

## ХАОС І ЕКОЛОГІЯ НАВКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТОРУ

*Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка*

Методом математичного моделювання проведено вивчення ролі хаотичних процесів космічного походження у виникненні на Землі кліматичних змін глобального характеру, спричинених ударними взаємодіями комет. Показано, що траєкторії руху комет постійно хаотично еволюціонують під впливом планет, що стає на заваді здійснення довготермінових прогнозів їхнього стану.

*Ключові слова:* детермінований хаос, аттрактор, моделювання, самоорганізація, комета, навколосземний простір.

Ю. В. Величко, Я. О. Борисюк, А. Т. Лобурець, С. А. Заїка

*Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка*

## ХАОС И ЭКОЛОГИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

Методом математического моделирования проведено изучение роли хаотических процессов космического происхождения в возникновении на Земле климатических изменений глобального характера, которые вызваны ударными взаимодействиями комет. Показано, что траектории движения комет постоянно хаотически эволюционируют под влиянием планет, что мешает осуществить долгосрочные прогнозы их состояния.

*Ключевые слова:* детерминированный хаос, аттрактор, моделирование, самоорганизация, комета, околоземное пространство.

Y. V. Velichko, Y. O. Borisyuk, A. T. Loburets, S. A. Zaika

*Y. Kondratyuk Poltava National Technological University*

## CHAOS AND ECOLOGY OF NEAR-EARTH SPACE

A role of cosmic chaotic processes for the origin on the Earth climate changes of global nature, which are caused by percussion interactions of comets, was analysed by mathematical modeling. It is shown that the trajectories of comets are constantly evolving randomly under the influence of the planets; that prevents to implement long-term predictions of their condition.

*Key words:* deterministic chaos, attractor, modeling, self-organization, comet, near-Earth space.

Космос – одна з тих незвіданих і маловідомих таємниць, яка завжди цікавила та манила людину своєю таємничістю і загадковістю. Цю таємницю і дотепер людство не може розгадати навіть попри, здавалося б, видатні досягнення в освоєнні Космосу. Космос безпосередньо через найближчий навколосземний простір постійно здійснює вплив на нашу планету, на все живе на Землі та людську цивілізацію. Цей простір, можливо, колись почне перетворюватися на зону розширення екологічної ніші людської цивілізації внаслідок її техногенного розвитку. Але він завжди буде для людства чужим, таким, що постійно несе небезпеки, а іноді і смертельні загрози. Достатньо подивитися у хороший бінокль на поверхню нашого найближчого космічного сусіда – Місяця, щоб розгледіти там велетенські астроблеми – зоряні рани. Аналогічні утворення існують і на поверхні планети Земля. Але тут потужні атмосферні процеси сприяють відносно швидкому руйнуванню кратерів ударного походження. В момент їхнього утворення виділяється величезна енергія, а об'єми викинутих в атмосферу газів і дрібнодисперсної твердої фази цілком достатні для зниження середньої температури на Землі на десятки градусів та глобального отруєння біоти (Гуров, 2002, 2003). Очевидно, що такі масштабні події здатні провокувати потужні тектонічні процеси та інтенсивну вулканічну діяльність (Баренбаум, 2009).

Існує багато різних свідчень глобальних катастрофічних подій у минулому Землі, але ми виділимо лише ті, що супроводжувалися швидким зникненням за геологічно короткий час величезної кількості біоти. Багато дослідників, слідуючи

ідеям детермінізму Лапласа, почали відшукувати періодичні закономірності вимирання біоти на Землі. Основним джерелом інформації для пошуку періодичності служили матеріали палеоекології (Vambach, 2004), що стосувалися розподілу у часі вимирання морських видів.

Метою нашої роботи є дослідження з використанням математичного моделювання ролі хаотичних процесів космічного походження у виникненні на планеті Земля катастрофічних кліматичних змін глобального характеру.

## **МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Для вивчення обраної проблеми нам довелося спочатку розглянути питання про хаос і порядок у динамічних системах. Було створено спеціальну програму для комп'ютерного моделювання динаміки планетних систем з метою в'яснення ролі хаосу у їхньому існуванні. Це потрібно для встановлення координат можливих катастрофічних подій, пов'язаних з балансуванням деяких космічних об'єктів Сонячної системи на межі хаосу і порядку. Про наявність хаосу у Сонячній системі можна довідатися з роботи І. І. Шевченка (2010), де акцентується увага на тому, що найменш стабільними космічними тілами є комети. Серйозний аналіз властивостей цих космічних об'єктів виконано у книзі А. К. Муртазова «Физические основы экологии околоземного пространства» (2008).

