



УДК 523.6

Походження комет

Л.М. Шульман

Головна астрономічна обсерваторія НАН України

Обговорюються три основні концепції походження комет. Перша належить Лапласу, який припустив, що комети стають членами Сонячної системи після захоплення планетою-гігантом, напр. Юпітером. Оорт висунув припущення, що на периферії Сонячної системи є гігантська хмара кометних ядер на геліоцентричній віддалі $\sim 10^5$ а.о. Щоб стати спостережуваним, кометне ядро має змінити свою орбіту двічі: спочатку під дією гравітаційного збурення від зорі, що проходить поблизу, а вдруге — від планети-гіганта. Другу гіпотезу запропоновано Лагранжем, який припустив, що ядра комет є результатом вулканічних вивержень на планетах-гігантах. Це — еруптивна гіпотеза. Деякі астрономи відхили еруптивну гіпотезу через надто потужну гравітацію на “поверхнях” планет. Всехсвятський здолав це заперечення за допомогою ідеї, що виверження мають місце не на планетах, а на їх супутниках. Дробишевський запропонував механізм такого вулканізму. Цей механізм — вибух воднево-кисневою суміші, утвореної й нагромадженої в тілі супутника шляхом електролізу в електричному струмі, індукованому завдяки орбітальному рухові супутника в магнітному полі Юпітера. Ольберс припустив, що кометні ядра виникли одночасно з утворенням всіх тіл Сонячної системи. Камерон розвинув кількісну теорію утворення Сонячної системи. На периферії Сонячної системи (100–5000 а.о.) повинні зростати малі крижані тіла, тобто кометезимали. Непружні зіткнення між ними формують несферичні тіла, тобто кометні ядра. Найімовірніше місце росту кометних ядер — пояс Койпера. Легко бачити, що всі три гіпотези не є взаємновиключними. Справді, довгоперіодичні комети могли бути сформовані у поясі Койпера, а деякі короткоперіодичні комети могли бути вивержені вулканами на супутниках планет-гігантів.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ КОМЕТ, Шульман Л.М. — Обсуждаются три основные концепции происхождения комет. Первая принадлежит Лапласу, который предположил, что кометы становятся членами Солнечной системы после захвата планетой-гигантом, напр. Юпитером. Оорт выдвинул предположение, что на периферии Солнечной системы существует гигантское облако кометных ядер на гелиоцентрическом расстоянии $\sim 10^5$ а.о. Чтобы стать наблюдаемым, кометное ядро должно изменить свою орбиту дважды: сначала под действием гравитационного возмущения от проходящей поблизости звезды, а потом — от планеты-гиганта. Вторую гипотезу предложил Лагранж, предположивший, что ядра комет являются результатом вулканических извержений на планетах-гигантах. Это — эруптивная гипотеза. Некоторые астрономы отклонили эруптивную гипотезу ввиду слишком сильной гравитации на “поверхностях” планет. Всехсвятский преодолел это возражение, выдвинув идею, что извержения происходят не на планетах, а на их спутниках. Дробишевский предложил механизм такого вулканизма. Этот механизм — взрыв водородно-кислородной смеси, образовавшейся и накопившейся в теле спутника путем электролиза электрическим током, индуцированным благодаря орбитальному движению спутника в магнитном поле Юпитера. Ольберс предположил, что кометные ядра возникли одновременно с образованием всех тел Солнечной системы. Камерон развил количественную теорию образования Солнечной системы. На периферии Солнечной системы (100–5000 а.е.) должны расти малые ледяные тела, т.е. кометезимали. Неупругие столкновения между ними формируют несферические тела, т.е. кометные ядра. Наиболее вероятное место роста кометных ядер — пояс Койпера. Легко видеть, что все три гипотезы не являются взаимоисключающими. Действительно, долгоперіодические кометы могли сформироваться в поясе Койпера, а некоторые короткоперіодические кометы могли быть извергнуты вулканами на спутниках планет-гигантов.

ORIGIN OF COMETS, by Shulman L.M. — Three basic conceptions of origin of comets are under discussion. The first one belongs to Laplace who supposed that comets are becoming the members of the Solar system being captured by a giant planet, e.g. Jupiter. It is the hypothesis of capture. Oort supposed that there is a giant cloud of cometary nuclei at the heliocentric distance $\sim 10^5$ AU. To become observable a cometary nucleus has to change its orbit twice: once under a gravitational perturbation from a near passing star and then from a giant planet. The second hypothesis was proposed by Lagrange, who supposed that cometary nuclei are result of volcanic eruptions on the surfaces of giant planets. This is the eruptive hypothesis. Some astronomers negated the eruptive hypothesis because too powerful gravity at the ‘surfaces’ of these planets. Vsekhsviatky overridden this objection by the idea that the

eruptions took place not on the planets themselves but on their satellites. Drobyshevsky proposed a mechanism of this volcanism. This mechanism is an explosion of hydrogen-and-oxygen mixture which has been created and accumulated inside the body of a satellite by electrolysis in the electric field induced by orbiting of the satellite in the magnetic field of Jupiter. Olbers supposed that cometary nuclei may be formed simultaneously with formation of all the Solar system bodies. Kameron developed a quantitative theory of formation of the Solar system. At the periphery of the Solar system (100–5000 AU) small icy bodies, i.e. cometesimals, must grow. The inelastic collisions between of the cometesimals formed non-spherical bodies, i.e. cometary nuclei. The most probable region of growth of cometary nuclei is the Kuiper belt. One can see that these three hypotheses are not in implacable contradiction. Really, the long periodic comets may be formed in the Kuiper belt while some short periodic comets may be erupted by volcanoes on the satellites of the giant planets.

1. ВСТУП. ЩО ТАКЕ КОМЕТА?

Комета — мале тіло Сонячної системи з динамічною простягнутою атмосферою. Фактично з Землі спостерігаються не самі малі тіла, а кометні атмосфери, які утворюються шляхом сублімації криги (переважно криги H_2O) у вакуум з поверхні малого крижаного тіла — ядра комети. Ядро комети через свою відносно малу масу не здатне втримати атмосферу так, як це має місце на планетах, тому кометна атмосфера є течія газу, пилу та плазми. Частина атмосфери, найближча до ядра, називається головою комети. Голова комети складається з нейтрального газу та пилу. Є в головах і іони. Розміри голів комет — десятки та сотні тисяч кілометрів.

