

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.03.053>

УДК 523.4

**А. М. Казанцев**

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка,  
вул. Обсерваторна 3, м. Київ, Україна, 04053  
e-mail: [ankaz51@ukr.net](mailto:ankaz51@ukr.net)

### **Можливе джерело та механізм походження гарячої складової у поясі Койпера**

*Запропоновано механізм походження тіл поясу Койпера (ПК), відмінний від дотепер відомих механізмів. Проаналізовано розподіли елементів орбіт більшості тіл «гарячої» складової у поясі Койпера. Форма розподілів вказує на те, що всі ці тіла могли виникнути в результаті руйнування одного масивного тіла (планети поясу Койпера, ППК). Швидкості розльоту уламків були зумовлені переважно лінійними швидкостями частин ППК на різних глибинах та широтах. Максимальна швидкість розльоту відповідала лінійній швидкості на поверхні ППК в районі екватора і могла становити 2.4 км/с. Розмір КВР міг бути як дещо меншим, так і більшим за розмір Землі. Період осевого обертання — біля 4 год. Вісь обертання ППК була нахилена під невеликим кутом до площини екліптики, і у момент руйнування була напрямлена у бік Сонця. Наведений механізм добре узгоджується із сучасними спостережними даними. Ним можна пояснити значну кількість тіл у ПК з супутниками, а також виявлену залежність середньої щільності тіл від розмірів. Згідно із цим механізмом осі обертання утворених уламків (насамперед крупних) мають бути нахилені під невеликими кутами до площини екліптики. Осі обертання карликових планет Плутона та Хаумеа нахилені до площини екліптики під кутами 23 та 10 відповідно. Отримання у майбутньому даних про координати полюсів інших крупних тіл ПК можуть стати остаточним підтвердженням запропонованого механізму.*

**Ключові слова:** пояс Койпера, карликові планети.

## ВСТУП

Відкриття комплексу малих тіл за орбітою Нептуна (поясу Койпера) викликало значні зміни в структурі орбіт тіл Сонячної системи та поглядах на їхнє походження. Зокрема Плутон втратив свій статус планети. Разом з тим було введено новий тип тіл — карликові планети. Зокрема у поясі Койпера на сьогодні чотири тіла віднесені до карликових планет. Сама структура ПК досить складна. Розрізняють кілька складових у ПК.

По перше, це класичний пояс Койпера (КПК). До нього належать тіла, що рухаються по орбітах між двома резонансами з Нептуном: 3:2 ( $a = 39.3$  а. о.) та 2:1 ( $a = 47.8$  а. о.). КПК в свою чергу розділяється на дві складові: «холодна» та «гаряча». До холодної належать тіла на орбітах з нахилами  $i < 4^\circ \dots 5^\circ$  та ексцентриситетами  $e < 0.1$ . Гарячу складову утворюють тіла з більшими нахилами та ексцентриситетами орбіт. Тіла на орбітах в кількох резонансах з Нептуном часто виділяють в окрему популяцію. Тіла в резонансі 3:2 називають «плутончики», оскільки серед них є й Плутон.

Дуже цікаву популяцію ПК становить розсіяний диск (РД). Зазвичай до РД відносять тіла на орбітах з перигелійними відстанями від 30 до 40 а. о. Тобто, такі тіла не можуть зазнавати тісних зближень з Нептуном. За сучасними даними великі півосі орбіт РД простягаються до понад 500 а. о.

Також в окрему групу виділяють т. з. додані об'єкти. Перигелійні відстані їхніх орбіт помітно перевищують 40 а. о.

Походження ПК з часу його відкриття викликало багато запитань. На сьогодні найбільш популярним є механізм походження практично всіх тіл ПК в рамках моделі міграції планет-гігантів (модель Ніцци). Певне узагальнення та розвиток цієї моделі представлено в роботі [11]. За моделлю Ніцци практично вся сучасна популяція ПК утворилася значно ближче до Сонця і була переміщена на теперішні орбіти збуреннями планет-гігантів, переважно Нептуна. А всі планети-гіганти також здійснювали міграцію, змінюючи елементи своїх орбіт. У рамках моделі Ніцци лише для тіл на орбітах з  $q > 40$  а. о. (додані) запропоновано інше пояснення. Одним з механізмів їхнього походження допускається збурення зір при їхньому близькому проходженні біля Сонячної системи [13].

Модель Ніцци походження тіл ПК, як правило, в цілому не викликає принципових заперечень інших дослідників. Є, щоправда, певні уточнення стосовно деяких типів населення ПК. Так, в роботі [12] вказано на можливість існування диску планетозималей на відстані до 50 а. о. і з нахилами до  $20^\circ$  ще до початку міграції планет.

Стосовно походження доданих тіл ПК, крім збурення від близьких зір, розглядається можливість їхнього входження з внутрішньої хмари Оорта [3, 4].

Нижче у нашій роботі пропонується принципово інший механізм утворення як розсіяного диску, так і гарячої популяції взагалі, включаючи плутончики та тіла в інших резонасах. Не розглядається походження лише холодної складової. Згідно із [2] холодна популяція має походження, відмінне від походження інших тіл ПК.

