



УДК 523

Про походження ретроградних супутників планет

К.О. Радченко

Національний авіаційний університет

Ретроградні супутники планет-гігантів — це особливі об'єкти Сонячної системи. На відміну від звичайних супутників, вони обертаються навколо планет в протилежному напрямку по орбітам зі значними кутами нахилу і ексцентриситетом. До цього часу не існує загальноприйнятої концепції їх походження. Дослідження орбітальних параметрів ретроградних супутників планет у процесі еволюції може надати нам відомості про їх утворення після формування планет і прямих супутникових систем. У цій статті проводиться загальний огляд ретроградних супутників за сукупністю їх орбітальних параметрів, розглядаються різноманітні гіпотези їх утворення.

О ПРОИСХОЖДЕНИИ РЕТРОГРАДНЫХ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ, Радченко К.О. — Ретроградные спутники планет-гигантов — это особые объекты Солнечной системы. В отличие от обычных спутников, они вращаются вокруг планет в противоположном направлении по орбитам с большими углами наклона и эксцентриситетом. До сих пор не существует общепринятой концепции их происхождения. Исследование орбитальных параметров ретроградных спутников планет в процессе их эволюции может предоставить нам сведения об их образовании после формирования планет и прямых спутниковых систем. В этой статье проводится общий обзор ретроградных спутников в совокупности их орбитальных параметров, рассматриваются различные гипотезы их образования.

ON THE ORIGIN OF RETROGRADE SATELLITES OF PLANETS, by Radchenko K.O. — The retrograde moons of the giant planets are special objects in the Solar system. Unlike regular satellites they revolve around planets in opposite direction on orbits with large angles of inclination and eccentricity. By this time there is no universally accepted concept of their origin. Studies of orbital parameters of retrograde satellites of planets during their evolution can give us information about their formation after the formation of planets and direct satellite systems. This article is an overview of retrograde satellites on the set of orbital parameters and considered various hypotheses of their formation.

Ключевые слова: небесная механика; ретроградные спутники; образование планет и спутников.

Key words: celestial mechanics; retrograde satellites; formation of planets and satellites.

1. ВСТУП

Ретроградними супутниками планет називають небесні тіла, нахил площини орбіти яких до площини екватора відповідної планети лежить в межах від 90° до 180° . На відміну від супутників з прямим рухом, вони рухаються навколо планети за стрілкою годинника, якщо спостерігати з полюсу планети. Наприкінці ХХ століття у Сонячній системі астрономам було відомо лише 6 таких об'єктів: Пасифе, Синопе, Карме, Ананке у Юпітера, Феба у Сатурна та Тритон у Нептуна.

Проте, починаючи з відкриття у 1997 році Калібана і Сикоракси у Урана, на січень 2012 року вже відомо 93 супутники з ретроградними орбітами, що становить 54% від усіх 172 відомих супутників, які обертаються навколо восьми планет Сонячної системи.

Особливо багато ретроградних супутників було відкрито впродовж 2001–2003 років у Юпітера (41 об'єкт) та протягом 2004–2006 років у Сатурна (20 об'єктів) групами астрономів з Гавайського університету під керівництвом С. Шеппарда, Б. Гледмана та Д. Джуїтта за допомогою наземних телескопів нового покоління. Зазначимо, що тільки 18 ретроградних супутників мають розміри більше 18 км, в той же час діаметр Тритона — ретроградного супутника Нептуна — становить 2706,8 км, що дорівнює 0,55 розміру Меркурія, 0,78 розміру Місяця та 1,17 розміру Плутона.

Оскільки всі 12 відомих на сьогоднішній день ретроградних супутників Урана і Нептуна мають розміри більше 18 км, а ближчі до нас планети-гіганти Юпітер і Сатурн мають 75 ретроградних супутників, які не перевищують 9 км у діаметрі, то, очевидно, в найближчі роки із вдосконаленням параметрів спостережувальної техніки та залученням космічних телескопів слід очікувати відкриття багатьох нових ретроградних супутників біля цих планет. На це вказує і доведення Ф. Мультином [27], Р. Хантером [20], М. Хеноном [17] і Р.А. Чеботарьовим і А.Р. Божковою [3] того, що ретроградні орбіти зовнішніх супутників більш стійкі, ніж орбіти з прямим рухом. Таким чином, вони є довгоживучими об'єктами, і їхнє походження, ймовірно, належить ранній стадії формування Сонячної системи, коли джерел дисипації було багато.

На можливість знаходження нових супутників з ретроградними орбітами вказує і те, що всі відкриті ретроградні супутники мають орбіти, апоцентри яких не перевищують 0,7 радіуса сфери Хілла — простору навколо планети, в якому вона притягує свій супутник сильніше, ніж Сонце.

У світлі останніх відкриттів значної кількості ретроградних супутників неабиякого значення набуло дослідження проблеми їх походження. Зараз існує кілька концепцій походження ретроградних супутників планет.

Загальноприйнятим вважається, що супутники сформувалися внаслідок акреції речовини з навколопланетної туманності. Ця гіпотеза не може бути застосована до ретроградних супутників, тому що вони, як правило, знаходяться на великих відстанях від планети, і малоімовірно, щоб вони утворилися з навколопланетної туманності, їх ексцентрисети достатньо великі, щоб бути результатом просто акреції, і, найголовніше, вони знаходяться на ретроградних орбітах, тому вони не могли утворитися в тому ж акреційному диску [32].

На даний час в космогонії існує 4 основні гіпотези походження ретроградних супутників планет: 1) захоплення; 2) зіткнення; 3) розпаду; 4) пульсації Юпітера з часом, коли радіус його сфери Хілла був більший і він міг захопити віддалені об'єкти на ретроградні орбіти.

Крім того Тритон за своїми фізичними характеристиками випадає з можливих гіпотез походження для малих та середніх ретроградних супутників планет. Тому необхідні подальші чисельні моделювання цих процесів та додаткові спостереження, які залишаються складними, а інколи і неможливими для більшості з цих дрібних тіл.

2. РЕТРОГРАДНІ СУПУТНИКИ ЮПІТЕРА

Серед відомих на сьогоднішній день 67 супутників планети Юпітер лише 15 супутників мають пряме обертання [26].