Від голови комети виходить витягнута частина кометної атмосфери — хвіст комети. Комета (рис. 1) може мати кілька хвостів різної природи. Плазма (суміш молекулярних іонів CO^+ та N_2^+ з рівною кількістю електронів) підхоплюється плазмою сонячного вітру з утворенням вузького, дуже довгого (десятки та сотні мільйонів кілометрів) практично прямолінійного плазмового хвоста. Прискорення іонів сонячним вітром в десятки та сотні разів перевищує силу тяжіння до Сонця, тому плазмовий хвіст спрямований майже точно від Сонця. Пил відштовхується в бік, протилежний напрямку на Сонце, тиском сонячного проміння, але відштовхувальне прискорення пилу значно менше ніж плазми, тому бачимо, що пилові хвости викривлені через відставання далеких від ядра частин хвоста від руху комети. Крім того, пил хвоста полідисперсний, тобто містить порошинки різних розмірів. Менші частинки прискорюються світлом більше, ніж великі. Через це пиловий хвіст набуває характерного вигляду, схожого з турецьким ятаганом. Комета може водночас мати кілька хвостів різних типів. Крім вже згаданих, спостерігаються короткі пилові викиди крупних частинок, прямолінійні, але дуже сильно відхилені від напрямку Сонце – комета. Це, за класифікацією Бредихіна [1], — хвости третього типу. Ще рідше спостерігаються так звані аномальні хвости — викиди крупного пилу, тобто таких частинок, для яких сила тяжіння до Сонця перевищує силу радіаційного відштовхування.

У кометних атмосферах відбуваються різноманітні нестационарні явища. У плазмових хвостах це хвилі та хмаровидні утворення (згущення), що швидко рухаються від Сонця. Плазмові хвости іноді розриваються або ж зовсім відриваються. У голові комети спостерігаються пилові оболонки приблизно параболоїдальної форми, спіралевидні струмені пилу, фонтанні викиди тощо. Зрідка спостерігаються так звані *галоси* — сферичні оболонки навколо ядра комети.

2. ВЛАСТИВОСТІ КОМЕТНИХ ЯДЕР

Перед тим як обговорювати проблему походження комет, оглянемо властивості кометних ядер [2], тобто спробуємо з'ясувати, походження чого треба пояснити.

Ось ці властивості:

1. Монолітність. Факти розвалу кометних ядер підтверджують цю властивість, бо з різних причин фрагментують початково монолітні ядра.
2. Форма – несферична, картоплевидна.
3. Розміри: від сотень метрів (менші важко спостерігати через малу яскравість) до десятків кілометрів (більші швидко вкриваються пиловим шаром і перетворюються на астероїди). Оцінка розмірів ядра може бути зроблена з абсолютної зоряної величини комети H , тобто тієї, яку б мала комета, якщо її помістити на одиничні геліоцентричну (r_{com}) та геоцентричну (Δ) віддалі. Тобто за умови $r_{\text{com}} = \Delta = 1$ а.о. Тоді маємо

$$r_{\text{nucl}} = \frac{10^{15.48-0.2H}}{\sqrt{\alpha x_{c_2} Z f_{\text{oo}} \tau}} \approx 5.4 \text{ км (для комети Галлея)}, \quad (1)$$

де α — частка активної поверхні ядра, x_{c_2} — вміст молекул, що розпадаються з утворенням

C_2 , Z — газопродуктивність одиниці поверхні ядра, f_{oo} — сила осцилятора для смуги Свана 0-0, τ — тривалість життя радикала C_2 в атмосфері комети.

4. Густина. $\rho_{ice} \approx 0.8 - 0.9 \text{ г/см}^3$. Моделі з низкою густиною $0.05 - 0.4 \text{ г/см}^3$ не узгоджуються з жодним сценарієм походження комет (не здатні опиратися самогравітації).
5. Періоди обертання навколо осі — години й десятки годин, але не менше гранично можливого, коли відбувається відцентровий розрив. Це мінімально можливе значення періоду можна підрахувати за формулою

$$P > P_{\min} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{4}{3}\pi G\rho}} \approx 3.7 \text{ годин} \quad (2)$$

6. Газопродуктивність. В залежності від речовини і геліоцентричної віддалі $Q = 10^{26} - 10^{32} \text{ мол/с}$. Наприклад, для комети Галлея виміряно $Q_{H_2O} \sim 10^{30} \text{ с}^{-1}$, ядро цієї комети було дуже чорним його альbedo дорівнювало лише 0.04. З альbedo та розмірів ядра можна вирахувати площу його крижаних ділянок і оцінити їх газопродуктивність. Виявилось, що виміряна газопродуктивність утричі більша за ту, яку здатні забезпечити крижані ділянки [2]. Причину цієї розбіжності було встановлено нещодавно. Вона полягає у кратерній структурі активних областей, яка забезпечує приблизно потрійний потік енергії сонячних променів на кригу.
7. Хімічний склад.
 - (а) Летючі речовини у твердому стані: H_2O (домінуюча складова більшості ядер комет), CO_2 , CO , NH_3 , C_2N_2 , HCN , CH_3CN , HCO , C_2H_6 та ін. вуглеводні, CS , S_2
 - (б) Тугоплавкі: мінеральний пил (олівіни, силікати та ін. мінерали); органічний пил (CHON-частинки).
 - (в) Невідомі джерела металів: Na, Ca, Fe, Cr, Cu, Co, Mg, K, Ni.



Рис. 1. Комета Веста 1976 р. з плазмовим та пило-вим хвостами



Рис. 2. Виверження вулкану на Іо. Висота викиду сягає 400 км

8. Перигелії короткоперіодичних комет групуються навколо орбіт планет-гігантів. Це дозволяє розподілити короткоперіодичні комети на сім'ї планет. В.П.Конопльова [3] дослідила розподіл комет за мінімальними міжорбітальними віддальми планета-комета. Розрахунок цих віддалей, виконаний разом з Ю.Г.Бабенком [4] виявив існування сімей серед усіх комет.

Загалом ядро типової короткоперіодичної (тобто вкрите пилом) комети має вигляд, показаний на рис.3. Такий вигляд і вищеподаний набір властивостей повинна пояснювати будь-яка теорія походження комет.