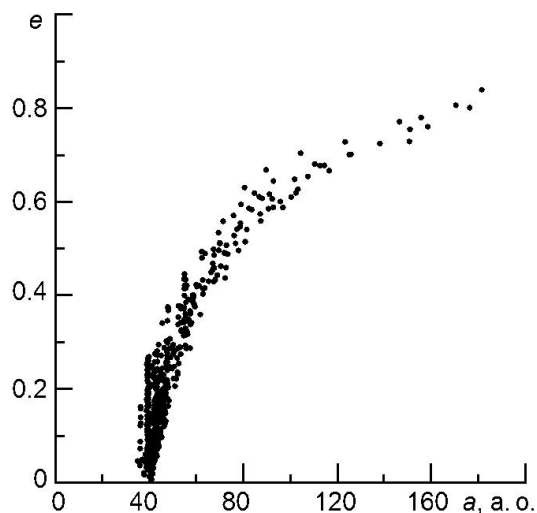
У цій роботі не наводиться ніякого аналізу всіх попередніх механізмів походження тіл ПК. Тут, крім запропонованого нового механізму, наведено досить чіткої критерій вирішення питання стосовно його реальності. При цьому вже протягом кількох наступних років можуть бути отримані спостережні дані, які визначать, який із механізмів походження тіл ПК є реальним. Що стосується наявних на сьогодні спостережних даних, то запропонована тут модель досить добре узгоджується з ними.

### РОЗСІЯНИЙ ДИСК ТА ЙОГО СТРУКТУРА

Зазвичай до РД відносять тіла на орбітах з перигелійними відстанями  $q$  від 30 до 40 а. о. При цьому тіла в резонансі 3:2 («плутончики») не відносять до РД. На наш погляд, є певні підстави вважати, що тіла класичного РД та «плутончики», як і тіла в інших резонасах з Нептуном, мають спільне походження. Тому для подальшого аналізу були відібрані орбіти з  $a > 35$  а. о.,  $29 < q < 41$  а. о. та нахилами  $i > 4^\circ$ . Орбіти з малими нахилами не включені, оскільки ця так звана «холодна» популяція може мати окреме походження [2].

З каталогу Міжнародного центру малих планет МРС на 21 січня 2022 р. було відібрано орбіти нумерованих тіл в зазначених діапазонах. Загальна кількість — 542. Розподіл відібраних орбіт в координатах «велика піввісь  $a$  — ексцентриситет  $e$ » показано на рис. 1. Для більш детальної картини показано розподіл лише для значень  $a < 200$  а. о., хоча максимальні значення  $a$  сягають понад 500 а. о. Можна

Рис. 1. Розподіл реальних орбіт тіл ПК в координатах  $a - e$



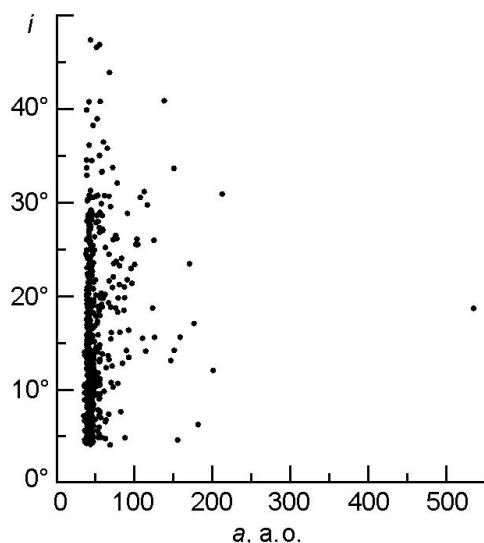


Рис. 2. Розподіл реальних орбіт тіл ПК в координатах  $a - i$

бачити підвищену концентрацію орбіт при певних значеннях  $a$  у відносно широкому діапазоні значень  $e$ . Це зони резонансів з Нептуном: 3:2 ( $a = 39.3$  а. о.), 2:1 ( $a = 47.8$  а. о.) та 5:2 ( $a = 55.4$  а. о.). Всі чотири карликові планети з ПК (Плутон, Хаумеа, Еріда та Макемаке) попали в дану вибірку.

Розподіл орбіт РД в координатах «велика піввісь  $a$  — кут  $i$  нахилу до екліптики» показано на рис. 2. Тут вже використано весь діапазон великих півосей. Добре видно, що розкид значень  $i$  зменшується зі збільшенням  $a$ . Мала кількість орбіт з  $a > 200$  а. о., напевне, зумовлена спостережною селекцією.

Було виконано числові розрахунки еволюції відібраних орбіт на інтервали в кілька мільйонів років. Метод та програма розрахунків описані в роботі [7]. Розрахунки показали, що загальний вигляд розподілів  $a - e$  та  $a - i$  не змінюється з часом. Лише в зонах резонансів з Нептуном утворюються ширші діапазони ексцентриситетів орбіт, як це й має бути.

Вигляд даних розподілів дає підстави зробити припущення, що всі ці тіла могли утворитися в результаті руйнування одного крупного тіла на орбіті з відносно невеликим кутом нахилу до екліптики. Саме такі розподіли орбіт уламків мають утворюватися при розльоті з різними швидкостями та в різних напрямках.

Автор добре усвідомлює, наскільки дане припущення не узгоджується з сучасними поглядами на походження цих тіл. Однак слід зауважити, що таке припущення безпосередньо не суперечить спостережним даним. Крім того, далі буде показано, що крім розглянутих розподілів, є інші спостережні дані, які вказують на можливість реальності зробленого припущення. А поки що варто детальніше проаналізувати сам процес утворення тіл ПК при руйнуванні одного крупного тіла, яке умовно можна назвати планета поясу Койпера (ППК).