Переважає більшість ретроградних супутників Юпітера мають діаметр в 2–4 км. Оцінки їх розмірів отримані в припущенні, що їх альbedo (відбивна здатність поверхні) становить 4%. Досить імовірно, що в майбутньому будуть виявлені супутники розмірами в сотні й десятки метрів. Зоряна величина малих супутників складає від 17,2 до 14,8^m. Всі вони обертаються по помітно витягнутих еліптичних орбітах з ексцентриситетом від 0,09 до 0,60. Орбіти мають великий кут нахилу до площини екватора планети

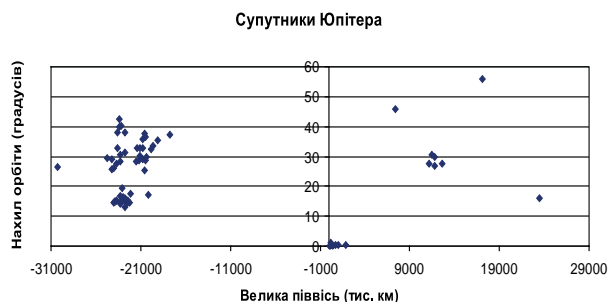


Рис. 1. Супутники Юпітера, представлені за відстанню від планети і нахилом орбіти до площини її екватора

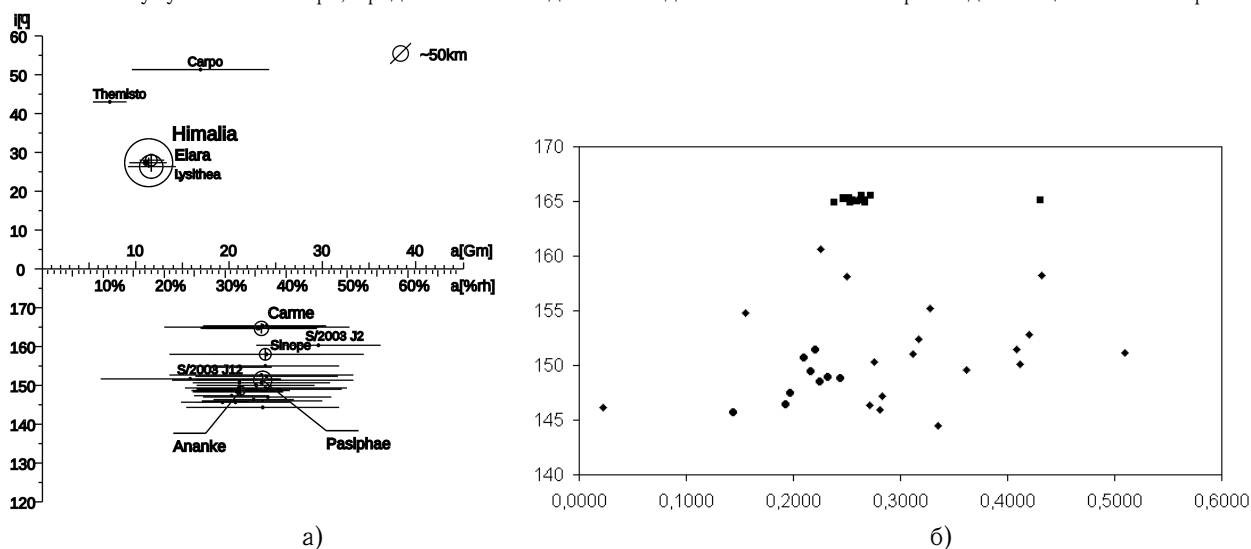


Рис. 2. а) нерегулярні супутники Юпітера, представлені за відстанню від планети і нахилом орбіти до площини її екватора [37]; б) ретроградні супутники Юпітера, представлені за ексцентриситетом і нахилом орбіти до площини її екватора: групи Ананке (●), Карме (■), Пасіфе і відокремлені супутники (◆) [35].

— від 137 до 167 градусів. Періоди обертання складають від 483 до 1077 діб, великі півосі орбіт — від 17,7 до 30,3 млн км.

Для Юпітера радіус сфери Хілла дорівнює приблизно 52 млн. км. Найвіддаленіший відкритий ретроградний супутник S/2003 J2 віддаляється на ексцентричній орбіті на відстань до 36 млн. км від Юпітера. Отже, цілком можливо виявити ще більш далекі супутники Юпітера [36].

Зазначимо, що Міжнародний астрономічний союз (IAU) зарезервував імена із закінченням «-е» для всіх ретроградних супутників Юпітера, які поділяються за своїми орбітальними характеристиками на 3 групи за назвою найбільших супутників: Ананке (діаметр 28 км, 16 об'єктів), Карме (діаметр 46 км, 18 об'єктів), Пасіфе (діаметр 60 км, 15 об'єктів). Крім цього виявлено 3 відокремлених супутників (S/2003 J12, S/2011 J1, S/2003 J2), які за своїми орбітальними характеристиками відрізняються від перерахованих груп.

Всі ретроградні супутники розташовані на відстанях від $250R_{Ю}$ до $440R_{Ю}$. Тому їх орбіти піддаються дуже сильному впливу з боку Сонця і для більшості з них параметри оскулюючих орбіт широко змінюються за короткі інтервали часу. Наприклад, повідомлялося про зміни до 109 м у великій півосі за 2 роки, 0,5 в ексцентриситеті за 12 років, і 5° у нахилі за 24 роки [29]. Середні значення для елементів орбіти були пораховані усередненням поточних значень за тривалий період часу, використаний для визначення динамічних сімейств.

Порівняно малі розміри, ретроградні орбіти і великі відстані від Юпітера свідчать про те, що їхнє походження відрізняється від походження внутрішніх регулярних супутників. Згідно з найпоширенішою точкою зору [18], вони були захоплені з ближньої області пояса астероїдів потужним гравітаційним полем Юпітера, на ранніх етапах його еволюції, коли густина астероїдів в околі Юпітера була значно вищою, ніж зараз [4]. Однак Юпітеру, як і іншим планетам досить складно захопити астероїд, що рухається по геліоцентричній орбіті. Поки не сталася дисипація енергії, захоплення є оборотним процесом. Для цього необхідно, щоб під час зближення астероїд якимось чином втратив частину своєї енергії, проте механізм цього явища залишається нез'ясованим.