Відомо, що переважна більшість комет складається з твердого ядра, оточеного газо-пиловою оболонкою – комою. При наближенні комети до Сонця вона нагрівається і починає випаровуватися. Ядро складається з суміші льоду з вмороженими в ньому леткими речовинами та каміння. Розміри ядер комет іноді досягають 100 км, а періоди обертання комет навколо Сонця від кількох до 200 років і навіть більше. Є такі довгоперіодні комети із сімейства Крейца, орбіти яких в перигелії можуть проходити через зовнішню частину сонячної атмосфери. Як правило, вони завершають своє існування, падаючи на поверхню Сонця. Деякі комети приходять в Сонячну систему з міжзоряного простору чи, можливо, з хмари Оорта. До цього часу невідомі механізми їхнього виникнення. Відомо, що довгоперіодні параболічні комети в районі земної орбіти можуть мати відносні швидкості до 72 км/с і нести величезну кінетичну енергію. В їхньому русі завжди присутні елементи хаосу (Шевченко, 2010), тому важливо при вивченні еволюції таких об'єктів мати у своєму розпорядженні методику, яка дозволяє досліджувати динамічні системи на стійкість і оцінювати просторово-часові координати можливого виникнення катастрофічних змін їхнього стану.

## **РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ**

Для відпрацювання основних елементів методики і наглядного підтвердження сказаного вище розглянемо динаміку системи чотирьох тіл однакової маси, зв'язаних силами гравітації. Пов'яжемо початок абсолютної системи координат з нерухомим центром мас системи, що забезпечується відповідним вибором початкових умов. Це означає, що обов'язковою вимогою є рівність нулю головного вектора кількості руху та головного момента системи. Як видно з рис. 1, траєкторії руху тіл проявляють певну просторову симетрію, що є свідченням просторової структуризації системи, тобто наявності елементів порядку. З іншого боку, очевидним є хаос, притаманний цій системі. Вона балансує на грані хаосу і порядку, перебуваючи в стані очікування катастрофи. Як правило, такі системи є дуже чутливими до випадкових навіть дуже слабких збурень, коли ці збурення діють у відповідності до внутрішніх тенденцій системи. Не варто думати, що в природі не існує нічого подібного. Зовсім недавно у Космосі була виявлена система трьох зір HD 188753 з однією гігантською планетою, розташована на віддалі в 149 світлових років у сузір'ї Лебедя. Всі разом вони обертаються навколо спільного центра мас. Ця система теж є нестабільною, хоча передбачити момент її руйнування не просто. Реальна система чотирьох тіл відрізняється від розглянутої нами тим, що в ній мають враховуватися дуже слабкі сили взаємодії з видимими структурами Галактики, чи, можливо, з темною

речовиною, тобто, реальні системи не завжди можна вважати ізольованими. Особливо, коли це стосується спроб здійснення довготермінових прогнозів еволюції нестабільних об'єктів.

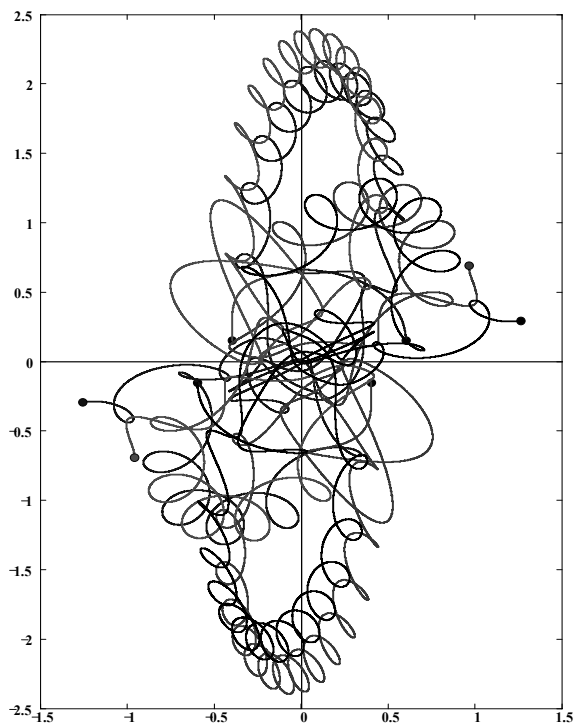


Рис. 1. Балансування чотирьох тіл на грані порядку і хаосу

На рис. 2 показано фазову траєкторію (а) та залежність від часу однієї із координат (б), розраховані нами для системи з детермінованим хаосом. Ця система нелінійних диференціальних рівнянь була складена Спроттом (Кузнецов, 2001). Тут фазова траєкторія, як і у випадку метеорологічних рівнянь Лоренца, утворює дивний атрактор. Цілком очевидно, що координати системи змінюються неперіодично, її еволюція носить хаотичний характер, а передбачити стан самої системи на тривалу перспективу, як і погоду, неможливо.

