

Фрактальна парадигма – новий підхід до формування сучасного фахівця-фізика

Обговорено фрактальну парадигму, пояснено сутність фрактального світогляду. На прикладі курсу «Фрактальна фізика» продемонстровано один із можливих варіантів початку «фракталізації» фізичної освіти на рівні магістерської підготовки сучасних фахівців. Обґрунтовується необхідність і доцільність створення спеціалізації «Фрактальна фізика» у межах спеціальності 104 – «Фізика та астрономія», окреслено можливі перспективи розвитку цієї спеціалізації упродовж найближчих років.

Ключові слова: фрактальна фізика, фрактальна парадигма, фрактальний світогляд, підготовка сучасного фахівця, нова спеціалізація.

Протягом багатьох років однією з найголовніших математичних підвалин підготовки фахівців у галузі фізики традиційно була геометрія Евкліда. Більш того, саме на геометрії Евкліда побудовано взагалі всю класичну фізику, оскільки основою інтуїтивного сприйняття геометрії природи завжди слугували евклідові прямі, кола, сфери, тетраедри та ін. За їхньої допомоги протягом тривалого часу вдавалося будувати несуперечливі й ефективні моделі реальних явищ, процесів та об'єктів із навколишнього світу [1–3, 6, 7, 11, 12].

З іншого боку, добре відомо, що будь-які моделі ніколи не є тотожними самому об'єктові, а лише відображають його найважливіші (на думку автора моделі) властивості. Натомість велика кількість «неважливих» властивостей завжди залишається «поза кадром», оскільки у створеній моделі їх просто немає. Отже, експерименти та висновки теорії, побудованої на такій моделі, лише частково нагадують можливу взаємодію із самим реальним об'єктом. Зрозуміло, що й результати цих досліджень виявляються досить обмеженими. Отже, якість моделі визначається саме тим, чи влаштовують дослідника отримані ним результати, чи ні. У другому випадку модель потребує змін.

Саме так вийшло і з геометрією Евкліда. За багато століть на її основі було створено майже досконалий математичний апарат, що є фундаментом сучасної науки й, зокрема, фізики. Але основна проблема полягає у тому, що у навколишньому світі ідеальних об'єктів із геометрії Евкліда просто не існує [1–3, 6–12, 14, 15, 19]. Приклад цього наведено на рис. 1, із якого видно, що фрактальна модель більш адекватно відображає властивості реального об'єкта, ніж модель за Евклідом.

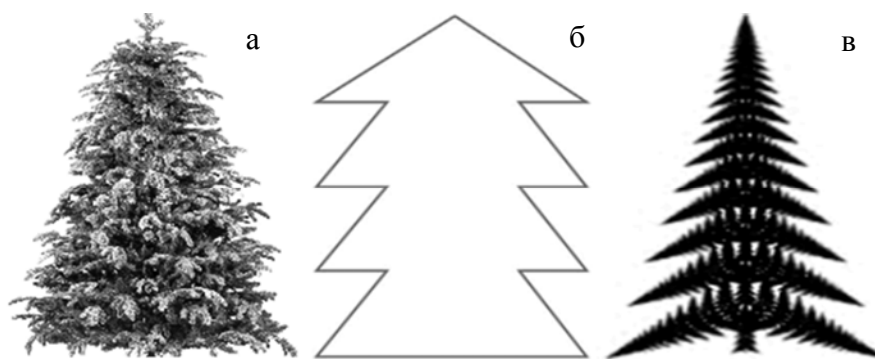


Рис. 1. Відмінність реального об'єкта (а) від його ідеалізації за Евклідом (б) та за фрактальними уявленнями (в)

Тому для більш глибокого та точного розуміння законів природи людству необхідна «фракталізація» науки, зокрема, фізики, тобто перехід від геометрії Евкліда до фрактальної геометрії.

Цей процес розпочався на початку ХХІ сторіччя, він поступово охоплює різноманітні галузі науки та техніки [1–15, 19, 20]. Безперечно, сучасна фізична освіта не має права залишатися осторонь таких докорінних змін, що сьогодні відбуваються не лише у науці, але й взагалі у людському світогляді та світосприйнятті. Саме цим пояснюється актуальність цієї статті.