3. ГІПОТЕЗА ЗАХОПЛЕННЯ

Гіпотеза, яку висунув Лаплас [6], брала до уваги групування перигеліїв короткоперіодичних комет навколо планет гігантів. Найчисленнішою родиною комет була родина Юпітера. Лаплас припустив, що комети приходять здалека. Ті з них, які зближаються, наприклад, з Юпітером, трансформують під впливом його гравітації свою орбіту, стаючи членами Сонячної системи. Залишалося відкритим питання, звідки приходять кометні ядра. Оорт [7] висунув ідею, згідно з якою кометні ядра приходять з хмари кометних ядер, яка розташована на віддалі $\sim 10^5$ а.о. від Сонця. Погляди на походження цієї хмари поступово мінялися. В часи Оорта припускали, що хмара Оорта утворилася після вибуху гіпотетичної планети Фаєтон, орбіта якої була між орбітами Марса та Юпітера.

Згодом зрозуміли, що це припущення суперечить даним про хімічний склад кометних ядер. Якщо навіть у 50-ті роки багато хто вважав, що ядра комет схожі на гігантські метеорити, тобто складаються переважно з мінеральних тугоплавких речовин, то далі було з'ясовано, що кометні ядра — крижані тіла, які відтак не можуть бути уламками планети. Це автоматично змінило погляди на утворення хмари Оорта. Зараз прихильники цієї гіпотези вважають, що хмару Оорта створив Юпітер, який своїм тяжінням викинув на далекі орбіти малі крижані тіла, які виростили в зоні його живлення. З цієї схеми автоматично випливає, що афелії кометних ядер мають бути розташовані у хмарі Оорта, а перигелії — в околі орбіти Юпітера. Спостереження не виявили концентрації саме перигеліїв кометних ядер у зонах орбіти Юпітера та інших планет-гігантів. Отже хмара Оорта залишається гіпотетичною. Критику концепції хмари Оорта можна знайти у Гулієва [8, 9]. Проте вона завжди приваблювала фахівців з небесної механіки, оскільки вважалося, що кометні ядра з хмари Оорта початково спрямовує до внутрішніх районів Сонячної системи гравітаційне збурення від зорі, що випадково проходить поруч із Сонячною системою. Задача про міжзоряні зближення цікава у теоретичному плані, але навряд чи гіпотеза захоплення вичерпує проблему походження комет.

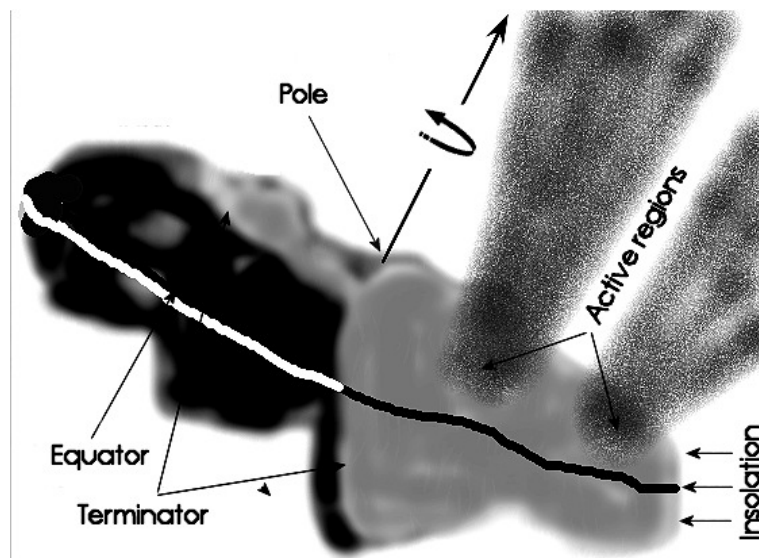


Рис. 3. Типове ядро комети. Показано активні області, що є джерелами газопилових потоків

4. ЕРУПТИВНА ГІПОТЕЗА

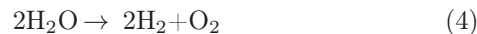
Практично одночасно з Лапласом Лагранж [10] запропонував інше пояснення факту групування афеліїв кометних орбіт навколо орбіт планет-гігантів. Гіпотеза Лагранжа полягала в тому, що кометні ядра вивергаються вулканами, що діють на цих планетах. Те, що Юпітер та Сатурн – газові утворення, а тому не мають твердої поверхні, на якій могла б мати місце вулканічна активність, тоді ще не знали. Тому головне заперечення проти еруптивної гіпотези Лагранжа полягало в тому, що сила тяжіння на “поверхні” цих планет надто велика, щоб якийсь вулкан спромігся викинути в космос тіло кілометрових розмірів.

С.К.Всехсвятський [11, 12] зрозумів, що наявність серед короткоперіодичних комет сімей Юпітера та Сатурна зовсім не свідчить про те, що комети викидають самі планети. Ці планети мають чимало супутників, де сила тяжіння на поверхні відносно мала, а тому вулкан може дійсно викинути у космос кометне ядро. Коли Всехсвятський висунув цю ідею, вулканізм на супутниках планет був ще невідомий. Навіть кратери на Місяці астрономи вважали виключно метеоритними. Вулкани на супутнику Юпітера Іо (рис. 2, 4) стали відомі лише після місії апарату Вояджер у 1979 р. Не дивно, що ідею Всехсвятського зустріли скептично. Критики еруптивної гіпотези наголошували, що джерело енергії для потужного вулканічного виверження на супутнику планети невідоме.

Необхідне джерело енергії вказав Е.М.Дробишевський [13, 14], який звернув увагу на те, що супутник Юпітера Іо обертається в межах потужної магнітосфери цієї планети. Внаслідок руху Іо у магнітному полі напруженістю \vec{H} з швидкістю \vec{v} в її тілі індукується електричне поле, а відтак і електричний струм густиною

$$j = \sigma E = \sigma \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{H}, \quad (3)$$

де σ – електропровідність забрудненої водяної криги, яка є протонним напівпровідником, у надрах супутника. Якщо Іо мала колись її значні запаси, то наслідком електричного струму мав бути електроліз з утворенням вибухової суміші молекулярного водню та кисню:



Оцінки Дробишевського показують, що кількісно все гаразд. Струму вистачає і вибухівка має досить енергії для викидання у космічний простір тіла завбільшки з типове ядро комети. Таким чином, з'ясувалося, що шляхом вивержень могли утворитися принаймні короткоперіодичні комети. Звичайно мається на увазі, що масові виверження комет зараз не відбуваються. Вони мали місце, коли супутники планет-гігантів, тобто не лише Іо, але й інші, мали достатню кількість залишкової водяної криги у своїх надрах. При цьому цікаво, що, як з'ясував Дробишевський [5] на підставі результатів Конопльової [3] кометна сім'я Юпітера старша за сім'ю Сатурна, оскільки розподіл комет родини Юпітера за віддалями комета-планета вже рівноважний, а для Сатурна ні.