Слід очікувати потік тіл планетних розмірів як до деякого місця їх скупчення, так і від нього. Можливо, цим місцем служать лагранжеві точки, де знаходяться астероїди-троянці [24]. Крім того, чисельні розрахунки [22] показують, що захоплення, навіть тимчасове, є винятковою подією. Тому й надалі для перевірки гіпотез про походження ретроградних супутників потрібно проводити чисельне моделювання.

Якщо супутник утворюється в гравітаційному полі планети, під час її формування, то по орбіті він буде обертатися в тому ж напрямку, в якому обертається планета. Якщо об'єкт формується в іншому місці, а потім захоплюється планетою, його орбіта буде прямою або ретроградною в залежності від того, з якого боку стався перший підхід до планети, тобто у напрямку обертання в бік супутника або в сторону від нього.

В цілому Юпітер разом з сімейством його супутників являє собою вкрай складну фізичну систему, багато властивостей якої ще очікують на пояснення [5].

3. РЕТРОГРАДНІ СУПУТНИКИ ІНШИХ ПЛАНЕТ-ГІГАНТІВ

Стосовно Сатурна, то наразі у нього відомо 62 природних супутника з підтвердженою орбітою, з яких 29 — це ретроградні. Всі вони належать до норвезької групи нерегулярних супутників. Серед них найцікавішою є Феба (еліпсоїд з осями $230 \times 220 \times 210$ км), яка обертається на відстані 226 радіусів планети навколо своєї осі в прямому напрямі з періодом близько 9 год. Феба близька за своїм складом до астероїдів С-типу. Не виключено, що вона належала до так званого сімейства кентаврів — темних об'єктів, що рухається навколо Сонця по витягнутих орбітах за межами орбіти Нептуна.

Найвіддаленіший ретроградний супутник Сатурна Форньот, рухається навколо Сатурна на середній відстані 25,1 млн. км, здійснюючи один оберт за 1490 дні. Ексцентриситет його орбіти становить 0,206 [35].

З 27 супутників наступної планети-гіганта Урана ретроградними є 8, які рухаються на великих відстанях від планети: від 160 до 830 її радіусів, починаючи з супутника Франциско діаметром всього 12 км. Найбільші їх представники Сікоракса і Калібан мають діаметри 150 км і 72 км відповідно; найдалший — Фердинанд (велика піввісь його орбіти становить 21 млн. км, період обертання навколо Урана — 2887 земних діб, або майже 8 земних років) [35].

Притому, Уран має унікальні параметрами обертання навколо своєї осі. Кажуть, що він «котиться» по своїй орбіті, оскільки площина його екватора нахилена до площини орбіти на $97^\circ 55'$. Прийнято вказувати величину нахилу, більшу 90° , щоб вважати, що планета обертається в ту ж сторону, що й інші планети (крім Венери).

Тому осі його ретроградних супутників з нахилом $i = (140^\circ - 167^\circ)$ розташовані під кутом $238^\circ - 265^\circ$ до осі екліптики. Причина аномального нахилу осі обертання до площини орбіти достовірно невідома. Одна з версій припускає, що в минулому сталося дотичне зіткнення Урана з масивним небесним тілом.

Друга версія, підтверджена чисельними розрахунками на суперкомп'ютері в 2009 р., передбачає можливість гравітаційного впливу з боку масивного супутника Урана, який в минулому був втрачений планетою.

Через невелику кількість ретроградних супутників Урана відомих на сьогодні, неможливо сказати, чи можна їх певним чином об'єднати. Можна було б згрупувати Калібана і Стефано, але цей зв'язок є чисто спекулятивним. Насправді, орбітальний розподіл ретроградних супутників Урана статистично відповідає випадковому розподілу ретроградних орбіт в межах стійкості визначених орбіт [28].

На даний час відомо 13 супутників планети Нептун. Найбільший з них — Тритон з діаметром 2700 км, має велику піввісь $3,55 \cdot 10^5$ км (14,5 радіусів планети) і до того ж рухається у зворотньому напрямку. Це єдиний великий ретроградний супутник у Сонячній системі і сьомий супутник за величиною. Більш докладно про його характеристики та гіпотези походження буде сказано нижче.

Крім Тритона у Нептуна у 2002–2003 роках відкрили ще 3 далеких ретроградних супутники з хаотичними орбітами, розмірами у кілька десятків кілометрів. Найбільший і найвіддаленіший з них Несо діаметром у 60 км, рухається на відстані 1970 радіусів планети (48,387 млн. км), з періодом обертання 25,6 земних років [35].

Відсутність ретроградних супутників Нептуна з $a < 0,15R_H$ можна пояснити акреційним впливом Нереїди. З іншого боку, орбіти з $a > 0,15R_H$ є довгоживучими. Орбіти нещодавно виявлених супутників Нептуна задовольняють цій умові [29].

4. ТРИТОН — СУПУТНИК НЕПТУНА

Особливості будови і орбітального руху Тритона дозволяють припустити, що він утворився в поясі Койпера як окреме небесне тіло, схоже на Плутон, і пізніше був захоплений Нептуном. Розрахунки показують, що звичайне гравітаційне захоплення було малоімовірне. Якщо Тритон входив до складу подвійної системи, тоді вірогідність захоплення підвищується.

За іншою версією, Тритон загальмувався і був захоплений тому, що «зачепив» верхні шари атмосфери Нептуна. Припливний вплив поступово привів його на орбіту, близьку до колової. Можливо, що захоплення Тритона порушило систему супутників, яка вже існувала у Нептуна, і незвичайна орбіта Нереїди (з ексцентриситетом $e = 0,75$) служить нагадуванням про цей процес.

За однією з гіпотез, припливна взаємодія Нептуна і Тритона розігріває планету, завдяки чому Нептун виділяє більше тепла, ніж Уран. В результаті Тритон поступово наближається до Нептуна.