Задля успішного привернення уваги університетської наукової спільноти до проблеми необхідності «фракталізації» сучасної освіти взагалі та сучасної фізичної освіти зокрема необхідно розв'язати такі задачі:

1) проінформувати колег-педагогів про існування фрактального підходу, його сутність та основні етапи його виникнення;

2) зрозуміти, у чому саме полягає процес «фракталізації» у сучасній фізиці;

3) обґрунтувати необхідність та показати невідворотність «фракталізації» сучасної класичної фізичної освіти;

4) на прикладі курсу «Фрактальна фізика» пояснити, як саме можна розпочати цей процес;

5) обґрунтувати необхідність і доцільність створення спеціалізації «Фрактальна фізика» у межах спеціальності 104 – «Фізика та астрономія»;

6) окреслити можливі перспективи розвитку цієї спеціалізації протягом найближчих років.

Традиційна сучасна картина навколишнього світу, що здається нам зрозумілою, логічною, несуперечливою, а найголовніше – єдино можливою, бере свій початок у роботах великого Галілео Галілея. Ще у 1623 р. він так сформулював своє наукове кредо: «Всю науку записано у цій великій книзі – я маю на увазі Всесвіт, – яка завжди є відкритою для нас, але яку не можливо зрозуміти, не навчившись розуміти мову, якою її написано. А написано її мовою математики, її літерами є трикутники, кола та інші геометричні

фігури, без яких людині неможливо розібрати жодного її слова; без них вона подібна до того, хто блукає у пільмі» [1]. Отже, все чітко і зрозуміло, а головне – зручно та звично, оскільки всі ми виростили саме на цих ідеях, а тому не уявляємо собі взагалі, що може існувати щось розумне, але геть інше.

Потрібно було майже 350 років, щоб вдалося вийти за межі галілеївських уявлень про навколишній світ. Це відбулося у 1975 р., коли видатний американський математик польського походження Бенуа Мандельброт ввів термін «фрактал» [6].

Термін «фрактал» походить від англійського «*fractional*» – дробний (або латинського «*fractus*») – подрібнений, зламаний, розбитий [6].

Ніби відповідаючи Г. Галілею, у 1984 р. Б. Мандельброт писав: «Чому геометрію називають «сухою» та «холодною»? Одна з причин полягає у її нездатності описати форму хмари, гори, дерева або берега моря. Хмари – це не кулі, гори – це не конуси, лінії берегу – це не кола, і кора не є гладкою, а блискавка не поширюється по прямій... Природа демонструє не просто більш високий ступінь, а зовсім інший рівень складності. Кількість різних масштабів довжин у структурах завжди є нескінченною» [1]. Отже, вперше за 350 років виникли сумніви щодо того, чи досить точно відображає навколишній світ геометрія Евкліда.

Саме тут скептики неодмінно запитують: невже ж до Б. Мандельброта ніхто цього не бачив і не розумів? Відповідь міститься в існуванні чотирьох етапів формування фрактального підходу як такого.

1. Епоха «монстрів» (кінець ХІХ сторіччя – початок 1960-х рр.). У працях окремих ентузіастів з'являються нові математичні об'єкти та їхні числові характеристики, які в майбутньому стануть основою теорії фракталів (множина Кантора, ітеровані відображення (Келі, Жюліа, Фату та ін.), крива Пеано, сніжинка Коха, килим Серпинського, траєкторії броунівського руху (Броун, Ейнштейн, Вінер), функції Вейерштраса, Римана, дослідження Пуанкаре, розмірності Хаусдорфа – Безиковича, Мінковського – Булігана та ін.). Незважаючи на наявність у цьому переліку прізвищ видатних фізиків і математиків, ставлення наукової спільноти до цих ідей було вкрай негативним. Загальна думка визнала їх відхиленням, що може викликати цікавість лише у дослідників, які надмірно зловживають математичними аспектами. Це добре відображає той факт, що ніхто інший, як видатний французький математик Шарль Ерміт, охрестив подібні об'єкти «монстрами».