Рис. 4. Гігантський вулкан Пеле на Іо, оточений кільцем із сполук сірки (зображення, отримане апаратом Galileo). Видно темну область Локи ліворуч знизу від Пеле.

5. ЕВОЛЮЦІЙНА ГІПОТЕЗА

Вперше звернув увагу на те, що кометні ядра могли утворитися на стадії формування Сонячної системи, Ольберс. На той час це було лише якісне міркування, але згодом були розраховані, починаючи з праць Камерона [15, 16], кількісні моделі космогонічного процесу, в якому виникло Сонце та інші тіла Сонячної системи. На початку існувала газопилова хмара приблизно сферичної форми, що повільно оберталася навколо власної осі.

Далі поблизу цієї протопланетної хмари спалахнула нова зірка, що мало наслідком стиснення протопланетної хмари. Оскільки зменшення розмірів дає зменшення моменту інерції, а добуток моменту інерції на кутову швидкість, тобто момент імпульсу $L = I\omega = \text{const}$ є величиною сталою, то збільшується кутова швидкість протопланетної хмари. Під дією відцентрової сили хмара набуває форми млинця, тобто сплющується. Більша її частина стискається до центру, а менша, на яку припадає переважна частка моменту імпульсу, утворює щось подібне за формою до сочевиці. Зрештою у центральній частині утворюється Протосонце, яке на початковій стадії світить за рахунок енергії,

що вивільняється у процесі гравітаційного стискання (рис. 5).

Далі внаслідок гравітаційної нестабільності плоска частина протопланетної хмари розпадається на окремі згущення. Так починається утворення планет. Світло і гравітація Протосонця викликають неоднорідність хімічного складу протопланетної хмари. Пил переважно “засмоктується” до внутрішніх частин хмари за рахунок ефекту Пойтинга–Робертсона. Ефект цей полягає в тому, що по відношенню до порошинки, яка рухається навколо Протосонця приблизно коловою орбітою, світло падає не в радіальному напрямі від Сонця, але під деяким невеликим кутом до радіус-вектора. Це явище називається аберацією світла. Тангенс кута аберації приблизно дрівнює відношенню трансверсальної швидкості орбітального руху порошинки до швидкості світла: $\text{tg } \alpha_{ab} \approx v/c$. Через це тиск світла на порошинки завжди має складову, спрямовану проти трансверсального руху частинки. Ця складова зменшує момент імпульса частинки, примушуючи її рухатися спіраллю, що згортається до Сонця. Отже у внутрішніх частинах протопланетної хмари маємо умови для створення планет земного типу, які складаються з мінеральних речовин.

Щодо легких і легколетючих речовин (водень, гелій, вуглеводні, оксиди кисню тощо), то вони світловим тиском відштовхуються на периферію. Таким чином на периферії акумулюються тіла з летючих речовин, які через низьку температуру перебувають у твердому стані, але та їх частина, що акумулювалася в найбільшій планеті (Юпітер та Сатурн), які розігріті гравітаційним стисканням, переходить у газовий стан.

Формування ядер комет

На периферії Сонячної системи, таким чином, створюються умови для росту малих крижаних тіл, в яких мінеральна складова поступається вмістом складовій крижаний. Через відносно малу густину речовини у протосонячній туманності на відстанях у кілька сотен або тисяч астрономічних одиниць там утворюються переважно малі тіла. Стадії формування:

1. Конденсація водяної пари на мінеральних порошинках.
2. Конденсація пари NH_3 на порошинках, що утворилися на попередній стадії.
3. Послідовна конденсація CO_2 , CO , C_2H_2 , CH_4 та ін. молекул.
4. Радіаційна полімеризація органічних речовин з утворенням СНОН-частинок.
5. Коагуляція усіх мікрокрижинок у макроскопічні тіла (кометезималі).
6. Злипання кометезималей під час непружних зіткнень на навздогінних курсах з утворенням несферичних ядер комет.

Конденсація

Зростання маси порошинки за рахунок конденсації H_2O описується рівнянням

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi a^3 \rho_{\text{ice}} \right) = \frac{4 \pi a^2 m_{\text{H}_2\text{O}} (p_{\text{H}_2\text{O}} - p_{\text{sat}}(T))}{\sqrt{2 \pi m_{\text{H}_2\text{O}} k T}} \quad (5)$$

де a — радіус порошинки, ρ_{ice} — густина льоду, $p_{\text{H}_2\text{O}}$ та $p_{\text{sat}}(T)$ — тиск водяної пари в туманності та тиск насиченої пари за температури T , $m_{\text{H}_2\text{O}}$ — маса молекули води, k — константа Больцмана.

Виснаження туманності описує рівняння

$$m_{\text{H}_2\text{O}} \frac{dn_{\text{H}_2\text{O}}}{dt} = -n_* \frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi a^3 \rho_{\text{ice}} \right) \quad (6)$$

де $n_{\text{H}_2\text{O}}$ та n_* — числова густина водяної пари та зародків конденсації відповідно.