## МОДЕЛЮВАННЯ ВИЛЬОТУ УЛАМКІВ ППК

**а) Попередня оцінка елементів орбіти ППК**

Велику піввісь  $a_p$  та ексцентриситет  $e_p$  орбіти ППК можна оцінити за розподілом  $a - e$ . Імовірні елементи орбіти ППК можуть бути в зоні з максимальною концентрацією орбіт тіл РД. В даному випадку краще використати повну вибірку, включно з орбітами нумерованих тіл ПК. Відповідний розподіл  $a - e$  такої вибірки з каталогу MPC на 21 січня 2022 р. показано на рис. 3. Для більш детальної картини діапазону значень  $a$  та  $e$  на рис. 3 обмежено. Загальна кількість орбіт на рис. 3 перевищує 1600. Можна бачити, що максимальна концентрація орбіт міститься в зоні  $a = 42.5 \dots 44.5$  а. о. та  $e = 0.02 \dots 0.08$ . Тут видно кілька окремих невеликих скупчень. Пошук кращого набору елементів  $a_p$  та  $e_p$  виконувався у вказаних інтервалах методом підбору та відповідних розрахунків.

Можливий кут нахилу  $i_p$  орбіти ППК можна оцінити за розподілом  $a - i$  (рис. 2). При руйнуванні ППК окремі уламки виходять на орбіти з елементами  $a_j, e_j, i_j$ . Різниці  $da = a_j - a_p, de = e_j - e_p$  та  $di = i_j - i_p$  залежать не тільки від швидкостей вильоту, а й від напрямків. Максимальні абсолютні значення  $da$  та  $de$  будуть у випадках, коли вектори швидкостей вильоту  $\mathbf{v}_j$  збігатимуться з вектором геліоцентричної швидкості ППК чи будуть йому протилежні. Максимальні значення  $di$  будуть відповідати напрямкам векторів  $\mathbf{v}_j$ , орієнтованим під максимальними кутами до площини екліптики. При невеликих значеннях  $i_p$  максимальні значення  $di$  будуть при мінімальних значеннях  $da$  та  $de$ . І навпаки, максимальні значення  $da$  та  $de$  мають відповідати мінімальним значенням  $di$ . Тобто, кут нахилу орбіти ППК має бути близьким до кутів нахилу орбіт тіл РД з максимальними значеннями  $a$ .

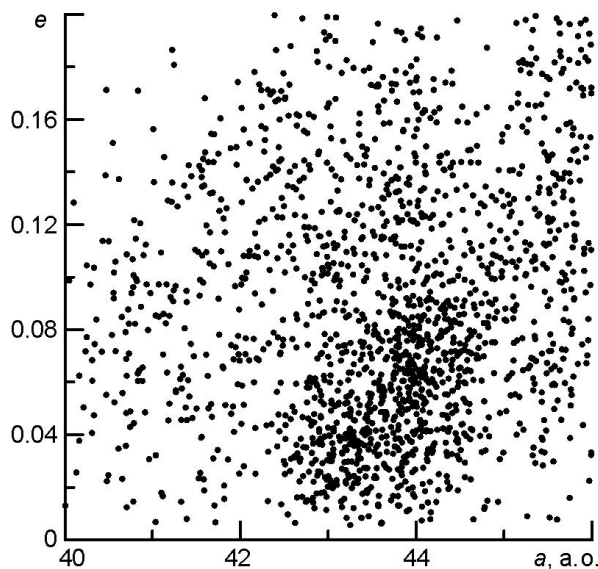


Рис. 3. Розподіл орбіт тіл РД в зоні їхньої максимальної концентрації

Серед отриманої вибірки тіло 523622 має максимальну велику піввісь орбіти (534 а. о.) з кутом нахилу  $18.6^\circ$ . Однак невідомо, чи дане значення  $a$  є максимальним серед всіх наявних орбіт РД. По перше, серед нумерованих тіл РД є орбіти і з більшими значеннями  $a$ , але ці орбіти можуть бути неточними. По друге, зрозуміло, що багато тіл на орбітах з великими  $a$  ще просто не відкриті. Враховуючи вигляд розподілу  $a - i$ , можна лише припустити, що величина  $i_p$  має не досить помітно відрізнитися від  $19^\circ$ . Пошук точнішого кута нахилу та інших кутових елементів орбіти ППК, як і елементів  $a_p$  та  $e_p$ , також виконувався методом підбору.

### **б) Розрахунки орбіт уламків та точніших значень елементів орбіти ППК**

Було виконано розрахунки елементів орбіти уламків, що вилітають з одного тіла (ППК) з різними швидкостями та в різних напрямках. На початку приймалися якісь значення елементів орбіти ППК  $a_p$ ,  $e_p$ ,  $i_p$ ,  $\varpi_p$ ,  $M_p$ . За цими елементами розраховувалися компоненти геліоцентричної швидкості ППК  $v^h$  у прямокутній геліоцентричній екліптичній системі координат:  $v_x^h$ ,  $v_y^h$ ,  $v_z^h$ . При цьому використовувалися стандартні формули переходу від елементів орбіти до координат та швидкостей. За напрямком та швидкістю вильоту окремого уламка  $dv$  відносно ППК розраховувалися компоненти цієї швидкості в тій же системі координат:  $dv_x$ ,  $dv_y$ ,  $dv_z$ . Потім визначалися компоненти геліоцентричної швидкості уламка:  $v_{bx}^h = v_x^h + dv_x$ ,  $v_{by}^h = v_y^h + dv_y$ ,  $v_{bz}^h = v_z^h + dv_z$ . За цими значеннями й визначалася орбіта уламка. При цьому вважалося, що процес вильоту відбувається миттєво, і прямокутні геліоцентричні координати уламка збігаються з відповідними координатами ППК.