2. Підготовчий етап (початок 1960-х рр. – 1975 р.). Б. Мандельброт, за його словами [6, 7], приблизно у 1964 р. зайнявся дослідженнями, що привели до створення фрактальної геометрії. Він сам підкреслював [10], що датою народження фрактальної геометрії є саме 1975 р., хоча окремі її елементи було створено за сторіччя до того. На наш погляд, безперечна заслуга Б. Мандельброта полягає у тому, що він не лише вперше побачив спільне у зібраних ним розрізнених «монстрах», створених видатними

математиками минулого, але й нерозривно поєднав ці нібито «химерні» ідеї теоретиків із реальним навколишнім світом, започаткувавши їх впровадження у сучасну науку та техніку. Це схоже на заслуги Дж. Максвелла в електродинаміці, коли він сам окремі рівняння не створював, але зібрав їх докупи, узагальнив і записав у вигляді однієї спільної системи, чого до нього зроблено не було. Зазначимо, що хоча формально Б. Мандельброта вважають математиком, насправді він є скоріш натуралістом, про що свідчить отримана ним у 1993 р. премія Вольфа саме з фізики.

3. Етап становлення та розвитку (1975 р. – початок 2000-х рр.). Після публікації Б. Мандельбротом у 1975 р. «Фрактальної геометрії природи» [6] «фрактальні» ідеї поступово проникають до багатьох галузей науки та техніки, їм віддає перевагу все більша кількість учених. Саме в цей час формується мова фрактального підходу, створюються та вдосконалюються його методи [1–15, 19, 20]. Фрактальні структури виявляються дослідниками у найрізноманітніших, подекуди – вкрай неочікуваних сферах (наприклад, у мові, музиці або навіть віршах!).

4. Сучасний етап (початок 2000-х рр. – сьогодні). У результаті масового застосування методів фрактальної геометрії, фрактального аналізу, дробового числення в різних галузях науки та техніки, яке можна назвати їх «фракталізацією», формуються та відокремлюються цілі нові напрямки, наприклад, фрактальна фізика, фрактальна радіофізика, фрактальна радіолокація, фрактальна електродинаміка та ін. [2, 4, 7, 11, 12, 20]. Зусиллями багатьох фахівців успішно сформульовано так звану «фрактальну парадигму» у сучасному природознавстві (див., наприклад, [11, 16, 17]).

Отже, саме на останньому етапі виникла невідкладна потреба введення категорій і методів фрактальної парадигми до сучасної освіти, насамперед – до сучасної фізичної освіти. Більш того, стало зрозумілим, що сучасний спеціаліст мусить не лише знати про існування теорії фракталів, фрактальних методів і володіти їх основами. Проблема стоїть значно ширше.

Оскільки доведено, що фрактальність є не окремим, дуже рідко виникаючим «монстром», а однією з фундаментальних властивостей навколишнього світу, то треба сформувати у майбутніх фахівців справжній «фрактальний» світогляд. У межах цього світогляду людина повинна зрозуміти, що навколишній світ є принципово фрактальним, тобто фрактальність є фундаментальною властивістю навколишнього світу. Саме це й стверджує фрактальна парадигма. Отже, відсутність фрактальності в тій чи іншій ситуації, коли замість фрактальної геометрії можна використовувати геометрію Евкліда, є не закономірністю, а лише окремим випадком.

Разом з тим, зрозуміло, що «фракталізація» природничих наук, зокрема, фізики, викликає значну незручність як для викладача, так і для студента, оскільки всі звичні уявлення, закони, принципи, що ґрунтувалися на евклідовій геометрії, виявляються лише граничним випадком значно

ширшої картини навколишнього світу – і тому мають бути модифіковані та узагальнені на випадок застосування фрактальної геометрії. До речі, цей процес сьогодні відбувається в різних галузях науки та техніки (див., наприклад, [20]). Отже, все те, чому зараз вчаться студенти, хоча і є добре відпрацьованим, чітко сформульованим і зрозумілим матеріалом, але залишається лише вузьким граничним випадком нової «фракталізованої» науки.