Мікрокрижинка доросте до радіусу a_∞

$$a_\infty^3 = a_*^3 + \frac{3m_{\text{H}_2\text{O}}}{4\pi\rho_{\text{ice}}} \cdot \frac{n_0 - n_{\text{sat}}}{n_*} \quad (7)$$

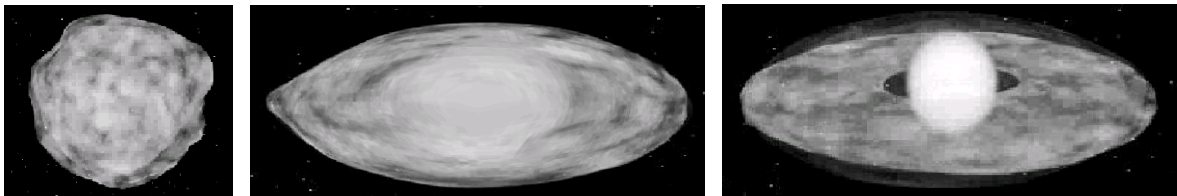


Рис. 5. Еволюція первинної туманності до утворення Протосонця

за час $\sim 1.5\tau_o$, де

$$\tau_o = \left(\frac{4}{3} \pi a_\infty^2 n_\star \sqrt{\frac{kT}{2\pi m_{H_2O}}} \right)^{-1} = \frac{\rho_{dust} a_\star^3 \sqrt{2\pi m_{H_2O}}}{z_{dust} m_n n_n a_\infty^2 \sqrt{kT}} \quad (8)$$

При $a_\star = 10^{-4}$ см, $z_{dust} = 10^{-5}$, маємо $1.5\tau_o \sim 10^7$ с ~ 1 рік, $a_\infty \approx 19a_\star$.

Результат конденсації – багаточарові частинки (рис. 7), які свого часу розглядав Гринберг. Послідовна конденсація йде у порядку збільшення тиску насиченої пари речовин для температури конденсації.

Співвідношення (7) та (8) описують весь каскадний процес конденсації. Треба тільки для кожної стадії замість a_\star ставити радіус, якого досягла мікрокрижинка на попередній стадії конденсації. Насправді намальована картина дещо ідеалізована, оскільки завжди існує ймовірність захоплення у тверду фазу не тієї речовини, яка зараз конденсується, а й більш летючої. Тобто границі між різними шарами багаточарової мікрокрижинки трохи розмиті. З викладених міркувань також ясно: чим далі від Сонця формувалося ядро комети, тим меншим є відносний вміст мінеральної складової. Ще один висновок – стадія конденсації дуже швидка у космогонічній шкалі часу. Можна вважати, що конденсація летючих речовин на мінеральному пилу відбувається практично миттєво, тобто крім таких газів, як водень, азот та гелій, практично всі молекулярні гази сконденсуються на порошинках. Щодо кисню, то як хімічно дуже активна речовина він не існуватиме у чистому вигляді, а входить до складу сполук.

Коагуляція та агрегація

Далі розпочинається процес коагуляції мікрокрижинок у макроскопічні тіла. Він іде значно повільніше за конденсацію. Відносні швидкості мікрокрижинок досить малі, оскільки вони переважно рухаються у напрямі обертання протопланетної хмари. Через це їх зіткнення непружні і призводять до злипання. Характерний час процесу коагуляції можна оцінити із співвідношення

$$\tau_{coag} = \frac{1}{\sigma_{grain} v_{rel}} \quad (9)$$

де σ_{grain} – переріз порошинки, а v_{rel} – середня відносна швидкість порошинок. Процес коагуляції схематично показаний на рис. 8.

У коагуляції беруть участь мікрокрижинки різних розмірів, тобто й ті, що вже є результатом

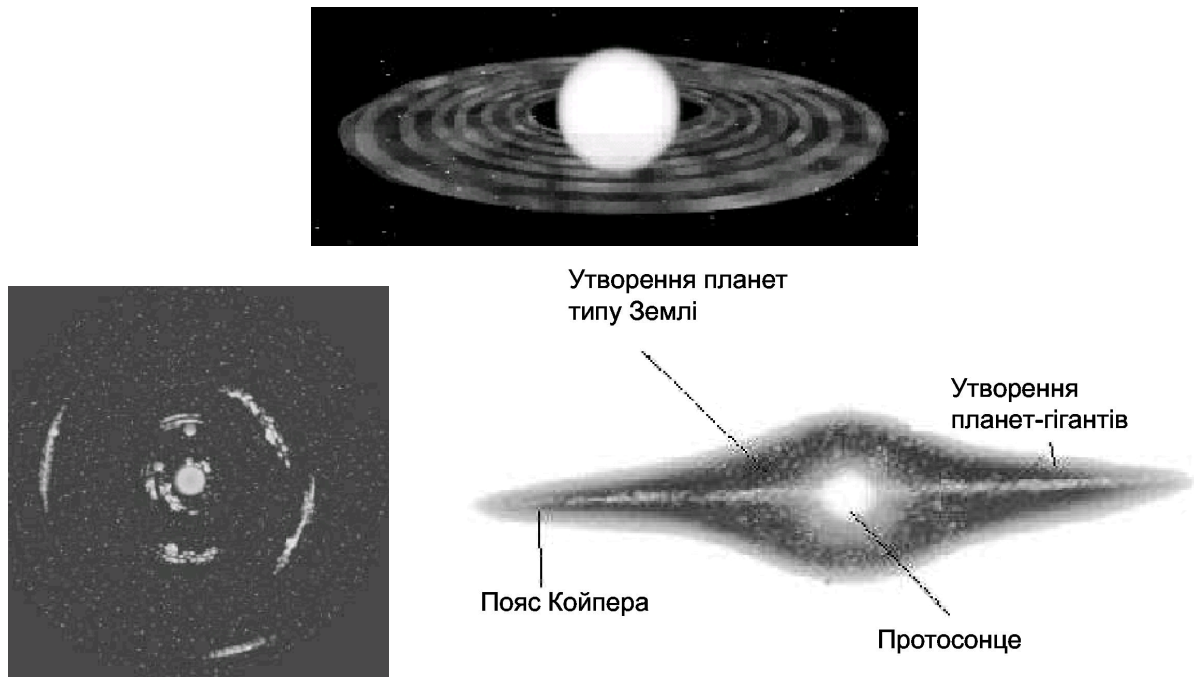


Рис. 6. Утворення планет і кометних ядер

Таблиця 1. Енергетичний ефект гідратації, еВ

Іон	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$	$n = 6$	$n = 7$
$\text{H}_3\text{O}^+ \cdot (\text{H}_2\text{O})_n$	1.56	0.97	0.74	0.67	0.67	0.61	0.45
$\text{OH}^- \cdot (\text{H}_2\text{O})_n$	1.1	0.71	0.66	0.62	0.61	?	?

попередньої коагуляції. Останній етап коагуляції варто розглядати як окремий процес — процес агрегації, коли непружно стикаються два макроскопічні доволі великі тіла. Результат такого зіткнення (рис. 9) — несферичне ядро комети.

