[0].upper() in "GKM" and float(planet_temperature[:planet_temperature.index(" ")])<500:
39             out_list[0] += 1
40             out_list.append(str(out_list[0])+"|"+link.text+"|"+str(planet[1])+"|"+str(planet[2])+"|"+
41                             str(planet[3])+"|"+str(planet[4])+"|"+str(planet[5])+"|"+planet_temperature)
42 with open("answer.txt", "w", encoding="utf-8") as file:
43     out_listTxt = "\n\t".join(out_list[1:])
44     reserve_listTxt = "\n\t".join(reserve_list[1:])
45     file.write(f"<Candidates: {out_list[0]}>\n\t"+out_listTxt+
46              f"\n\n<Reserves: {reserve_list[0]}>\n\t"+reserve_listTxt)

```

Рис. 4. Друга частина програми відбору екзопланет

З 24-го рядка починаємо зчитувати всі надані дані. У 25 рядку перевіряємо, чи є у планети дані про її масу, радіус та ексцентриситет, адже якщо даних немає, то ми не можемо достовірно аналізувати її придатність до життя. Тому такі планети ми просто не братимемо до розрахунку.

У рядку 27 перевіряємо, чи задовольняє екзопланета потрібні параметри, і далі ми отримуємо спектральний клас зорі з температурою екзопланети. Якщо виявляється, що зоря не підходить для достатньо довготривалого існування й еволюції життя, то ми її відкидаємо. За відсутності інформації про спектральний клас зорі або температуру екзопланети, ми додаємо екзопланету в резервний список. У рядку 41 записуємо дані у файл.

В результаті виконання програми, станом на травень 2023 р., ми отримали 5 повноправних кандидатів в екзопланети, на яких можливе життя земного типу (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристики відібраних екзопланет та їхніх орбіт

№	Назва	Маса, M_{\oplus}	Радіус, R_{\oplus}	Орбітальний період, діб	Велика піввісь, а. о.	Ексцентриситет	Температура, К
1	TOI-2095 b	4,10	1,250	17,77487	0,1010	0,120	347 (± 9)
2	TOI-700 d	2,26	1,073	37,42396	0,1633	0,042	295 (± 55)
3	TOI-1452 b	4,82	1,672	11,06201	0,0610	0,0	300 (-70 +30)
4	K2-3 d	2,80	1,510	44,55646	0,2086	0,0	282
5	K2-3 c	2,14	1,850	24,64658	0,1405	0,0	344

Також ми отримали 8 запасних екзопланет, які варті детальніших досліджень (табл. 2).

Таблиця 2

Параметри додатково відібраних екзопланет

№	Назва	Маса, M_{\oplus}	Радіус, R_{\oplus}	Орбітальний період, діб	Велика піввісь, а. о.	Ексцентриситет
1	TOI-700 b	1,290	0,914	9,977219	0,0677	0,075
2	HD 219134 c	3,960	1,415	6,765159	0,0620	0,0
3	HD 23472 c	3,41	1,870	29,79749	0,1646	0,063
4	Kepler-11 b	1,907	1,800	10,30390	0,0910	0,045
5	Kepler-36 b	3,830	1,500	13,86825	0,1153	0,0
6	Kepler-68 c	2,040	0,927	9,605100	0,0906	0,0
7	Kepler-37 b	3,178	0,290	13,36731	0,1003	0,0
8	Kepler-138 b	0,067	0,530	10,31260	0,0746	0,0

Дискусія і висновки

Проведено дослідження щодо можливості існування життя земного типу на екзопланетах, які є підтверджено відкритими або є кандидатами у екзопланети. Проведено аналіз мінімальних умов для появи життя, його існування і подальшого розвитку до складних і навіть до розумних форм. Установлено, що для можливості існування життя, центральна зоря має належати до спектрального класу G, K або M, а сама екзопланета повинна відповідати таким умовам: $M < 5M_{\oplus}$; $\rho > 3000 \text{ kg/m}^3$; $R < 2,05R_{\oplus}$; $\epsilon < 0,21$; $a \in (0,05 \text{ а. о.}, 1,5 \text{ а. о.})$; $T < 500 \text{ K}$.

У результаті селекції нами відібрано 5 екзопланет, на які варто звернути особливу увагу новим космічним місіям (James Webb Space Telescope, TPF, ATLAST, EChO та ін.), які завдяки новій апаратурі, потужним телескопам і спектрографам зможуть отримувати більше інформації про ці об'єкти, наприклад, інформацію про склад атмосфери.