Як не дивно, але згадана ситуація вже стала майже типовою. Зокрема, приблизно до середини ХХ сторіччя світ здебільшого бачили детермінованим, а стохастичність вважалася окремим «нешасним випадком». Згодом з'ясувалося, що насправді все зовсім навпаки. Тому зараз ніхто й не дивується, що стохастичність визнано однією з фундаментальних властивостей природи. Аналогічна ситуація відбувалася з нелінійністю, але це вже майже не дивує науковий та освітній загал лише на межі ХХ і ХХІ сторіч [16, 18].

Таким чином, згідно з фрактальною парадигмою, навколишній світ є принципово фрактальним. Тому він адекватно описується лише фрактальною геометрією. Натомість, геометрія Евкліда та сферична геометрія є лише грубими ідеалізаціями фрактальної геометрії, «евклідова геометрія є «карикатурою» на справжню, фрактальну, геометрію» [16, 17]. Тому й сучасна фізика просто мала бути узагальнена на випадок використання саме фрактальної геометрії, тобто стати «фрактальною». Першою спробою донести повною мірою до студентства цю інформацію стала поява в осінньому семестрі 2016/2017 навчального року на фізичному факультеті ХНУ імені В. Н. Каразіна курсу «Фрактальна фізика», який вперше читався для студентів другого року магістерської підготовки, що навчаються за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Треба зазначити, що за останні десять-п'ятнадцять років вже існували окремі успішні спроби впровадження ідей фрактальної геометрії у навчальний процес у вищих навчальних закладах як в Україні, так і за кордоном (див., наприклад, [1–3, 8, 10, 15, 19]). З 1980-х років на радіофізичному факультеті Харківського університету одним із авторів (Л. Ф. Черногором) фрактальні ідеї викладалися у межах курсу «Нелінійна радіофізика» [16, 17]. Окремо слід пригадати роботи, що проводилися у 2000-х роках на фізичному факультеті ХНУ імені В. Н. Каразіна на кафедрі теоретичної фізики імені академіка І. М. Ліфшиця під керівництвом професора В. В. Ульянова [13].

Але курс «Фрактальна фізика» є насправді унікальним, оскільки побудований на матеріалах приблизно 100 наукових книг та 150 наукових статей із фрактальної тематики, що опубліковані вітчизняними та закордонними авторами (в тому числі й авторами цієї статті) протягом останніх 15–20 років, і у нижченаведеному вигляді до цього ще ніде жодного разу не читався. Курс розраховано на 90 годин (3 кредити ECTS), із яких 36 годин складають лекції, 54 години – самостійна робота. У межах останньої кожен

студент готує власне індивідуальне науково-пошукове завдання, яке завершується публічним його захистом (15 хв на доповідь) під час наукового семінару на кафедрі загальної фізики, що відбувається за участі фахівців у галузі фракталів, які запрошуюються як з інших факультетів, так і з інших ВНЗ м. Харкова. Наприкінці курсу проводиться письмовий іспит.

Курс «Фрактальна фізика» складається з трьох розділів. Перший розділ – «Основи теорії фракталів» – присвячено питанням створення теорії фракталів, докладному вивченню особливостей моно- і мультифракталів. У другому розділі – «Основи фрактального аналізу фізичних процесів та об'єктів» – йдеться про сучасні методи фрактального та мультифрактального аналізу фізичних процесів та об'єктів, особливості аналізу двовимірних структур, наводяться численні приклади застосування цих методів на практиці, в тому числі ті, що містяться у роботах авторів цієї статті. Третій розділ – «Основи дробового числення та сучасна фізика» – містить у собі основні відомості про дробові інтеграли та дробові похідні, а також дробові оператори, які створено на їх основі. Особливо слід відзначити, що як приклад застосування дробового числення використовують фрактальну електродинаміку [20], яку було створено (принаймні, у сучасному її вигляді) лише п'ять років тому.