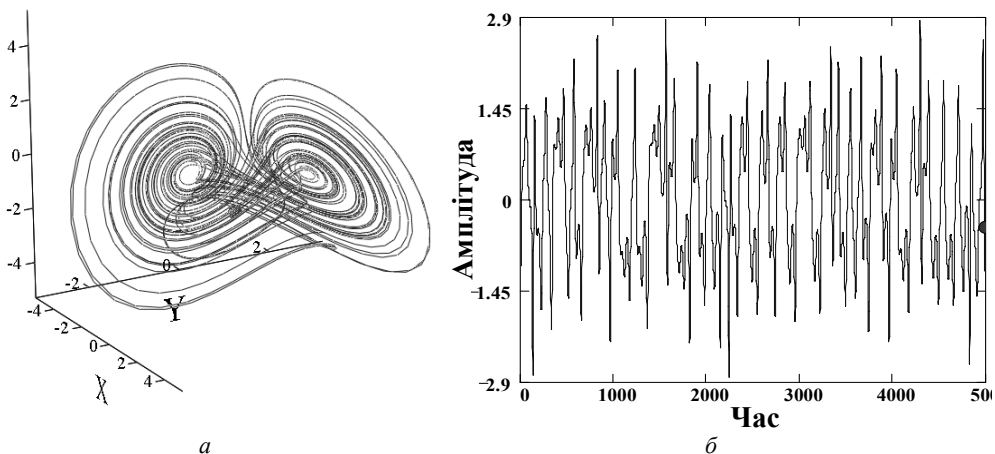
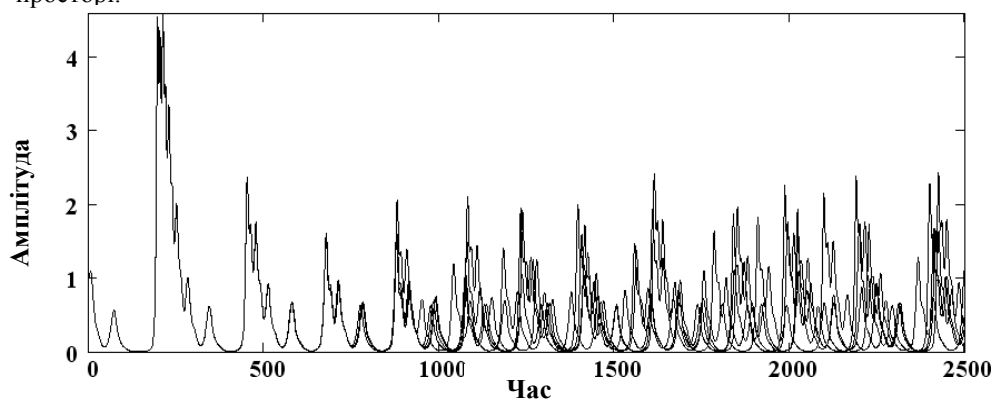


Рис. 2. Хаотична динаміка Спротта. Неперіодичність проявляється на фазовій траєкторії утворенням дивного атрактора (а). Хаотично змінюються з часом і координати точки (б)

Хаотичну динаміку можна виявити, спостерігаючи за характером траєкторій системи у фазовому просторі. Розглянемо, як на нелінійну систему впливають значення її стартових параметрів. Використовуючи одну із систем рівнянь Спротта, ми злегка змінювали початкові умови (менше 1 % від початкових значень). Спочатку система на це практично не реагує. Але з часом різні реалізації системи починають відходити одна від одної, і картина фазової траєкторії розмазується та стає непередбачуваною. Це показано на рис. 3. Аналогічні процеси відбуваються і тоді, коли на планетну систему протягом тривалого часу або постійно діють дуже слабкі сили від далеких об'єктів, складним чином розсосереджених у космічному просторі.