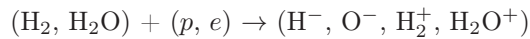
Описаний у даному розділі процес йде в межах трансплутонкової області первинної туманності, тобто у так званому поясі Койпера (рис. 6).

6. ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЯДЕР КОМЕТ

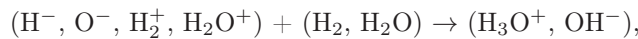
У кометній космогонії слід зважати на деякі особливості процесу формування ядер комет:

- Сонце — зоря типу Т Тау. Його основне джерело енергії — гравітаційне стискання. Атмосфера перебуває в стані турбулентності. Стадія супроводжується інтенсивним витокм речовини в навколишній простір.
- Надзвичайно інтенсивний Сонячний вітер: $\sim 1.5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ на віддалі 1 а.о. від Сонця, тобто $\sim 2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ на віддалі $\sim 10^2$ а.о.

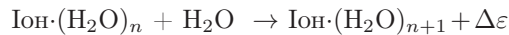
У протопланетній хмарі переважають молекули H_2 та H_2O , які іонізуються за схемою (p та e — позначення протона та електрона):



У процесі міжмолекулярних зіткнень виживають найстійкіші іони



які далі гідратуються шляхом послідовного приєднання молекул води:



де $\Delta\varepsilon$ — енергетичний ефект гідратації, який подано в таблиці 1.

Як бачимо, процес гідратації енергетично надзвичайно вигідний, тобто потенційна яма куди потрапляє приєднана молекула води досить глибока. Це означає, що іонно-молекулярний кластер — стійка конструкція. Можна якісно уявляти собі, що нейтральні молекули води, що оточили молекулярний іон, наче створюють навколо нього ізоляційну оболонку, яка запобігає рекомбінації навіть коли зіткнуться два кластери протилежних зарядів.

Звичайно, якщо енергія під час зіткнення буде недостатня для подолання потенційного бар'єру заввишки приблизно 0.5 еВ. Стійкість іонно-молекулярних кластерів перевірено в експериментах

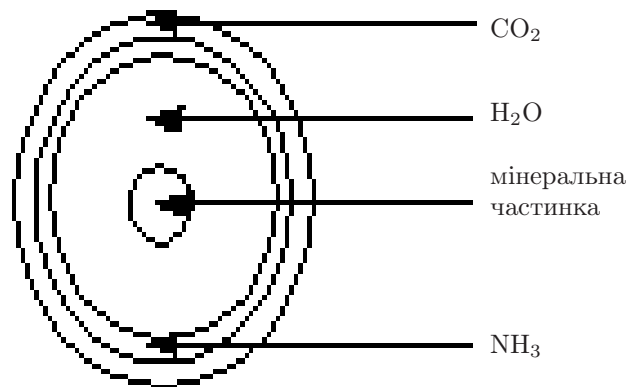


Рис. 7. Багатошарова мікрокрижинка

Г.Зацепіної [17]. В кризі створювалися кластери, мічені певними ізотопами кисню та водню. Виявилося, що кластер рухається крізь кристалічну ґратку водяної криги як єдине ціле. Альтернативна гіпотеза, ніби він рухається шляхом обміну молекулами води з кристалом, не підтвердилася.

Насправді з точки зору квантової механіки все складніше. Квантово-механічні розрахунки структури кластерів (рис. 10) показали, що вони не мають сферичної форми. Форма їх визначається мінімумом потенційної енергії. Вона може бути різною. "Ізоляційні властивості" приєднаних молекул води виявляються в тому, що зайвий негативний або позитивний електричний заряд певним чином розподіляється між атомами, тобто ймовірність локалізації зайвого електрона або зайвого протона таким чином, щоб вони могли з'єднатися, виявляється досить малою.

Рекомбінація іонів вивільняє енергію (енергія рекомбінації зарядів плюс енергія рекомбінації молекули води мінус енергія, яка йде на зруйнування гідратної оболонки):



Характерний час τ_{heat} , за який прогріється шар завтовшки h з коефіцієнтом теплопровідності κ , є

$$\tau_{\text{heat}} = \frac{h^2}{\kappa}, \quad (11)$$

а час сублимації цього шару з густиною ρ , якщо питома газопродуктивність дорівнює Z , є

$$\tau_{\text{subl}} = \frac{h\rho}{m_{\text{H}_2\text{O}}Z} \quad (12)$$

У квазістаціонарному режимі $\tau_{\text{heat}} = \tau_{\text{subl}}$, звідки ефективна товщина поверхневого шару h_{eff} (коефіцієнт теплопровідності $K = \frac{\kappa}{\rho C}$, C — теплоємність) визначається співвідношенням

$$h_{\text{eff}} = \frac{K}{m_{\text{H}_2\text{O}}CZ}. \quad (13)$$

У цьому режимі поверхневий шар, в якому відбувається рекомбінація кластерів з додатковим нагріванням встигає повністю випаритися. Видно, що товщина поверхневого шару (13), де діє власне джерело енергії швидко зменшується з наближенням до Сонця.

Розглянемо два граничні випадки:

1. Далека комета, газопродуктивність Z мала, тобто $h_{\text{eff}} \gg r_{\text{ядра}}$. У цьому випадку ядро комети практично ізотермічне. Його температура наближено описується рівнянням

$$C \frac{dT}{dt} = \frac{x\Delta\varepsilon \cdot \rho_{\text{nucl}}}{m_{\text{H}_2\text{O}}\tau} - \frac{3}{r_{\text{nucl}}} (1-A)\sigma T^4 + ZL - \frac{q(1-A)}{r_{\text{com}}^2}, \quad (14)$$

де ρ_{nucl} , T та L — густина, температура ядра та енергія сублимації, A та r_{nucl} — його альbedo та радіус, r_{com} — геліоцентрична віддаль комети, а x — відносний вміст кластерів, тобто частка молекул