За результатами навчання студенти повинні

знати: поняття фракталу, монофракталу, мультифракталу, історію створення теорії фракталів, основні властивості та відмінності математичних і фізичних фракталів, визначення та класифікацію фрактальних розмірностей, приклади фракталів у математиці та навколишньому світі, зв'язок між фракталами та нелінійною парадигмою; поняття самоподібності та самоафінності, властивості та приклади регулярних, нерегулярних випадкових і товстих фракталів; властивості та приклади мультифракталів; поняття фрактальних сигналів і процесів, основні методи їхнього описання та моделювання; основи фрактального аналізу сигналів, процесів і двовимірних структур; основи мультифрактального аналізу фізичних сигналів і процесів; приклади, результати та тлумачення результатів фрактального і мультифрактального аналізу реальних фізичних процесів; основи дробового числення, поняття та методи обчислення дробових похідних та інтегралів, основи фрактальної електродинаміки;

вміти: обчислювати фрактальні розмірності модельних фракталів, проводити фрактальний і мультифрактальний аналізи реальних фрактальних сигналів і процесів, використовуючи можливості систем комп'ютерної математики, давати фізичне тлумачення отриманих результатів; проводити фрактальний аналіз реальних двовимірних фізичних об'єктів; застосовувати методи обчислення дробових похідних та інтегралів, розв'язувати найпростіші рівняння, що містять дробові інтегродиференціальні оператори.

Слід зазначити, що через вкрай обмежений час курс «Фрактальна фізика» фактично лише «відчиняє віконце» студентів у справжній світ сучасної фрактальної науки, ставлячи значно більше запитань, ніж даючи на них конкретних відповідей. Але в цьому й була авторська задумка, оскільки саме ці питання без відповідей мають сформувати у студента відчуття, що після захисту магістерської роботи навчання не завершується, а лише по-справжньому розпочинається. Більш того, на певну кількість виникаючих у студента запитань на сьогодні відповіді не існує взагалі, оскільки саме тут пролягає «передній край» сучасної фізичної науки. Хто знає, може саме той, у кого виникло таке запитання, згодом дасть на нього вичерпну відповідь, тим самим розширивши наші горизонти пізнання?

Важливим також є те, що курс «Фрактальна фізика» створено не лише для навчання студентів, які навчаються за різними спеціалізаціями у межах спеціальності 104 «Фізика та астрономія». Він також розглядається як перша сходинка створення на кафедрі загальної фізики фізичного факультету ХНУ імені В. Н. Каразіна нової спеціалізації «Фрактальна фізика». У межах цієї спеціалізації планується готувати фахівців, які будуть здатні ефективно застосовувати новітні методи фрактального та мультифрактального аналізів, дробового числення для дослідження процесів і сигналів різної фізичної природи, вивчення одно- та багатовимірних структур, процесів динамічного хаосу та самоорганізації у нелінійних системах та ін., а також давати коректне фізичне трактування отриманих результатів. У свою чергу, це також потребує підвищеного рівня теоретичних знань та практичних умінь і навичок у галузі інформаційних технологій, зокрема – пов'язаних із системами комп'ютерної математики, програмування та моделювання фізичних процесів. Більш того, опанувавши зазначені методи, майбутній фахівець буде здатним застосовувати їх у будь-яких галузях науки та техніки: від біології й медицини до філології та теорії музики, від керування рухом на дорогах до психології молодшого шкільного віку, навіть тоді, коли він сам не є там спеціалістом. Останнє значно підвищуватиме конкурентоздатність такого фахівця на сучасному ринку праці. Зауважимо, що, наскільки нам відомо, таких фахівців на сьогодні не готує жоден вищий навчальний заклад – як в Україні, так і за кордоном.

Основні напрямки розвитку цієї нової спеціалізації на найближчі роки полягають у такому.

1. Створення спецкурсів «Сучасні методи фрактального аналізу» та «Сучасні методи мультифрактального аналізу», які є орієнтованими на практичне застосування методів фрактального та мультифрактального аналізу із використанням систем комп'ютерної математики.

2. Створення спецкурсу «Фрактальний аналіз і динамічний хаос», що має на меті розгляд теоретичних засад та особливостей практичного застосування методів фрактального аналізу для дослідження нелінійних

систем, у яких виникає динамічний хаос, а також докладне вивчення особливостей явищ виникнення динамічного хаосу та самоорганізації.

3. Встановлення наукових зв'язків з іншими кафедрами фізичного факультету, з іншими факультетами ХНУ імені В. Н. Каразіна, а також іншими вищими навчальними закладами, науковими установами (в Україні і за її межами), які зацікавлені у науковому співробітництві щодо використання методів фрактального та мультифрактального аналізів – як у фізиці, так і в інших галузях науки та техніки.