**Рис. 3** Висока чутливість динамічної системи до слабких збуджень робить її поведінку непередбачуваною

Проблему стійкості і нестійкості системи можна розглядати на основі поглядів Лагранжа, Пуассона чи Ляпунова. Стійкість за Ляпуновим характеризує фазову траєкторію з точки зору поведінки сусідніх траєкторій, що перебувають в деякому малому околі вибраної точки. Якщо всі вони в будь-який наступний момент часу залишаються близькими, то фазова траєкторія є стійкою за Ляпуновим. У випадку нестійкості фазові траєкторії розходяться за експонентним законом. Це наглядно демонструють нелінійні системи, що мають дивні атрактори (рис. 2). Для реалістичних динамічних систем ляпуновські показники можна розраховувати лише чисельно. Критерієм хаосу є існування додатного старшого ляпуновського показника.

В астрономії зараз доводиться переглядати старі уявлення Кеплера і Ньютона про стаціонарний рух планет навколо Сонця по своїх еліптичних орбітах. Виявляється, що довгостроковий прогноз для Сонячної системи теж є неможливим. Час, протягом якого можна з достатньою точністю передбачити стан Сонячної системи, є на три порядки меншим за час її існування (Шевченко, 2010). Сонячній системі притаманна наявність елементів хаосу, що забезпечує стійкість системи. Без участі подій хаотичного характеру є неможливою самоорганізація системи, її самозбалансування, стійкість до зовнішніх шумів, здатність змінюватися у відповідь на зміни навколишнього середовища. Будь-яка найменша неточність у початкових умовах пізніше може дуже сильно вплинути на наступний рух. Якщо система є схильною до катастроф, то виникає проблема визначення просторово-часових координат таких подій. Очевидно, дуже важливим параметром для людства є енергетична характеристика можливої катастрофи. Коли б до трагічних подій у Японії, що трапилися 11 березня 2011 року, були наперед відомими всі координати катастрофи тектонічного походження, то наслідки її були б не такими жахливими. Незважаючи на те, що для вивчення процесів, які протікають у надрах нашої планети, людство прикладає значні зусилля з використанням потужних засобів, результати, досягнуті на сьогодні у цьому напрямку, на превеликий жаль, все ще залишаються більше, ніж скромними.

Закони природи допускають для подій безліч різних наслідків, але наш світ має одну-єдину історію, яка не залежить від початкових умов. Це означає, що не існує

ніяких можливостей щось знову відтворити із того, що вже належить минулому. Адже те, що минуло, є наслідком випадкового збігу обставин. Точні фундаментальні закони діють не в ідеальному, а у реально існуючому світі. Тут будь-який нелінійний процес може супроводжуватися виникненням гігантських флуктуацій і біфуркацій на фазових траєкторіях, тобто, розвилок на шляху еволюції, де система раптово перекидається на ту або іншу гілку розвитку. В цій ситуації взагалі неможливо передбачити наступний результат, оскільки вибір напрямку еволюції системи в момент біфуркації визначається волею випадку.

Використовуючи створену нами модель планетної системи, ми дослідили рух деякого гіпотетичного космічного тіла з параметрами, близькими до параметрів комети Галлея. Реальна комета Галлея обертається по сильно витягнутій еліптичній орбіті зі змінним періодом від 74 до 79 років. Варіації періоду і орбітальних елементів, в першу чергу, пов'язані з гравітаційним впливом планет, мимо яких іноді проходить комета. Цікаво простежити за характером еволюції траєкторії цієї комети. Як впливає з наших розрахунків, доля комети критично залежить від конфігурації планет у Сонячній системі в момент появи комети. Суть комп'ютерного експерименту полягала в тому, що спочатку запускалася модель планетної системи, а потім в одній і тій же точці простору у різні моменти часу, віддалені один від одного на сотні років, з однаковими векторами швидкостей з'являлися комети. Характер їхньої еволюції завжди був абсолютно різним. Різкі зміни параметрів еліптичної орбіти відбуваються за дуже короткий час у випадку проходження комети на близькій віддалі від однієї з планет. По суті, це є точка біфуркації. Стан комети різко змінюється, а результати розрахунків сильно залежать від точності їх проведення. На рис. 4 чітко видно, що в деякі моменти часу відбуваються стрибкоподібні зміни орієнтації і величин великих півосей еліпсів орбіти. У моделі було враховано гравітаційні поля відповідно Землі та планет-гігантів: Юпітера, Сатурна, Урана і Нептуна. Впливом малих планет на комету ми знехтували. Як видно, динамічні характеристики комети змінюються то плавно, то стрибкоподібно. Мається на увазі значення ексцентриситету та орієнтації великої півосі у просторі.