Більш імовірно, що в давнину Нептун захопив масивне зовнішнє тіло, яке зіткнулося з існуючим на орбіті великим супутником. Фрагменти, які залишилися, могли перейти на орбіти, сильно нахилені до площини орбіти Нептуна (Тритон і Нереїда). Спочатку витягнута орбіта Тритона поступово змінювалася від високоеліптичної до кругової під впливом гальмування в середовищі пилогоазової туманності на великих відстанях від центру Сонячної системи. В ході цих змін Тритон міг «перехопити» велику кількість малих супутників і в ході цих численних зіткнень набути додаткового запасу внутрішньої теплової енергії. Цим можна пояснити малу кількість супутників за орбітою Тритона і високу густину (2 г/см^3) Тритона.

Орбіта Тритона нахилена до екватора Нептуна на $(159 \pm 1,5)^\circ$, вона практично колова, з ексцентриситетом $1,6 \cdot 10^{-5}$. Остання обставина поряд з синхронізованим обертанням Тритона ($P = 5,877$ доби),

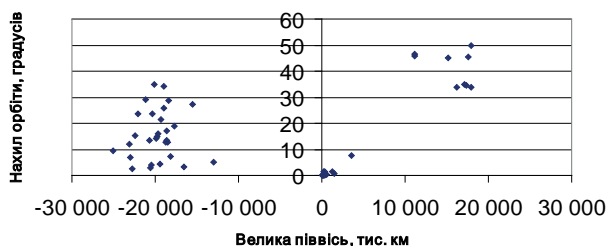


Рис. 3. Супутники Сатурна, представлені за відстанню від планети і нахилом орбіти до площини її екватора

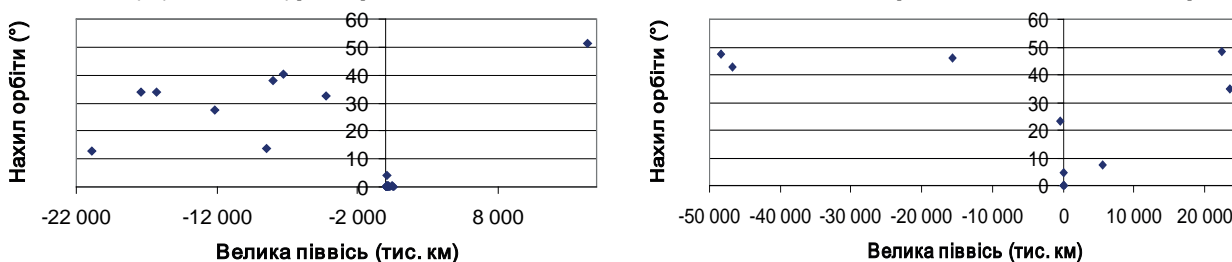


Рис. 4. Супутники Урана і Нептуна, представлені за відстанню від планети і нахилом орбіти до площини її екватора

свідчить про велику роль припливного тертя в гальмуванні його власного обертання. Рухаючись по орбіті у протирусі з Нептуном, масивний Тритон повинен гальмуватися припливами і наближатися до планети, а в кінцевому рахунку, через кілька мільйонів років — перейти межу Роша і розірватися на частини. В цьому випадку утвориться кільце навколо Нептуна, яке може бути більш потужним, ніж кільця Сатурна [2].

Орбіта Плутона перетинає орбіту Нептуна, і на ділянці поблизу перигелію Плутон виявляється ближче до Сонця, ніж Нептун. На цьому ґрунтується припущення, що перетворення Плутона в самостійну планету і особливості руху Тритона і Нерейди можуть бути результатом прольоту масивного тіла. За оцінкою Р. Харрінгтона і Т. Ван Фландерна [16], проліт тіла з масою $m = 0,3 - 3$ маси Землі через систему Нептуна могло викликати в ній великі збурення. Таке тіло могло вивести Плутон на сучасну орбіту, перевести Тритон на орбіту з ретроградним рухом, а Нерейду — на дуже витягнуту орбіту. Подальше місцезнаходження цього тіла не з'ясовується.

У. Мак Кіннон [25] зазначає, що Плутон і Харон не могли бути викинуті з системи Нептуна, не втративши зв'язку один з одним. Подібність складу Тритона і Плутона наводить його на думку, що обидва тіла — незалежні представники найбільших об'єктів зовнішньої зони Сонячної системи. Проте, як вже зазначалося, згідно [33] в рамках простої обмеженої задачі трьох тіл захоплення ретроградного супутника неможливе; а більш складною схемою це явище не досліджено.

5. ФОРМУВАННЯ ОРБІТ РЕТРОГРАДНИХ СУПУТНИКІВ ПЛАНЕТ

Істотним фактором у формуванні орбіт ретроградних супутників планет є ефект Козаї [23] — періодична зміна відношення ексцентриситету і нахилу орбіти, під впливом масивного тіла, причому

$$\sqrt{1 - e^2} \cos i = \text{const} \tag{1}$$

Постійна величина є нормальною складовою кутового моменту. Мінімальний кут нахилу називається кутом Козаї і для ретроградних супутників дорівнює $140,8^\circ$. Фізично ефект пов'язаний з передачею моменту імпульсу супутнику і збереженням його загальної кількості у замкнутій системі.

Таким чином, майже колові, з високим кутом нахилу орбіти можуть стати надзвичайно витягнутими з невеликим нахилом. Зі збільшенням ексцентриситету при збереженні великої півосі постійною скорочується відстань між об'єктами у перичентрі.

Як правило, для супутників з низьким нахилом орбіти механізм Козаї призводить до збурень в результаті прецесії аргументу перичентра. Починаючи з деякого значення кута, прецесія змінюється на лібрацію аргументу перичентра біля 90° або 270° , тобто коли орбіта супутника найбільш віддалена від площини екватора планети.

Резонанс Козаї встановлює обмеження для орбіт, можливих в межах системи. Так, для ретроградних супутників зростання ексцентриситету призведе до зіткнення з іншим супутником (планетою), а зростання апоцентру може викинути супутник зі сфери Хілла.