Фрактальність як фундаментальна властивість навколишнього світу тісно пов'язана з нелінійністю та стохастичністю. Перший із цих зв'язків знайшов відображення у курсі «Нелінійна фізика», який також вперше читався на фізичному факультеті в осінньому семестрі 2016/2017 навчального року студентам другого року магістерської підготовки (паралельно з курсом «Фрактальна фізика»). Основою для нього став курс «Нелінійна радіофізика», який вже протягом 30 років читається проф. Л. Ф. Черногором на четвертому курсі радіофізичного факультету (тепер – факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем) ХНУ імені В. Н. Каразіна [17].

Зв'язок між фрактальністю та стохастичністю також вже відображено як у курсі «Фрактальна фізика», так і «Нелінійна фізика».

Поглиблення знань студентів про існування зв'язків між фрактальністю, нелінійністю та стохастичністю у майбутньому буде проведено у спецкурсі «Фрактальний аналіз і динамічний хаос».

Наведений аналіз проблеми переконує, що нелінійність, стохастичність і фрактальність є фундаментальними властивостями навколишнього світу. Майбутній фахівець, а насамперед – спеціаліст у галузі фізики, виходячи зі стін класичного університету, повинен не лише володіти методами, побудованими з використанням цих уявлень, але й мати науковий світогляд, що базується на підвалинах саме цих ідей та їх поєднання.

Література

1. Божокин С. В. Фракталы и мультифракталы / С. В. Божокин, Д. А. Паршин. – Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 128 с.
2. Горобець Ю. І. Фрактальна геометрія у природознавстві : навч. посібник / Ю. І. Горобець, А. М. Кучко, І. Б. Вавилова. – Київ : Наукова думка, 2008. – 232 с.
3. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории / Р. М. Кроновер. – Москва : Постмаркет, 2000. – 352 с.
4. Лазоренко О. В. Сверхширокополосные сигналы и процессы : монография / О. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор. – Харьков : Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 2009. – 576 с.

5. Любушин А. А. Фрактальный анализ временных рядов / А. А. Любушин. – Москва : РГГУ, 2006. – 23 с.
6. Мандельброт Б. Фракталы и хаос. Множество Мандельброта и другие чудеса / Б. Мандельброт. – Москва-Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2009. – 392 с.
7. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. – Москва : Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
8. Морозов А. Д. Введение в теорию фракталов / А. Д. Морозов. – Москва–Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2002. – 160 с.
9. Мун Ф. Хаотические колебания : вводный курс для научных работников и инженеров / Ф. Мун. – Москва : Мир, 1990. – 312 с.
10. Пайтген Х.-О. Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем / Х.-О. Пайтген, П. Х. Рихтер. – Москва : Мир, 1993. – 176 с.
11. Потапов А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. Топология выборки / А. А. Потапов. – Москва : Университетская книга, 2005. – 848 с.
12. Потапов А. А. Фрактальный метод и фрактальная парадигма в современном естествознании : монография / А. А. Потапов. – Воронеж : Научная книга, 2012. – 108 с.
13. Синельник Е. Н. Фракталы: от математики к физике / Е. Н. Синельник, В. В. Ульянов. – Харьков : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2005. – 52 с.
14. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – Москва : Мир, 1991. – 254 с.
15. Черногор Л. Ф. Нелинейная радиофизика : учеб. пособие для физических факультетов университетов / Л. Ф. Черногор. – Харьков : ХГУ им. А. М. Горького, 1991. – 196 с.
16. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке : монография / Л. Ф. Черногор. – Харьков : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008. – 528 с.
17. Черногор Л. Ф. Нелінійна радіофізика : підручник / Л. Ф. Черногор. – Харьков : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2016. – 204 с.
18. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая / М. Шредер. – Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2001. – 528 с.
19. Barnsley M. Fractals Everywhere / M. Barnsley. – Academic Press, 1988. – 394 p.
20. Tarasov V. E. Fractional Dynamics. Applications of Fractal Calculus to Dynamics of Particles, Fields and Media / V. E. Tarasov. – Springer, 2011. – 522 p.