Розрахунки показали, що для виходу уламка на орбіту з  $a = 534$  а.о. швидкість вильоту з ППК має бути не меншою за 2.0 км/с. Зрозуміло, що така швидкість не може виникнути за рахунок енергії удару зовнішнього тіла чи яких-небудь процесів всередині ППК. Такі швидкості вильоту можуть виникати при руйнуванні тіла з великою лінійною швидкістю обертання на його поверхні. Для прикладу можна навести Уран, в якого лінійна швидкість на екваторі становить 4.4 км/с.

Причина руйнування ППК може бути різною. Однією з них може бути зіткнення з іншим тілом. При не досить монолітній структурі ППК ударна хвиля, що виникне при такому зіткненні, може викликати руйнування зв'язків середині ППК. Лінійні швидкості обертання навколо осі приведуть до розльоту уламків.

Розліт уламків при руйнуванні ППК з великою лінійною швидкістю на поверхні накладає додаткові обмеження на напрямки вильоту. У цьому випадку уламки будуть вилітати не у всі напрямки, а лише в одній площині — площині екватора ППК. Причому дана площина мала бути нахилена під великим кутом до площини екліптики (майже перпендикулярно). А вектор орбітальної швидкості ППК мав лежати поблизу площини її екватора. Тобто, вісь обертання ППК мала бути

нахилена під невеликим кутом до площини екліптики, і у момент руйнування мала бути напрямленою у бік Сонця. Саме при такій орієнтації осі могли виникнути великі діапазони елементів орбіт  $a$ ,  $e$  та  $i$  уламків. Вектори швидкостей розльоту різних частин ППК будуть орієнтовані під різними кутами як до площини екліптики, так і до вектора орбітальної швидкості ППК.

Якби вісь обертання ППК у момент руйнування була орієнтована близько до перпендикуляра до площини екліптики, то діапазон кутів нахилу орбіт фрагментів був би незначним. Водночас діапазон великих півосей орбіт та ексцентриситетів був би значним. Цікаво, що саме такі розподіли характерні для елементів орбіт холодного компонента ПК. Однак в даному дослідженні більш детальний аналіз цих орбіт не проводився.

На наступному етапі було виконано розрахунки орбіт уламків ППК при розльоті з різними швидкостями  $dv$  та з різними напрямками, але в одній площині. У модельних розрахунках можна вважати, що вильоти уламків з різних широт ППК також відбуваються у площині екватора планети. При такому моделюванні було використано діапазон значень  $dv$  від 0.4 км/с до 3.0 км/с. Елементи орбіти ППК  $a_p$ ,  $e_p$ ,  $i_p$  вибирались в околі отриманих вище попередніх значень цих елементів. Інші кутові елементи —  $\alpha_p$ ,  $\beta_p$ ,  $M_p$  — обиралися без попередніх оцінок методом підбору, починаючи від нульових значень.

Для зручності розрахунків було прийнято, що вісь обертання ППК лежить у площині екліптики. Напрямок вильоту окремого уламка задавався двома кутами:  $\alpha_x$  та  $\alpha_z$ . Кут  $\alpha_z$  — кут між вектором  $dv$  та площиною екліптики,  $\alpha_x$  — кут між проекцією вектора  $dv$  на площину екліптики та віссю  $OX$ , напрямленою в точку весняного рівнодення. Кут  $\alpha_x$  відраховувався від осі  $OX$  проти годинникової стрілки і був однаковим для всіх значень  $dv$  та  $\alpha_z$ . Набір кутів  $\alpha_z$  обирався від 0 до 350 з інтервалом 10 для кожного значення  $dv$ .

Для окремого розльоту кількість модельних уламків становила приблизно 300. Обчислювались новоутворені орбіти, за якими будувались розподіли  $a_j - e_j$  та  $a_j - i_j$ . Такі модельні розподіли порівнювались з розподілами реальних тіл ПК (рис. 1, 2). При невідповідності модельних і реальних розподілів змінювались елементи орбіти ППК і виконувався наступний модельний розліт.

Достатньо гарну відповідність між модельними та реальними розподілами  $a - e$  та  $a - i$  було отримано для такого набору елементів орбіти ППК:  $a_p = 43.5$  а. о.,  $e_p = 0.06$ ,  $i_p = 16^\circ$ ,  $\alpha_p = 1^\circ$ ,  $\beta_p = 15^\circ$ ,  $M_p = 9^\circ$ . При цьому кут  $\alpha_x$  був рівним  $355^\circ$ . Це значення  $\alpha_x$  відповідає діапазону  $\cos \alpha_x > 0$ . Отримані розподіли  $a_j - e_j$  та  $a_j - i_j$  наведено на рис. 4 та 5. В цьому наборі орбіт максимальне значення  $a_j = 540$  а. о. отримане при швидкості вильоту 2.4 км/с.