Максимально можливий ексцентриситет апроксимується за формулою [12]:

$$e_{\text{max}} \approx \sqrt{1 - \frac{5}{3} \cos^2 i}. \tag{2}$$

Період зміни ексцентриситету можна апроксимувати за формулою [11]:

$$P_e \approx 2\pi \sqrt{\frac{a_1^3}{G(m_0 + m_1)}} \left(\frac{m_0 + m_1}{m_2} \right) \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^3 (1 - e_2^2)^{3/2}. \tag{3}$$

Чисельні розрахунки в роботі [28] показують стабільність плоских орбіт для супутників Юпітера (мал. 6), причому межа стійкості прямих супутників сягає лише $a \approx 0,4R_H$, а плоскі ретроградні орбіти стійкі до $a \approx 0,7R_H$. Тобто у сфері Хілла область стійкості для ретроградних орбіт на великій відстані ($> 200R_{\text{пл}}$) від головного тіла більше області стійкості для прямих орбіт. Причому чим далі розташована планета, тим більше радіус її сфери Хілла:

$$R_H \approx a_j \sqrt[3]{\frac{m_j}{3M_\odot}}. \tag{4}$$

де a_j і m_j — велика піввісь і маса планети [2]. Так у Юпітера $R_H = 750R_{\text{пл}}$, у Сатурна $\sim 1100R_{\text{пл}}$, а у Нептуна понад $4500R_{\text{пл}}$ [2].

Рис. 5 також демонструє ефект резонансу Козаї: більшість орбіт з $i \approx 90^\circ$ нестійкі через великі ексцентриситети, спричинені цим резонансом. Для ретроградних орбіт з $e \approx 0$, найменш стійке значення початкового нахилу $i \approx 120^\circ$. При $\omega = 90^\circ$, ця межа зростає до 130° з $e \approx 0,5$. Стійкі супутникові орбіти формують “клин”, показані на рис. 5. Наприклад, ретроградні орбіти починаючи з $e = 0,5$ і $\omega = 0$ стійкі, якщо і $i \geq 130^\circ$ і $a \leq (0,4 + 0,1i/50^\circ)R_H$ [28]. На підтвердження цього ретроградні супутники у Юпітера мають нахил орбіти до екватора планети в межах $141,8^\circ$ (Пасіфе) — $167,1^\circ$ (Халдене), крім Кіллене ($140,1^\circ$), Каллірое ($139,8^\circ$) і Коре ($137,4^\circ$); у Сатурна в межах $145,2^\circ$ (Бестла) — $177,5^\circ$ (Сурт); у Урана

від $141,9^\circ$ (Стефано) до $167,3^\circ$ (Фердинанд), крім Калібану ($139,9^\circ$); у Нептуна Тритон має нахил орбіти $156,8^\circ$, а три нещодавно відкритих ретроградних супутників в межах $132,6^\circ - 137,4^\circ$ [35].

6. ГІПОТЕЗИ ПОХОДЖЕННЯ РЕТРОГРАДНИХ СУПУТНИКІВ ПЛАНЕТ

Т.Хеппенхеймер і К.Порко [19] припустили, що ретроградні супутники були захоплені внаслідок зростання маси батьківського тіла при акреції. За цією гіпотезою, відомою як «затягування», супутники спочатку перебували в орбітальному резонансі 1:1 з батьківською планетою і при зростанні маси планети могли повільно переходити з резонансних орбіт на планетоцентричні. Основний недолік цієї гіпотези — неможливість пояснити утворення прямих нерегулярних супутників.

Д.Поллак, Д.Бернс і М.Таубер [30] у газовій моделі також припустили, що групи ретроградних супутників Юпітера були захоплені в кінці першої стадії контракції газової оболонки прото-Юпітера, коли його радіус становив кілька сотень $R_{Ю}$, оскільки великі півосі «ретроградного» сімейства супутників групуються поблизу $310R_{Ю}$ [2]. Кожне із сімейств утворюється при розпаді одного крихкого батьківського тіла, яке зазнало газодинамічного тиску з боку оболонки Юпітера. Автори вважають аргументом на користь такого захоплення в 3 рази вищу масу батьківського тіла прямого сімейства, яке утворилося ближче до планети, ніж більш віддалене ретроградне сімейство, оскільки щільність в газовій оболонці зростає всередині і внутрішні частини можуть захоплювати більші тіла.

Хоча цей сценарій підходить до Юпітера і Сатурна, придатність його для Урану і Нептуну з їх менш масивними газовими оболонками викликає сумніви [31]. Більш дрібні фрагменти, сильніше взаємодіючи з газом, повинні зазнавати швидшої орбітальної еволюції при наближенні до планети. Цьому суперечить велика Феба — найближчий ретроградний супутник Сатурна; Калібан і Сікоракса — найбільші