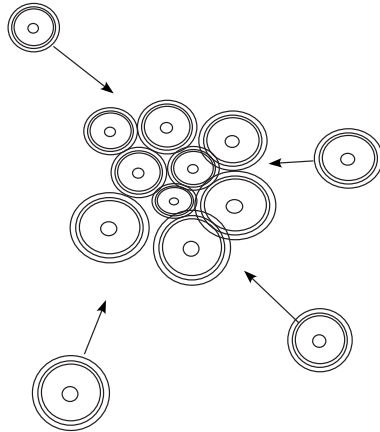


Рис. 8. Зростання кометезималі у процесі коагуляції

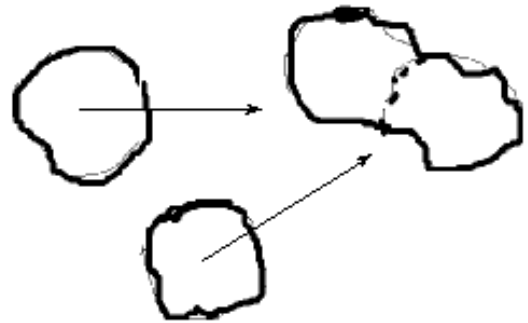


Рис. 9. Агрегація кометезималей у ядра комет

води, які є у ядрі у вигляді гідратованих іонів. Темп вивільнення енергії в процесі рекомбінації кластерів визначається співвідношенням

$$\tau = \tau_{\infty} e^{\frac{B}{kT}}, \quad (15)$$

де τ_{∞} та B — час релаксації за нескінченної температури та енергія активації процесу релаксації. Експериментальні значення цих параметрів невідомі, але непрямим шляхом їх можна оцінити. Але з умови, що додаткове нагрівання стає непомітним на віддальх $r_{\text{com}} < 2$ а.о. (див. пояснення нижче), маємо $\tau_{\infty} \approx 4.6 \cdot 10^{-5}$ с та $B \approx 5680$ К. Якщо покласти у рівнянні (14) $\frac{dT}{dt} = 0$, отримаємо дві точки температурної рівноваги: стійку низькотемпературну та нестійку високотемпературну. Оскільки рекомбінація кластерів вивільняє енергію (10), якої досить для випаровування ~ 20 молекул води, а швидкість рекомбінації кластерів сильно залежить від температури, ясно, що при деякому надкритичному вмісті кластерів можливий вибух. Перехід з низько- до високотемпературного стану із вибухом ймовірніше відбувається в транскітеріанській зоні.

2. Близька комета — $h_{\text{eff}} \ll r_{\text{ядра}}$. У такій кометі внутрішні джерела діють лише у тонкому поверхневому шарі, тобто можна вважати, що

$$\frac{q(1-A)}{r_{\text{com}}^2} = \varepsilon \sigma T^4 + Z(L - \Delta x \Delta \varepsilon). \quad (16)$$

Бачимо, що в даному випадку теплота сублимації наче зменшується на величину $\Delta \varepsilon \Delta x$, де Δx — зміна концентрації кластерів при випаровуванні слоя. З наближенням до Сонця $\Delta x \rightarrow 0$, тобто шар сублимує до рекомбінації кластерів і їх присутність стає непомітною.

7. МАРГІНАЛЬНІ ГІПОТЕЗИ ПРО ПОХОДЖЕННЯ КОМЕТ

До таких належать:

1. Гіпотеза про міжзоряне походження комет.

Ця гіпотеза не витримує критики через занадто малу густину речовини у міжзоряному просторі. Наявність у кометах молекул, які спостерігаються у міжзоряному середовищі, не може слугувати за доказ, бо ці ж молекули напевно входили до складу протопланетної туманності.

2. Гіпотеза Альвена та Арреніуса про народження комет в метеорних потоках.

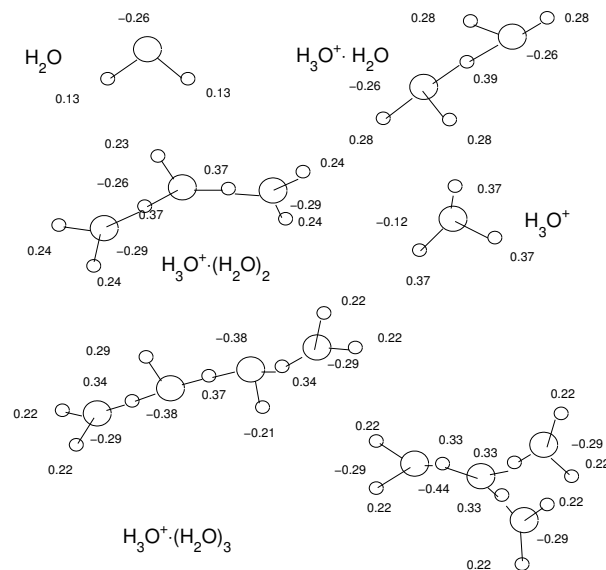


Рис. 10. Структура деяких позитивних іонно-молекулярних кластерів. Великі кружочки — атоми кисню, малі — атоми водню. Цифри біля атомів — електричний заряд. Для кластера з трьома молекулами води подано два варіанти.

Гіпотеза не витримує критики, бо метеороїди та комети мають принципово різний хімічний склад. Метеорна речовина — тугоплавкі мінерали та метали, а кометні ядра — крижані утворення.

3. Гіпотеза Давидова про виникнення комет при припливному розпаді астероїдів, які мають всередині лід.

Деякі астероїди ймовірно є мертвими кометами, тобто крижаними ядрами, які вкриті пиловим шаром, а тому втратили можливість утворювати атмосфери. Припливна фрагментація таких тіл здатна повернути їх до існування в якості комет. Проте, цей процес не може вважатися механізмом походження комет, бо є фактично механізмом їх реанімації.

8. ВИСНОВКИ

З вищенаведеного розгляду читачеві ясно, що автор схиляється до еволюційного механізму походження комет. Дійсно, бажано ми цього, чи ні, але процес формування Сонячної системи ніяк не міг обминути виникнення в поясі Койпера малих несферичних крижаних з домішками пилу тіл. Насьогодні відкрито кількості об'єктів, які належать до поясу Койпера. Отже пояс Койпера — реальність. На відміну від гіпотетичної хмари Оорта, де орбіти кометних ядер є еліпсами з перигеліями в зоні Юпітера, а афеліями у хмарі Оорта, кометні ядра в поясі Койпера повинні мати приблизно колові орбіти, що цілком лежать в цьому поясі.