В цьому варіанті великі півосі орбіт уламків зменшувалися до 32 а. о., а перигелійні відстані — до 15 а. о. Такі орбіти характерні для Кентаврів. Але на рис. 4 та 5 такі орбіти не показані. Для більш

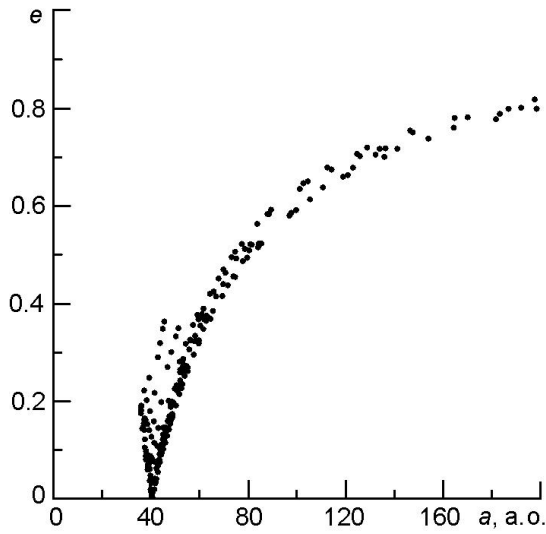


Рис. 4. Розподіл модельних орбіт тіл ПК в координатах  $a - e$

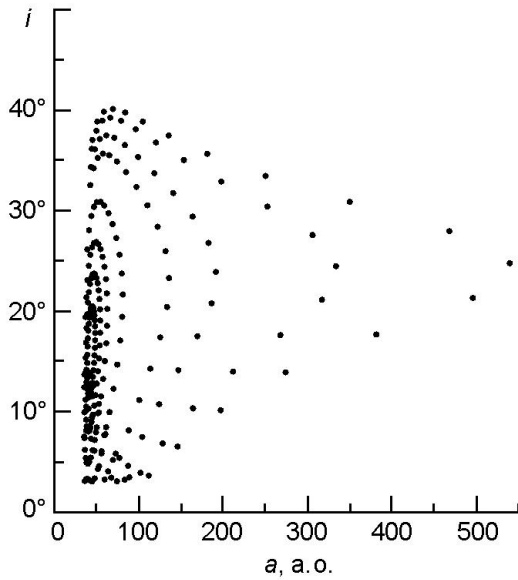


Рис. 5. Розподіл модельних орбіт тіл ПК в координатах  $a - i$

об'єктивного порівняння модельних орбіт з реальними діапазони величин  $a_j$  та  $q_j$  обиралися відповідно до діапазонів реальних орбіт ( $a > 35$  а. о.,  $29 < q < 41$  а. о.).

У процесі моделювання вильотів уламків з ППК було використано лише незначну кількість можливих варіантів. Тому отримані елементи орбіти ППК не є єдино можливими, при яких буде задовільна відповідність між модельними та реальними розподілами  $a - e$  та  $a - i$ . Головне, що руйнуванням одного великого тіла можна досить добре пояснити розподіли елементів орбіт реальних тіл ПК.

#### МОЖЛИВІ ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ППК

Достатньо точні характеристики ППК навести складно. Масу можна було б визначити за сумарною масою утворених тіл ПК. Однак далеко



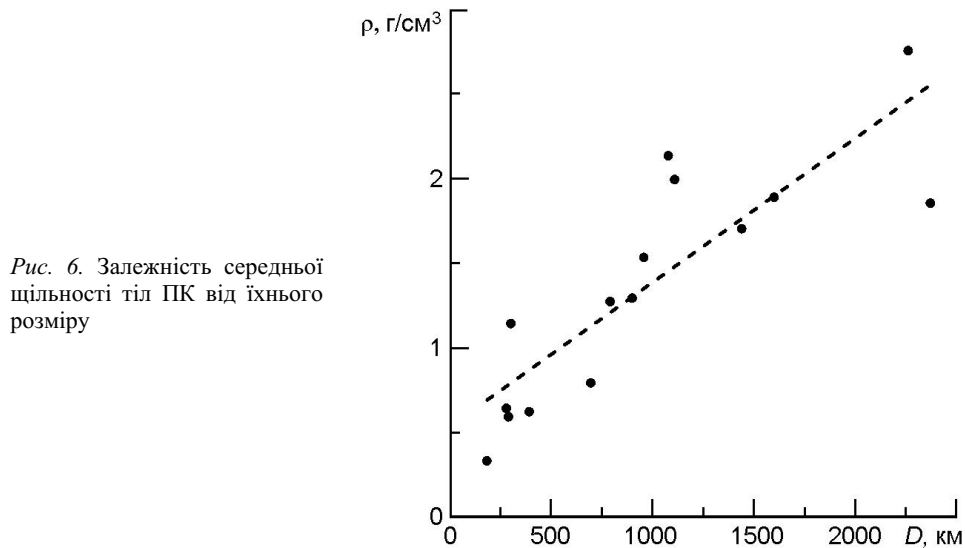


Рис. 6. Залежність середньої щільності тіл ПК від їхнього розміру

не всі тіла ще відкриті, і не всі маси відкритих тіл ще оцінено.

В рамках даної моделі для визначення маси та розміру ППК можна застосувати інший підхід. Як було показано вище, лінійна швидкість на екваторі ППК мала бути не меншою за 2.4 км/с. З урахуванням закону збереження моменту імпульсу кожен уламок планети буде обертатися навколо власної осі, напрямком якої має не сильно відрізнятися від напрямку осі ППК. Але періоди осьового обертання можуть бути різними. Деякі уламки можуть мати періоди осьового обертання, які збігатимуться з періодом обертання самої планети. На сьогодні за даними спостережень мінімальні періоди обертання крупних тіл ПК близькі до 4 год. Зокрема, такий період обертання має і карликова планета Хаумеа [10]. Якщо вважати, що період осьового обертання ППК дорівнював 4 год, то її радіус мав бути біля 5500 км. При такому розмірі ППК лінійна швидкість на її екваторі буде 2.4 км/с. Зрозуміло, що при більшому періоді обертання ППК її радіус також мав бути більшим. При цьому зберігається лінійний зв'язок між періодом обертання та розміром ППК. Напевне, наведене значення радіуса ППК (5500 км) близьке до мінімального.