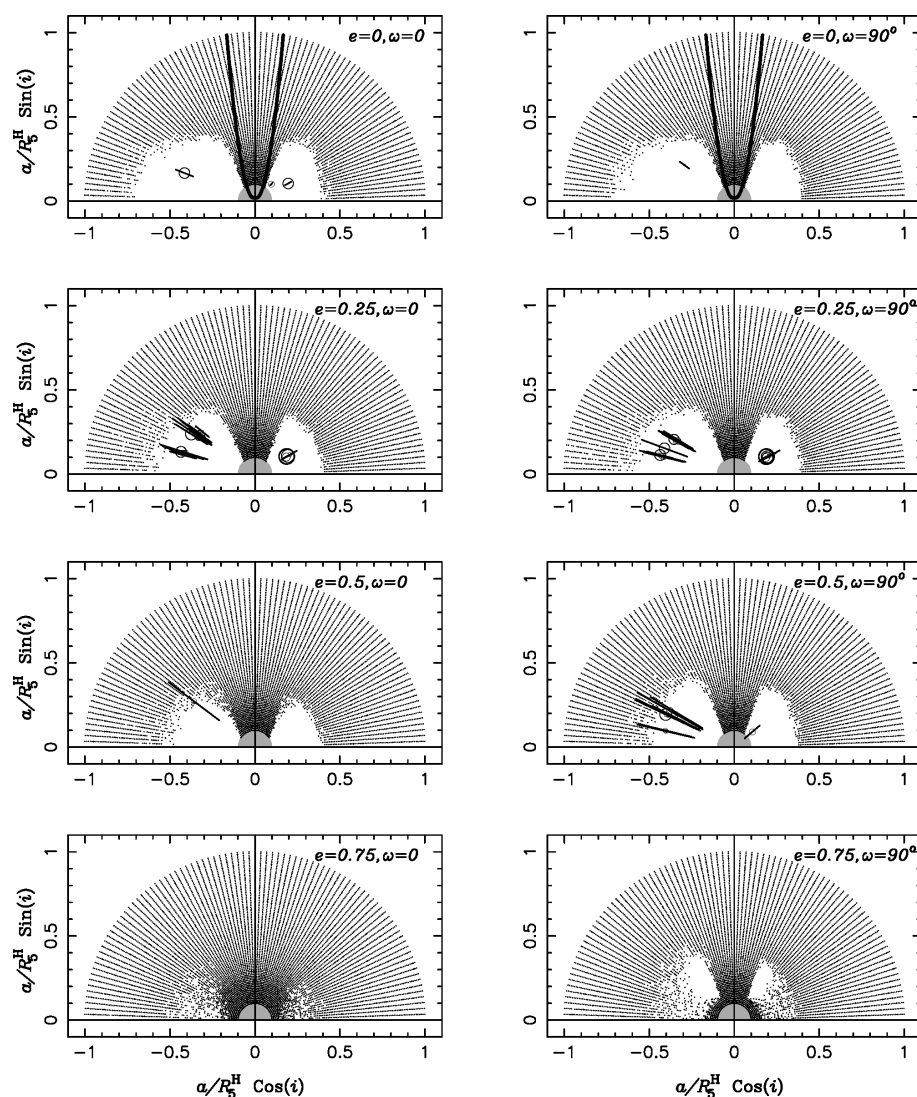


Рис. 5. Результати моделювання [28] стабільності орбіт віддалених супутників Юпітера. Досліджені орбіти з часом життя менш ніж $0,5 \cdot 10^9$ років позначені точками, чисті області зображують стабільні орбіти. Маленьке сіре півколо у початку координат показує область, не охоплену початковими умовами ($a < 0,1R_H$). Жирні U-подібні криві на верхніх графіках вказують межі стабільного куту нахилу, обчисленого за (1).

ретроградні супутники Урана; ретроградні супутники Юпітера, які значно розрізняються за розміром, при тій же великій півосі, а також відсутність загальної кореляції між розміром і ексцентриситетом супутників [13].

У сфері Хілла, область стійкості для ретроградних орбіт на великій відстані від головного тіла більше області стійкості для прямих орбіт. За допомогою цього принципу можна було б пояснити існування ретроградних супутників навколо Юпітера на відстані більш ніж 250 його радіусів, однак Сатурн має більш рівномірне поєднання ретроградних і прямих супутників, так що причини цього явища складніші.

Д.Бейлі в роботах [6, 7] показав, що захоплення може відбуватися тільки через внутрішню лагранжеву точку і тільки або в перигелії, або в афелії Юпітера. Захоплення в перигелії в моделі Бейлі призводить до орбіт з прямим рухом, розташованих поблизу орбіт фактично існуючої групи внутрішніх нерегулярних супутників, а захоплення в афелії — до орбіт з ретроградним рухом і великими півосями, близькими до півосей групи ретроградних супутників. Однак чисельні розрахунки [10, 20] показали, що безліч захоплень і втрат відбувається не тільки через внутрішню лагранжеву точку, але і в інших точках. Т.Хеппенхеймер [18] вказав на помилки в цих розрахунках і запропонував свій власний критерій захоплення. Д.Девіс [10] звернув увагу на той факт, що елементи орбіти Юпітера, при яких виходить узгодження з обчисленнями, випадкові, так як орбіта Юпітера змінюється під дією тяжіння інших планет [4].

У моделях, відмінних від газової, захоплення зовнішніх супутників Юпітера може пояснюватися двома шляхами. Передбачається або зіткнення астероїдальних тіл з подібними до себе, для чого є підстави з огляду на схожість складу обох груп супутників з С-астероїдами [34], або захоплення через точки лібрації. Т.Хеппенхеймер [18] розглянув захоплення супутників Юпітером через колінеарні точки лібрації L_1 і L_2 . Він знайшов, що коли б тіла, проходячи точку лібрації, мали майже нульову відносну швидкість, то прямі орбіти лежали б поза ретроградними, що не узгоджується з фактичним розташуванням орбіт. Розміри і розподіл орбіт групи прямих супутників добре пояснюються захопленням через точку лібрації при масі Юпітера, рівній $1/1730$ масі Сонця, тобто приблизно в 1,7 рази меншій, ніж сучасна, але для пояснення утворення групи ретроградних супутників потрібні додаткові гіпотези. К.Танікава [33] показав, що в рамках найпростішої обмеженої задачі трьох тіл, внаслідок захоплення не можуть виникати супутники із ретроградним рухом. Цей результат має відношення не тільки до ретроградних супутників Юпітера, а й до ретроградного супутника Сатурна Феби. Випадкові проходження тіл крізь сферу Хілла Юпітера можуть призводити до його тимчасового захоплення на орбіти супутників. Але, як показують чисельні експерименти [13], поки не знайдено жодного випадку, коли тимчасове захоплення перетворилося б на постійне. Очевидно, що при утворенні ретроградних супутників повинен був діяти якийсь дисипативний механізм: непружне зіткнення або гальмування в газі. Останнє можливе лише в газовій моделі. Наявність багатьох допланетних тіл, що перетинають орбіти зростаючих Юпітера і Сатурна, робить захоплення супутників при зіткненні дуже ймовірним і за відсутності первинних газових оболонок у планет-гігантів.