З цієї обставини впливає головне утруднення еволюційної гіпотези. Кометне ядро дуже важко спрямувати з поясу Койпера до внутрішньої частини Сонячної системи. Важко тому, що міжзор'яні збурення у поясі Койпера, так само як і збурення від відомих планет Сонячної системи надто малі у порівнянні з тяжінням до Сонця. Для трансформації орбіти тіла у поясі Койпера необхідно існування однієї чи кількох трансплутонів планет, тобто тіл, які обертаються навколо Сонця у самому поясі Койпера та мають достатньо велику масу, щоб під час тісних зближень істотно змінити орбіту ядра комети, спрямувавши останнє у внутрішню зону Сонячної системи.

Проблема існування трансплутонів планет неодноразово обговорювалася в літературі. Зокрема на можливість існування двох таких планет вказав А.С.Гулієв [18]. Пошук та виявлення таких планет — надзвичайно важка спостережувальна задача, бо йдеться про об'єкти, які не лише гранично слабкі (>22 зор. вел.), але й надзвичайно повільно переміщуються небом, тобто їх важко відрізнити від зір. Попри ці обставини нещодавно в поясі Койпера відкрито об'єкт, маса якого значно більша за типову масу кометного ядра і одного порядку з масою Місяця. Вже таке тіло здатне при тісних зближеннях трансформувати орбіти об'єктів поясу Койпера. Ясно також, що можуть існувати і інші тіла з такими масами. Отже еволюційна теорія походження комет практично не зустрічає обґрунтованих заперечень.

Щодо гіпотези захоплення, то процес, до якого вона апелює, принципово можливий. В сучасному варіанті вибух планети Фаєтон замінено на гравітаційний викид Юпітером крижаних кометезімалей з зони свого живлення. Цим усунено розбіжність у хімічному складі, бо уламки Фаєтона могли б бути тільки мінеральними астероїдами, а не крижаними тілами — ядрами комет. Всехсвятський [19] одним з основних заперечень проти теорії захоплення висував міркування, що Юпітер має не захоплювати, а, навпаки, викидати малі тіла з Сонячної системи. Залишається також вже згадане зауваження Гулієва [18] щодо проблематичності існування самої хмари Оорта.

Після згаданих праць Дробішевського [13, 14] та відкриття вулканізму на супутниках планет стало ясно, що гіпотезу вивержень не можна зняти з розгляду. Принаймні деяка частина короткоперіодичних комет могла в минулому виникнути саме в такий спосіб. Ба більше, якщо серед комет є такі, де домінує не водяна крига, а тверді оксиди вуглецю, то такі тіла могли принципово сформуватися там, де є умови для рафінування речовин шляхом гравітаційної сепарації. Інакше дуже важко уявити, як могло б створитися космічне тіло з масивними включеннями CO чи CO₂. Схоже, що такі комети існують (напр., комета Морхауза 1908), і це можна вважати непрямим доказом вулканічного походження такого ядра.

Загалом бачимо, що різні ідеї про походження комет не є в непримиренному протиріччі. Колись астрономи вели дискусію про природу кратерів на Місяці. Думки розійшлися. Одні вважали, що кратери Місяця — виключно метеоритні, інші (меншість) припускали вулканічну природу цих утворень. Згодом з'ясувалося, що існують і ті й інші. Схожа ситуація і в кометній космогонії. Цілком можливо, що серед кометних ядер можна знайти тіла різного походження.

Подяка. Ця робота підтримана грантом Державного фонду фундаментальних досліджень Міністерства освіти і науки України.

1. *Бредихинъ О.* О хвостах кометъ. — Москва. В университетской типографіи. 1862. — 236 с.

2. Шульман Л.М. Ядра комет. — Москва: Физматлит, 1987. — 232 с.
3. Коноплева В.П. // Кометный циркуляр. — 1980. — №285. — С. 2.
4. Бабенко Ю.Г., Коноплева В.П. Каталог минимальных межорбитальных расстояний планета–комета / Деп. ВИНТИ, 1989.
5. Drobyshevski E.M. The young long-period comet family of Saturn // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2000. — **315**. — P. 517–520.
6. Laplace P.-S. Sur le comètes // Connaissance des temps pour l’an 1806, addition. — 1806. — **216**. — P. 213.
7. Oort J. The structure of the cloud of comets surrounding the Solar system, and a hypothesis concerning its origin // Bulletin of the astronomical institutes of Netherlands. — 1950. — **9**, №408.
8. Гулиев А.С. Космогонические характеристики систем периодических, промежуточных и долгопериодических комет: Автореф. дисс... д-ра наук / Киев, 1993.
9. Гулиев А.С., Дадашов А.С. О гипотезе Оорта // Кинематика и физика небесных тел. — 1985. — **1**, №6 — С. 82–87.
10. Lagrange J.L. Mémoire sur l’origine des comètes // Journal de physique, de chimie, d’histoire naturelle et les arts. — 1912. — **74**. — 228.
11. Vsekhsviatsky S.K. Zur Frag das Ursprunges der periodischen Kometen // Astronomisches Nachrichten. — 1930. — **240**. — P. 228.
12. Всехсвятский С.К. К вопросу о происхождении комет // Астрономический журнал. — 1948. — **25**, №4. — С.256.
13. Drobyshevski E.M. The origin of the Solar system: Implication for transplutonian planets and the nature of the long-periodic comets // Moon and Planets. — 1978. — **18**, №2. — P. 145.
14. Drobyshevski E.M. Magnetic field of Jupiter and volcanism and rotation of the Gallilean satellites // Nature. — 1979. — **282**, №5741. — P. 811.
15. Kameron A.G.W. Formation of Solar Nebula // Icarus. — 1973. — **18**, №1. — P. 339.
16. Kameron A.G.W. Accumulation process in the primitive Solar Nebula // Icarus. — 1973. — **18**, №3. — P. 377.
17. Зацепина Г.Н. К вопросу о движении ионов H_3O^+ и OH^- во льду и в воде // Журнал структурной химии. — **10**, №2. — С. 211–217.
18. Гулиев А.С. О возможности существования в зоне Нептун–Плутон неизвестной планеты // Кинематика и физика небесных тел. — 1987. — **3**, №2. — С. 28–33.
19. Всехсвятский С.К. Происхождение комет и метеорного вещества в Солнечной системе. — М.: Просвещение, 1967. — 183 с.

Надійшла до редакції 18.07.2003