Дані про середні щільності тіл ПК разом з діапазонами можливих похибок можна знайти в роботах [5, 9, 16]. Деякі значення щільності мають похибки понад 100 %. У табл. 1 наведено діаметри та середні щільності тіл гарячої складової ПК, для яких діапазони похибок

Таблиця 1. Розміри та середні щільності тіл ПК

D, км	, г/см <sup>3</sup>	D, км	, г/см <sup>3</sup>	D, км	, г/см <sup>3</sup>
185	0.33	697	0.79	1110	1.99
281	0.64	792	1.27	1440	1.70
291	0.59	901	1.29	1600	1.885
303	1.14	958	1.53	2260	2.75
393	0.62	1079	2.13	2370	1.85

менші від 50 %. Тут дані для Хаумеа відповідають оцінкам в роботі [15]. Згідно з даними [9] середня щільність Хаумеа становить  $2.55 \text{ г/см}^3$  з похибкою менш ніж 4 % при еквівалентному діаметрі 1240 км. Такий розмір Хаумеа було отримано в роботі [6]. Пізніше розмір Хаумеа було уточнено, і він виявився помітно більшим [15]. Згідно з даними [15] максимальна середня щільність Хаумеа становить  $1.885 \text{ г/см}^3$  при еквівалентному діаметрі приблизно 1600 км. Дані для Плутона взяті з роботи [14].

З таблиці видно досить широкий діапазон значень  $\rho$ . Крім того, виявляється, що є явна залежність середньої щільності від розмірів тіл (рис. 6). Пунктиром позначено усереднену залежність  $\rho(D)$ . Якою могла бути середня щільність ППК, сказати складно. Якщо припустити, що середня щільність ППК становила  $2.0 \text{ г/см}^3$ , то її маса дорівнювала б 25 % маси Землі. Зрозуміло, що наведені оцінки розміру та маси ППК є досить приблизними.

#### МОДЕЛЬ РУЙНУВАННЯ ППК ТА ОСОБЛИВОСТІ ТІЛ ПК

Подібність модельних розподілів  $a - e$  та  $a - i$  (рис. 4, 5) з розподілами реальних орбіт тіл ПК (рис. 1, 2) показує, що механізм руйнування ППК може нарівні з вже відомими моделями розглядатися як можливий механізм походження РД. З рис. 4 також можна бачити, що певна частина уламків одразу попадає в резонанс 3:2 з Нептуном. Тобто, за такою моделлю тіла РД та плутончики утворилися одночасно.

Окрему увагу слід звернути на значну кількість тіл ПК з супутниками. Деякі тіла мають кілька супутників і навіть кільця, як наприклад Хаумеа. Походження такого типу тіл є окремою проблемою. Дійсно, простим ударом зовнішнього тіла утворення супутника пояснити важко. При відділенні якогось уламка від більшого тіла уламок просто так не перейде на орбіту навколо батьківського тіла. Якщо не буде задіяна ще якась додаткова сила, той уламок або знову впаде на батьківське тіло, або вийде на свою самостійну орбіту навколо Сонця.

При руйнуванні ППК в одному пакеті може вилітати одразу група уламків. Ці уламки були поруч в тілі планети і можуть вилітати тісною групою по майже паралельних траєкторіях з невеликими відносними швидкостями. Подолавши гравітацію залишку планети, група може розлетітися по своїх орбітах. Але якщо в групі є достатньо масивне тіло, воно може захопити менші уламки з цієї групи на орбіту навколо себе. Для утворення таких супутників вже не потрібно якоїсь додаткової сили.

Тепер варто ще раз поглянути на залежність  $\rho(D)$  (рис. 6). Таку залежність також може пояснити модель руйнування ППК. Суттєво різні щільності окремих тіл є ознакою істотної неоднорідності речовини всередині ППК. Зони з меншими щільностями мають порівняно меншу міцність, і ударна хвиля буде руйнувати такі зони на дрібніші

уламки. Тобто, модель руйнування ППК не лише пояснює залежність ( $D$ ). Дана залежність, в свою чергу, свідчить на користь запропонованої моделі.

Важливо, що дану залежність наведено для тіл з розмірами понад 180 км. Логічно припустити, що такі тіла мають первинне походження, а не є продуктами пізніших зіткнень та руйнувань. Для дрібних тіл залежність ( $D$ ) такого типу може й не мати місця.

Тепер варто звернути увагу на ще одну особливість тіл ППК, яку передбачає модель руйнування ППК. Як зазначено раніше, вісь обертання ППК мала бути нахилена під невеликим кутом до площини екліптики. При руйнуванні ППК орієнтації осей обертання окремих уламків не мають сильно відхилятися від орієнтації осі планети. У першу чергу це стосується крупних тіл, зокрема карликових планет. У процесі еволюції екліптичні довготи полюсів тіл можуть зміщуватись за рахунок сонячної прецесії. А екліптичні широти будуть майже незмінними.

На сьогодні серед тіл ППК положення полюсів визначено лише для Плутона та Хаумеа. Екліптична широта полюса Плутона становить  $23^\circ$  [1], а Хаумеа —  $10^\circ$  [8]. Ці дані є вагомим аргументом на користь саме запропонованого механізму утворення тіл ППК.

## ОБГОВОРЕННЯ

Запропонована в цій роботі модель утворення гарячої складової ППК на даний час виглядає нереальною. Адже вона суперечить всім сучасним уявленням та моделям походження тіл ППК, у першу чергу походженню карликових планет. Разом з тим дана модель безпосередньо не суперечить спостережним даним. А якщо проаналізувати викладені тут аргументи на користь цієї моделі, то можна побачити, що якраз спостережні дані свідчать на користь запропонованого механізму.