Подібність орбітальних елементів груп ретроградних супутників навело Г.Коломбо і Ф.Франкліна [9] на думку про те, що члени груп утворилися при одній і тій же події. Вони припустили, що сталося зіткнення між тілами в межах сфери впливу Юпітера, надлишок орбітальної енергії по відношенню до Юпітера був втрачений, після чого відбулося захоплення [4]. Цю гіпотезу детальніше розглядав Р.Грінберг [15]. Проте, при одному зіткненні малоймовірно формування цих груп. Перевіркою цих теорій захоплення можуть слугувати фотометричні властивості поверхонь ретроградних супутників.

В.А.Бронштен [1] для пояснення походження іррегулярних, зокрема ретроградних, супутників Юпітера також висунув гіпотезу, за якою ретроградні супутники утворилися в результаті зіткнення одного супутника або астероїда з іншим тілом. Таким шляхом можна пояснити і близькість орбіт, і їх форму і нахил, і зворотний рух.

За гіпотезою В.А.Бронштена, ретроградні супутники Юпітера утворилися в результаті зіткнення одного супутника або астероїда з іншим тілом, у результаті чого: а) швидкість астероїда зменшилася до еліптичної щодо Юпітера, б) від удару астероїд розколовся на три (чотири) частини. Розрахована ним швидкість зближення могла бути від 1,55 до 10,6 км/с. Даний варіант призводить до більшої імовірності події (яка може ще зрости при існуванні періодів обертання регулярного супутника і астероїда одного порядку), але вимагає повторного захоплення осколків. Для цього швидкість зіткнення повинна була бути або дуже малою або (при зіткненні двох зустрічних тіл) близькою до подвоєної орбітальної швидкості супутників (~ 5 км/с).

Наявність групи супутників може бути і простим результатом розпаду, що відбувалося під час єдиного захоплення або після нього.

Так для групи Карме Юпітера дуже низька дисперсія середніх орбітальних елементів серед основних членів групи (менш ніж 700 000 км у великій півосі і менше $0,7^\circ$ за нахилом, рис. 3) показує, що засновником її могло бути єдине тіло, яке розпалося на частини від удару. Дисперсія може бути пояснена

дуже малою швидкістю імпульсу ($5 < \delta V < 50$ м/с). [35] Батьківське тіло, ймовірно, мало розмір Карме — 46 км у діаметрі, оскільки 99% маси групи належить Карме. [34]

Іншим підтвердженням єдиного походження групи може слугувати однаковий світло-червоний колір (за винятком більш червоного Каліке), з показником кольору $B - V = 0,76$ і $V - R = 0,47$ і інфрачервоним електромагнітним спектром, що співпадає зі спектром астероїдів класу D [14]. Ці дані узгоджуються з походженням сімейства Хільди або троянських астероїдів Юпітера.

Отже, ретроградні супутники були захоплені планетами з геліоцентричних орбіт. Тим не менше, їх сучасні орбіти не можуть бути результатом чисто гравітаційної взаємодії трьох тіл (Сонце — планета — супутник), як це було показано Х. фон Цейпелем і Е.Хопфом [1].

К.Танікава [33] теж показав, що в рамках найпростішої обмеженої задачі трьох тіл, внаслідок захоплення не можуть виникати супутники із ретроградним рухом. До того ж ймовірність випадкових послідовних захоплень мізерно мала. Крім того, як показав Ю.Хагіхара [2], рух чотирьох великих ретроградних супутників є нестійким в сенсі Хілла, оскільки має місце нерівність

$$(2C)^{3/2} < 9\mu n', \quad (5)$$

де C — постійна Якобі, μ — маса Юпітера, помножена на сталу тяжіння, n' — середній кутовий рух Сонця в системі відліку, зв'язаній з Юпітером.

Зіткнення між ретроградними супутниками — також ймовірний спосіб утворення супутникових сімей. Ще один спосіб їх утворення — це зіткнення прямого і ретроградного супутників з наступним руйнуванням.

Для Сатурна орбіти його прямих і ретроградних супутників представлені широким спектром півосей. Отже, в цій системі можливі зіткнення між практично будь-якими парами супутників. Насправді, частота зіткнень будь-якої пари супутників в системі супутників Сатурна (за виключенням Феби) менше 0,02 зіткнень за 4,5 млрд років [21].

Приймаючи гіпотезу невеликої швидкості зіткнення між ретроградними супутниками Урану (порядку 0,58 км/с) можна пояснити, чому, на відміну від систем Сатурна і Юпітера, ретроградні супутники Урана не групуються за показниками своїх середніх орбітальних елементів. Хоча можливо, що ми бачимо поки що тільки найбільші члени груп, на користь чого свідчить відсутність супутників з діаметром менше 10 км [8].

7. ВИСНОВКИ

Останнім часом активно розвиваються дослідження проблеми походження і еволюції супутникових систем. Цьому сприяє накопичення нового фактичного матеріалу, одержаного за допомогою космічних і наземних спостережень. Планетна космогонія істотно розширила область досліджень — все більше конкретизується уявлення про первинний стан планет, на основі моделей утворення планет та їх еволюції. Аналітичні розв'язки та чисельні методи дозволяють конструювати космогонічні процеси утворення ретроградних супутників планет.

Зараз існує ще багато невирішених теоретичних проблем, що стосуються динаміки захоплення супутників, наприклад, проблема механізму дисипації енергії, в результаті якої тіла залишилися в сфері тяжіння планети. Втрата енергії може виникати при гальмуванні тіл в первинному юпітеріанському газопиловому диску.

Ретроградні орбіти виявилися більш стійкі до збурень на далеких ($> 200R_{\text{пл}}$) відстанях від планет, ніж прямі орбіти. До цього часу залишаються невирішеними питання про еволюційний зв'язок ретроградних супутників з іншими малими тілами Сонячної системи, зокрема астероїдами і кометами.

В даній роботі проведений загальний аналіз супутникових систем, в яких виникає ретроградний орбітальний рух. Розглянуто різноманітні гіпотези утворення таких систем. Для визначення найоптимальнішої гіпотези їх походження необхідно провести детальне чисельне моделювання ретроградних супутникових систем з урахуванням еволюції газопилового диску в нашій Сонячній системі.