Внесок авторів: Василь Пономаренко – визначення оптимальних параметрів екзопланет, які задовольняли б мінімальні умови для існування на них життя земного типу. Аналіз роботи розробленого програмного забезпечення, формування висновків. Написання й оформлення тексту статті. Артем Іванов – участь у визначенні оптимальних параметрів екзопланет, створення програмного забезпечення для аналізу бази відкритих екзопланет, участь у написанні тексту.

Список використаних джерел

- Новосядлий, Б. (2016). Пошуки ознак життя поза Землю. Стан проблеми. <https://astro.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2016/10/Ekzozhyttia.pdf>
 Barnes, R., Meadows, V. S., & Evans, N. (2015) Comparative habitability of transiting exoplanets. <https://arxiv.org/pdf/1509.08922v1.pdf?fbclid=IwAR0q7/hHOChVky3nXzXRUV0Fs0KQPp3lkt4QZJALAUtgiBswP8NfamkP93Y>
 Catalog of discovered exoplanets (2023). [http://exoplanet.eu/catalog/Exoplanets Sheet \(Charlie Shread\) \(2023\)](http://exoplanet.eu/catalog/Exoplanets_Sheet_(Charlie_Shread)_2023). https://docs.google.com/spreadsheets/d/1cWYJl6fkf_NDhdMPLKfN0FQuZAj1-HFXCb9Xu7B71E/edit#gid=25931617
 Habitable Zone Gallery (2023). <http://www.hzgallery.org/>
 NASA exoplanet archive. https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/TblView/nph-tblView?app=ExoTbls&config=DI_STARS_EXEP.

References

- Barnes, R., Meadows, V. S., & Evans, N. (2015). Comparative habitability of transiting exoplanets. <https://arxiv.org/pdf/1509.08922v1.pdf?fbclid=IwAR0q7/hHOChVky3nXzXRUV0Fs0KQPp3lkt4QZJALAUtgiBswP8NfamkP93Y>
 Catalog of discovered exoplanets (2023). <http://exoplanet.eu/catalog/>
 Exoplanets Sheet (Charlie Shread) (2023). https://docs.google.com/spreadsheets/d/1cWYJl6fkf_NDhdMPLKfN0FQuZAj1-HFXCb9Xu7B71E/edit#gid=25931617
 Habitable Zone Gallery (2023). <http://www.hzgallery.org/>
 NASA exoplanet archive. https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/TblView/nph-tblView?app=ExoTbls&config=DI_STARS_EXEP
 Novosyadlyj, B. (2016). The search for signs of life outside the Earth. State of the problem [in Ukrainian]. <https://astro.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2016/10/Ekzozhyttia.pdf2>.

Отримано редакцією журналу / Received: 30.04.23
 Прорецензовано / Revised: 23.05.23
 Схвалено до друку / Accepted: 19.12.23

Vasyl PONOMARENKO, PhD (Phys. & Math.)
 ORCID ID: 0000-0003-3964-7664
 e-mail: vasylyponomarenko@knu.ua
 Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Artem IVANOV, Student
 ORCID ID: 0009-0006-2704-9906
 e-mail: art_iv3@ukr.net
 Zhytomyr Ivan Franko State University, Zhytomyr, Ukraine

ANALYSIS OF THE ARRAY OF DISCOVERED EXOPLANETS ON THE SUBJECT OF THE POSSIBILITY OF THE EXISTENCE OF EARTH-TYPE LIFE

Background. *Exoplanets in the habitable zone are particularly valuable objects for research. They provide a more detailed understanding of the conditions for the emergence of life and with it an understanding of whether life could exist on Mars or other objects in the solar system.*

Methods. *Based on information from the open database <https://exoplanet.eu>, with the help of specially developed software in the Python programming language, a sample was made from all confirmed exoplanets, as well as from all candidates for exoplanets.*

Results. *An analysis of the minimum conditions for the appearance of life, its existence, and further development to complex and even intelligent forms has been carried out. It was established that for life to exist, the central star must belong to the spectral class G, K, or M, and the exoplanet itself must meet the following conditions: $M < 5M_{\oplus}$; $\rho > 3000 \text{ kg/m}^3$; $R < 2,05R_{\oplus}$; $\epsilon < 0,21$; $a \in (0,05 \text{ AU}, 1,5 \text{ AU})$; $T < 500 \text{ K}$.*

Conclusions. *As a result of the selection, we selected 5 exoplanets. Selected exoplanets deserve a more detailed study using modern telescopes and new space missions (JWST and others) to analyze their atmospheres.*

Keywords: *exoplanets, orbital elements, habitable zone, Python, terrestrial planets.*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.