По-перше, це вид розподілів  $a - e$  та  $a - i$  реальних та модельних орбіт. Явна схожість цих розподілів дає підстави вже не так скептично дивитись на запропоновану модель походження тіл ППК.

По-друге, наявна залежність ( $D$ ). Звичайно, на даний час кількість тіл з більш-менш точно визначеними розмірами та щільністю поки що невелика. Але сам вигляд цієї залежності дає підстави розцінювати її як реальну. Саме таку залежність повинні показувати тіла, утворені при руйнуванні одного великого тіла з неоднорідним розподілом щільності всередині.

Наведене в даній роботі пояснення утворення тіл ППК з супутниками цілком логічно впливає з самого механізму утворення цих тіл.

Особливу увагу варто звернути на орієнтацію осей обертання тіл ППК. Відповідно до запропонованого механізму осі обертання тіл ППК (в першу чергу крупних) мають бути нахилені під відносно невеликими кутами до площини екліптики. Саме так орієнтовані осі Плутона та

Хаумеа. На жаль, даних про орієнтацію осей інших крупних тіл на сьогодні немає. Саме такі дані можуть стати критерієм реальності запропонованого механізму походження тіл ПК.

У принципі розподіли  $a - e$  та  $a - i$  можна пояснити і зближеннями тіл з Нептуном. Хоча при цьому потрібно буде припустити якийсь специфічний просторовий розподіл величин та напрямків відносних швидкостей тіл та Нептуна при зближеннях.

Залежність ( $D$ ) також може бути пояснена якимось іншим механізмом. Наприклад, руйнуванням двох карликових планет з середніми значеннями щільності 0.6 та 1.2 г/см<sup>3</sup>.

Але якщо виявиться, що осі обертання інших крупних тіл ПК (крім Плутона та Хаумеа) нахилені під відносно невеликими кутами до площини екліптики, то запропонований тут механізм отримає беззаперечне підтвердження. Навряд чи можна буде запропонувати іншу прийнятну модель для пояснення такої специфічної орієнтації осей обертання тіл ПК.

Може виникнути зауваження, що коли йде мова про руйнування тіла розміром понад 10000 км, то має бути наведений більш детальний опис механізму такого руйнування. Даний опис мав би враховувати й гравітацію ППК. Тут можна сказати, що при зіткненні ППК з іншим тілом розміром у сотні кілометрів енергії зіткнення буде достатньо для руйнування не досить монолітної й міцної ППК. Одним з тіл, яке б спричинило руйнування ППК, могло бути тіло холодного компонента поясу Койпера, який має інше походження, ніж гарячий компонент [2]. На сьогодні у складі холодного компонента є чимало тіл розмірами в сотні кілометрів і навіть понад 1000 км (№ 50000 Quaoar). Логічно припустити, що у минулому там були ще крупніші тіла, які з часом зруйнувалися.

Але головне, що детальний опис механізму руйнування ППК в даній роботі не є необхідним. Якщо виявиться, що осі обертання всіх (чи майже всіх) крупних тіл гарячої складової поясу Койпера лежать поблизу площини екліптики, то опис механізму руйнування відійде на другий план. Він буде цікавий і потрібний, але вже не для підтвердження наведеної тут моделі походження гарячої складової поясу Койпера.

## ВИСНОВКИ

Маже всі тіла гарячої складової ПК, включаючи карликові планети, могли утворитися при руйнуванні одного крупного тіла — планети поясу Койпера. Запропонований механізм добре узгоджується зі спостережними даними. Ним можна пояснити наявність значної кількості тіл ПК з супутниками та характерну залежність розмірів тіл від щільності.

Дана модель передбачає, що осі обертання крупних тіл ПК мають бути нахилені під відносно невеликими кутами до площини екліпти-

ки. Осі обертання Плутона та Хаумеа мають саме таку орієнтацію. Отримання у майбутньому даних про координати полюсів інших крупних тіл ПК можуть стати остаточним підтвердженням запропонованого механізму.