1. *Бронштэн В.А.* О происхождении нерегулярных спутников Юпитера // *Астрон. вестник.* — 1968, **2**, № 1. — С. 29–36.
2. *Рускол Е.Л.* Естественные спутники планет. *Астрономия*, т. 28 (Итоги науки и техники ВИНТИ АН СССР). / Под ред. В.В.Шевченко. — М.: 1986. — 116 с.
3. *Чеботарев Р.А., Божкова А.Р.* // *Инст. теор. астр., Ленинград.* — 1964. — **9**, № 6.
4. *Юпитер. Т.1: Происхождение и внутреннее строение. Спутники* / Под ред. Т.Герелса. — М.: Мир, 1978. — 522 с.
5. *Язев С.А.* Введение в астрономию. Лекции о Солнечной системе: в 2 ч. Ч.2: уч. пособие. — Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2009. — 150 с.
6. *Bailey J.M.* Origin of the outer satellites of Jupiter // *J. Geophys. Res.* — 1971. — **76**. — P. 7827–7832.
7. *Bailey J.M.* Studies on planetary satellites, Satellite capture in the three-body elliptical problem // *Astronomical Journal.* — 1972. — **77**. — P. 177–182.

8. *Brozovic M., Jacobson R.A.* The Orbits of the Outer Uranian Satellites // *Astronomical Journal*. — 2009. — **137**. — P. 3834.
9. *Colombo G., Franklin F.A.* On the formation of the outer satellite groups of Jupiter // *Icarus*. — 1971. — **15**. — P. 186–191.
10. *Davis D.R.* Secular changes in Jovian eccentricity: effect on the size of capture orbits // *J. Geophys. Res.* — 1974. — **79**. — P. 4442–4443.
11. *Ford E.B., Kozinsky B., Rasio F.A.* Secular Evolution of Hierarchical Triple Star Systems // *The Astrophysical Journal*. — 2000. — **535**, № 1. — P. 385–401.
12. *Genya Takeda, Rasio F.A.* High Orbital Eccentricities of Extrasolar Planets Induced by the Kozai Mechanism // *The Astrophysical Journal*. — 2005. — **627**. — P. 1001–1010.
13. *Gladman B., Kavelaars J.J., Petit J.-M., Morbidelli A., Holman M.J., Loredano T.* // *Astronomical Journal*. — 2001. — **122**. — P. 1051.
14. *Grav T., Holman M.J.* Near-Infrared Photometry of the Irregular Satellites of Jupiter and Saturn // *The Astrophysical Journal*. — 2004. — **605**. — P. L141–L144.
15. *Greenberg R.* The Laplace relation and the masses of Uranus' satellites // *Icarus*. — 1976. — **29**. — № 3. — P. 427–433.
16. *Harrington R.S., van Flandern T.C.* The satellites of Neptune and the origin of Pluto // *Icarus*. — 1979. — **39**. — № 1. — P. 131–136.
17. *Henon M.* Numerical exploration of the restricted problem, VI. Hill's case: non periodic orbits // *Astron. Astrophys.* — 1970. — **9**. — P. 24–36.
18. *Heppenheimer T.A.* On the presumed capture origin of Jupiter's outer satellites // *Icarus*. — 1975. — **24**. — P. 172–180.
19. *Heppenheimer T., Porco C.* New contributions to the problem of capture // *Icarus*. — 1977. — **30**. — P. 385.
20. *Hunter R.B.* Motion of satellites and asteroids under the influence of Jupiter and the Sun, I. Stable and unstable satellite orbits // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 1967. — **136**. — P. 245–265.
21. *Jacobson R.A.* The orbit of Phoebe from Earthbased and Voyager observations // *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*. — 1998. — **128**. — P. 7–17.
22. *Kaula W.M., Bigeleisen P.* Early scattering by Jupiter and its collision effects in the terrestrial zone // *Icarus*. — 1975. — **25**. — P. 18–33.
23. *Kozai Y.* Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity // *Astronomical Journal*. — 1962. — **67**. — № 9. — P. 591–598.
24. *Kuiper G.P.* On the origin of the irregular satellites // *Proc. Natl. Acad. Sci.* — 1951. — **37**. — P. 717–721.
25. *McKinnon W.B.* On the origin of Triton and Pluto // *Nature*. — 1984. — **311**. — № 5984. — P. 355–358.
26. *Morrison D., Cruikshank D.P.* Physical properties of the natural satellites // *Space Science Reviews*. — 1974. — **15**. — P. 641–739.
27. *Moulton F.R.* On the stability of direct and retrograde satellites // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 1914. — **75**. — P. 40–57.
28. *Nesvorný D., Alvarellos J., Dones L., Levison H.* Orbital and collisional evolution of the irregular satellites // *The Astronomical Journal*. — 2003. — **126**. — P. 398–429.
29. *Nesvorný D., Beaugé C., Dones L.* Collisional Origin of Families of Irregular Satellites // *The Astronomical Journal*. — 2004. — **127**. — P. 1768–1783.
30. *Pollack J.B., Burns J.A., Tauber M.E.* Gas drag in primordial circumplanetary envelopes: A mechanism for satellite capture // *Icarus*. — 1979. — **37**. — № 3. — P. 587–611.
31. *Pollack J.B., Lunine J.I., Tittlemore, W.C.* In *Uranus*. — The Univ. of Arizona Press, 1991. — 469 p.
32. *Sheppard S.S., Jewitt, D.C.* An abundant population of small irregular satellites around Jupiter // *Nature*. — 2003. — **423**. — № 6937. — P. 261–263.
33. *Tanikawa K.* On the origin of the planetary spin by accretion of planetesimals // *Celest. Mech.* — 1983. — **29**. — № 4. — P. 367–402.
34. *Tholen D.J., Zellner B.* Multicolor photometry of outer Jovian satellites // *Icarus*. — 1984. — **58**. — № 2. — P. 246–253.
35. <http://www.dtm.ciw.edu/users/sheppard/satellites/jupsatdata.html>
36. <http://www.lnf1.sai.msu.ru/neb/rw/natsat/>
37. http://www.ssd.jpl.nasa.gov/?sat_phys_par/

Надійшла до редакції 16.08.2012