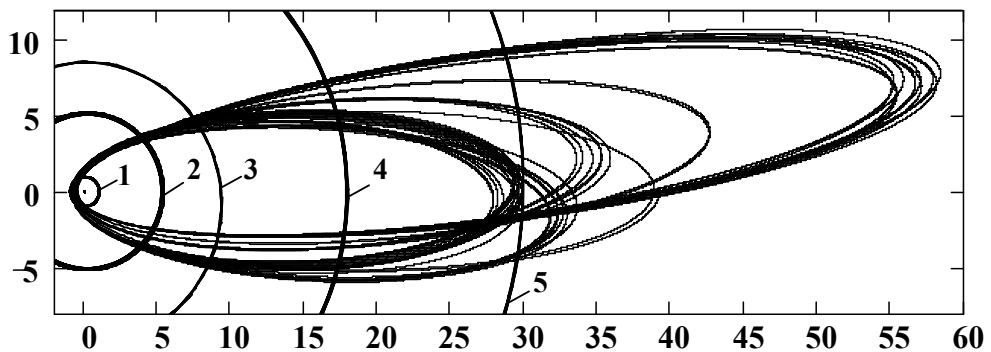


Рис. 4. Еволюція траєкторії гіпотетичної комети з параметрами руху, близькими до параметрів комети Галлея. Віддалі вказані в астрономічних одиницях.

Цифрами позначені траєкторії:

1 – Земля; 2 – Юпітер; 3 – Сатурн; 4 – Уран; 5 – Нептун

На рис. 5 показано фазову траєкторію комети. На ній виділяються аттрактори у вигляді груп кривих ліній. Переходи від одного аттрактора до іншого визначаються близькими проходженнями комети повз планети-гіганти. На вставці показано один з таких переходів комети внаслідок взаємодії з планетою Сатурн. Ми спостерігали варіанти, коли комета гравітаційними силами викидалася за межі пояса Койпера, перетворювалася в результаті взаємодії з Юпітером на короткоперіодичну чи переходила в розряд комет Крейца. На космічні тіла, крім розглянутих нами, можуть діяти й інші сили. Наприклад, при наближенні комети до Сонця її обернена до нього сторона розігрівається і починає викидати струмини газу та пилу як реактивний

двигун, що пригальмовує рух комети. Зростає тиск світла та іонних потоків від Сонця. Результуючий ефект може навіть залежати від форми кометного ядра. Існують інші, хоча й слабкі, фактори, що вносять елементи невизначеності в параметри руху комети, істотно звужуючи горизонти прогнозу її стану.

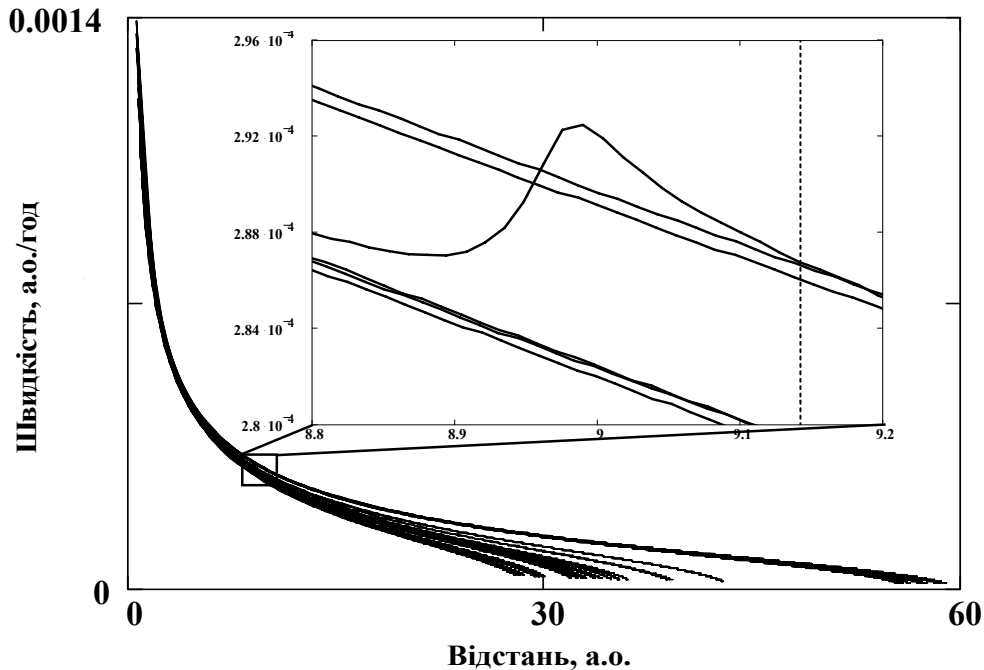


Рис. 5. Фазова траєкторія гіпотетичної комети. На вставці показано її перехід на новий аттрактор після взаємодії із Сатурном