## REFERENCES

1. Archinal B. A., A'Hearn M. F., Bowell E., Conrad A., Consolmagno G. J., Courtin R., Fukushima T., Hestroffer D., Hilton J. L., Krasinsky G. A., Neumann G., Oberst J., Seidelmann P. K., Stooke P., Tholen D. J., Thomas P. C., Williams I. P. (2011) Report of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2009. *Celest. Mech. Dyn. Astron.* 109. 101—135.
2. Batygin K., Brown M. E., Fraser W. C. (2011) Retention of a primordial cold classical Kuiper belt in an instability-driven model of Solar system formation. *Astrophys. J.* 738. id. A13. 8.
3. Batygin K., Brown M. E. (2021) Injection of inner Oort cloud objects into the distant Kuiper belt by planet Nine. *Astrophys. J. Let.* 910. id. A20. 9.
4. Brasser R., Schwamb M. E. (2015) Re-assessing the formation of the inner Oort cloud in an embedded 1 star cluster - II. Probing the inner edge. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 446. 4. 3788—3796.
5. Brown M. E., Butler B. J. (2017) The density of mid-sized Kuiper belt objects from alma thermal observations. *Astron. J.* 154. id. A19. 7.
6. Fornasier S., Lellouch E., Müller T., Santos-Sanz P., Panuzzo P., Kiss C., Lim T., Mommert M., Bockelée-Morvan D., Vilenius E., Stansberry J., Tozzi G. P., Mottola S., Delsanti A., Crovisier J., Duffard R., Henry F., Lacerda P., Barucci A., Gicquel A. (2013) TNOs are Cool: A survey of the trans-Neptunian region. VIII. Combined Herschel PACS and SPIRE observations of nine bright targets at 70-500 m. *Astron. and Astrophys.* 555. id. A15. 22.
7. Kazantsev A. M. (2002) A simple method for numerical calculations of the evolution of orbits of near-Earth asteroids. *Sol. Sys. Res.* 36. 43—49.
8. Kondratyev B. P., Kornouhov V. S. (2018) Determination of the body of the dwarf planet Haumea from observations of a stellar occultation and photometry data. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 478. 3. 3159—3176.
9. Kovalenko I. D., Doressoundiram A., Lellouch E., Vilenius E., Müller T., Stansberry J. (2017) “TNOs are Cool”: A survey of the trans-Neptunian region XIII. Statistical analysis of multiple trans-Neptunian objects observed with Herschel Space Observatory. *Astron. and Astrophys.* 608. id. A19. 8.
10. Lellouch E., Santos-Sanz P., Lacerda P., Mommert M., Duffard R., Ortiz J. L., Müller T. G., Fornasier S., Stansberry J., Kiss C., Vilenius E., Mueller M., Peixinho N., Moreno R., Groussin O., Delsanti A., Harris A. W. (2013) “TNOs are Cool”: A survey of the trans-Neptunian region IX. Thermal properties of Kuiper belt objects and Centaurs from combined Herschel and Spitzer observations. *Astron. and Astrophys.* 557. id. A60. 19. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322047>
11. Levison H. F., Morbidelli A., Van Laerhoven C., Gomes R., Tsiganis K. (2008) Origin of the structure of the Kuiper belt during a dynamical instability in the orbits of Uranus and Neptune. *Icarus.* 196. 258—273.
12. Lykawka P. S., Mukai T. (2007) Origin of scattered disk resonant TNOs: Evidence for an ancient excited Kuiper belt of 50 AU radius. *Icarus.* 186. 2. 331—341.
13. Morbidelli A., Levison H. F. (2004) Scenarios for the origin of the orbits of the trans-Neptunian objects 2000 CR 105 and 2003 VB12 (Sedna). *Astron. J.* 128. 5. 2564—2576.

14. Nimmo F., Umurhan O., Lisse C. M., Bierson C. J., Lauer T. R., Buie M. W., Throop H. B., Kammer J. A., Roberts J. H., McKinnon W. B., Zangari A. M., Moore J. M., Stern S. A., Young L. A., Weaver H. A., Olkin C. B., Ennico K., the New Horizons GGI team. (2017) Mean radius and shape of Pluto and Charon from New Horizons images. *Icarus*. 287. 12—29.
15. Ortiz J. L., Santos-Sanz P., Sicardy B., Benedetti-Rossi G., Bérard D., Morales N., Duffard R., Braga-Ribas F., Hopp U., Ries C., Nascimbeni V., Marzari F., Granata V., Pribulla T., Komžik R., Hornoch K., Pravec P., Bacci P., Maestripieri M., Nerli L., et al. (2017) The size, shape, density and ring of the dwarf planet Haumea from a stellar occultation. *Nature*. 550. 7675. 219—223.
16. Vilenius E., Kiss C., Müller T., Mommert M., Santos-Sanz P., Pál A., Stansberry J., Mueller M., Peixinho N., Lellouch E., Ortiz J. L., Peixinho N., Thirouin A., Lykawka P. S., Horner J., Duffard R., Fornasier S., Delsanti A. (2014) “TNOs are Cool”: A survey of the trans-Neptunian region X. Analysis of classical Kuiper belt objects from Herschel and Spitzer observations. *Astron. and Astrophys.* 564. id. A35. 18.

*A. M. Kazantsev*

Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv,  
Kyiv, Ukraine

#### A POSSIBLE SOURCE AND MECHANISM FOR THE ORIGIN OF THE HOT COMPONENT IN THE KUIPER BELT

It is proposed a mechanism that is different from the existing ones for the origin of the Kuiper belt (KB) bodies. The distributions of the orbits of the most of bodies of the “hot” component in the KB were analyzed. The shapes of the distributions indicate that all those bodies could have arisen as a result of the destruction of one massive body (the Kuiper belt planet, KBP). The separation velocities of the fragments were determined mainly by the linear velocities of the parts of the KBP at different depths and latitudes. The maximum separation velocity corresponded to the linear velocity on the surface of the KBP near the equator and could be 2.4 km/s. The size of the KBP could be slightly smaller or larger than the size of the Earth. The spin period could be about 4 hours. The spin axis of the KBP was tilted at a little angle to the ecliptic plane and at the moment of the destruction it was directed towards the Sun. This mechanism agrees well with existing observational data. It can explain a noticeable number of bodies in the KB with satellites, as well as the existing dependence of the bulk density of the bodies on the size. According to this mechanism, the spin axes of the fragments (primarily large ones) should be tilted at little angles to the ecliptic plane. The spin axes of the dwarf planets Pluto and Haumea are inclined to the ecliptic plane at angles of 23° and 10° respectively. Obtaining data on the spin pole orientation of other large KB bodies in the future may become the final confirmation of the proposed mechanism.

*Keywords:* Kuiper belt, dwarf planets.

Стаття надійшла до редакції 11.02.2023

Після доопрацювання 11.02.2023

Прийнята до друку 16.02.2023