Комети і астероїди падають не тільки на Сонце. Численні кратери знайдено майже на всіх космічних тілах, поверхні яких досліджувалися різними засобами. Нещодавно було виявлено ще одну астроблему на нашій планеті. Кратер діаметром 480 км і віком близько 250 мегароків знайдено під льодовиковим щитом Антарктики. Його знайшли за допомогою супутників GRACE (NASA) під час проведення гравітаційних вимірювань ([www.sciencedaily.com](http://www.sciencedaily.com)). Ці вимірювання виявили гігантський масив геологічного матеріалу мантії Землі (маскон) на поверхні кори планети. Час зіткнення метеорита із Землею збігається з періодом катастрофічного зникнення видів у пермсько-тріасову епоху та потужними процесами трапового магматизму. Крім того, розмір (близько 50 км) і місце розташування кратера (Земля Уїлкса) дозволяють припустити, що саме це зіткнення із гігантським метеоритом розкололо древній суперконтинент Гондвану. Зіткнення з таким величезним небесним тілом неминуче мало призвести до глобальних змін клімату на планеті, які стали смертельними для переважної більшості видів живих організмів.

### ВИСНОВКИ

Густа атмосфера і наявність великої кількості води на нашій планеті є причиною швидкого руйнування характерних структур астроблем навіть циклопічних розмірів. Тому лише в процесі освоєння Космосу люди зрозуміли, що планета Земля нічим не відрізняється від інших космічних тіл і є такою ж вразливою до космічних бомбардувань, як і ті планети, де немає життя. Найбільш нестабільними і непередбачуваними об'єктами Сонячної системи є комети. Їхні траєкторії внаслідок гравітаційних впливів, в першу чергу – планет-гігантів, постійно еволюціонують у хаотичному режимі. Це не дозволяє здійснювати з достатньою точністю довготермінову оцінку наслідків їхньої еволюції, яка може закінчуватися імпактною взаємодією. Переорана ударними кратерами зворотна сторона нашого найближчого

космічного сусіда Місяця дає дуже хорошу інформацію для роздумів про минулість всього сущого і про важливість проведення наукових робіт, направлених на одержання відповіді на дуже не прості питання про вплив Космосу на екологію планети Земля і пошуки інформації про координати можливих катастроф, в тому числі і космічного походження.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- Баренбаум А. А.** Трапповый магматизм на восточно-европейской платформе как следствие нагрева астеносферы галактическими кометами / А. А. Баренбаум, Т. И. Шиловская, А. П. Шиловский // Вестник Отделения наук о Земле РАН. – 2009. – Т. 27, № 1. – С. 1-3.
- Гуров Е.** Катастрофа, яка змінила геологічну еру / Е. Гуров, П. Гожик // Вісник НАН України. – 2003. – № 9. – С. 46-53.
- Гуров Е. П.** Импактное кратерообразование на поверхности Земли / Е. П. Гуров // Геофизический журнал. – 2002. – Т. 24, № 6. – С. 3-35.
- Кузнецов С. П.** Динамический хаос (курс лекций) / С. П. Кузнецов. – М. : Издательство физико-математической литературы, 2001. – 296 с.
- Муртазов А. К.** Физические основы экологии околоземного пространства / А. К. Муртазов. – Рязань : Наука, 2008. – 201 с.
- Шевченко И. И.** Непредсказуемые орбиты / И. И. Шевченко // Природа. – 2010. – № 4. – С. 12-21.
- Vambach R. K.** Origination, extinction, and mass depletions of marine diversity / R. K. Vambach, A. H. Knoll, S. C. Wang // Paleobiology. – Vol. 30, № 4. – 2004. – P. 522-542.  
<http://www.sciencedaily.com/releases/2006/06/060601174729.html>.

*Надійшла до редколегії 14.07.11*