

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

**ЧУМАЧЕНКО ДМИТРО ІГОРОВИЧ**

УДК 004.032.91

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МУЛЬТИАГЕНТНІ ТЕХНОЛОГІЇ  
В ЕПІДЕМІЧНИХ ПРОЦЕСАХ  
СИСТЕМ ПОПУЛЯЦІЙНОЇ ДИНАМІКИ**

05.13.23 – системи та засоби штучного інтелекту

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор  
**Яковлев Сергій Всеволодович**,  
Національний аерокосмічний університет  
ім. М.Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»,  
професор кафедри інформатики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Субботін Сергій Олександрович**,  
Запорізький національний технічний університет  
МОН України, завідувач кафедри програмних засобів.

кандидат технічних наук, доцент  
**Гороховатський Олексій Володимирович**,  
Харківський національний економічний університет  
імені Семена Кузнеця МОН України,  
доцент кафедри інформатики та комп'ютерної техніки.

Захист відбудеться «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 р. о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д164.052.01 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

Автореферат розісланий «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
д.т.н., проф.

О.А. Винокурова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Питанням розробки інтелектуальних проблемно-орієнтованих систем та їх застосування до популяційної динаміки присвячені сучасні роботи багатьох вчених. Управління епідемічним процесом систем популяційної динаміки є важливою частиною цієї області. Найважливішим інструментом вивчення цих систем є адекватні математичні моделі прогнозування розповсюдження динаміки епідемічного процесу. До теперішнього часу створено значну кількість таких теоретично обґрунтованих моделей популяційної динаміки. Вони спираються на математичний апарат статистики та теорії ймовірності. Загальним недоліком існуючих моделей є низька точність побудови прогнозу, а також його короткостроковість.

Однією з основних проблем епідемічного процесу в системах популяційної динаміки є стохастичний характер його поведінки. Також в існуючих моделях не враховуються особливості внутрішньої поведінки популяції, оцінка зовнішнього середовища об'єктами, логічна поведінка екземплярів популяції. При аналізі епідемічного процесу, на відміну від поведінки систем популяційної динаміки, досліднику цікавий лише один цикл «епідемія-спад», тому що подальший розвиток динаміки може значно змінюватися в залежності від наслідків епідемічної поведінки, а також вжитих зовнішніх впливів.

Таким чином, **науково-прикладна задача** розробки інтелектуальних мультиагентних технологій в динамічних системах з епідемічним характером є актуальною. Це дозволить врахувати бази знань агентів, їх комунікації, а також уникнути ускладнення аналізу по відношенню до популяційної динаміки, пов'язаний з поведінкою агентів, схожою з реальними системами і їх прийняттям рішень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана в рамках держбюджетних НДР: «Методологічне забезпечення підготовки та управління комплексними проектами розвитку підприємств машинобудівної та транспортної галузей» (ДР № 0108U011072); «Енергоефективні та ресурсозберігаючі технології та засоби вимірювання, перетворення і використання енергоносіїв літальних апаратів і паливно-енергетичних комплексів» (ДР № 0109U001089); «Методологія проектування елементів та інформаційно-вимірювальних систем контролю параметрів авіаційних двигунів і промислових паливно-енергетичних комплексів» (ДР № 0111U001072); «Розробити науково обґрунтовану технологію проведення епідеміологічного нагляду та прогнозування епідемічного процесу при вірусних інфекціях в умовах вакцинопрофілактики з використання інформаційних технологій» (ДР № 0112U002380); «Методологія удосконалення промислових паливно-енергетичних комплексів і авіаційних двигунів з використання інформаційно-вимірювальних систем моніторингу змінних станів в умовах невизначеності вхідних даних» (ДР № 0115U000838). В рамках зазначених НДР здобувач був виконавцем і їм розроблені методи ідентифікації об'єктів мультиагентних систем, засновані на інтелектуальній взаємодії агентів і частковій спостережувано-

сті світу.

**Мета і завдання дисертаційного дослідження.** Метою дисертаційної роботи є створення та дослідження інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для отримання довгострокового прогнозу в системах популяційної динаміки за допомогою мультиагентного моделювання.

Досягнення поставленої мети здійснюється шляхом вирішення таких основних завдань:

–аналіз існуючих підходів і методів моделювання процесів популяційної динаміки;

–синтез мультиагентної моделі, що включає базу знань і інтелектуальні комунікації об'єктів системи;

–розробка методу логічної взаємодії агентів в умовах логічної невизначеності;

–визначення механізму перевірки адекватності побудованих методів за допомогою нечітких рекурентних моделей;

–за допомогою розроблених моделей і методів вирішити практичні завдання, пов'язані з динамікою епідемічного процесу популяційної динаміки.

*Об'єкт дослідження* – процеси побудови інтелектуальних мультиагентних систем.

*Предмет дослідження* – методи інтелектуальної взаємодії раціональних агентів в умовах невизначеності і прогнозування на основі нечітких рекурентних моделей.

**Методи дослідження** базуються на теорії обчислювального інтелекту, а саме на методах теорії нечіткої логіки для побудови нечітких рекурентних моделей, що дозволяють провести аналіз системи на хаотична поведінка. Для побудови інтелектуальних моделей систем популяційної динаміки використані мультиагентні технології імітаційного моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів.** До нових, одержаних особисто автором, належать такі результати:

1. *Вперше* розроблено імітаційну мультиагентну модель популяційної динаміки, засновану на інтелектуальних раціональних агентах, що функціонують в умовах логічної невизначеності, яка на відміну від існуючих враховує знання агентів в заданих умовах, що дозволяє одержати довгостроковий прогноз динамічної системи;

2. *Вперше* одержано математичний опис моделі для формалізації класу епідемічних процесів популяційної динаміки, заснований на факторах та характеристиках, що впливають на динаміку популяції, який на відміну від існуючих поширюється на нові галузі знань, що дозволяє розробити інтелектуальну систему підтримки прийняття рішень для прогнозування розповсюдження епідемічного процесу в системах популяційної динаміки та своєчасного проведення превентивних заходів.

3. *Удосконалено* метод ідентифікації об'єктів інтелектуальної мультиагентної системи, заснований на частковій спостережуваності простору станів, який на відміну від існуючих методів використовує адаптований алгоритм редукції

можливих станів для довільної кількості агентів, що дозволяє збільшити адекватність моделі популяційної динаміки;

4. *Дістало подальший розвиток* метод інтелектуального аналізу популяційної динаміки, заснований на нечітких рекурентних моделях, який на відміну від існуючих методів використовує нечіткі системи Сугено I типу, що дозволяє оцінити можливість виникнення хаотичної динаміки модельованої системи.

Наукові результати, одержані автором особисто, є теоретичною основою для вирішення практичних завдань, пов'язаних з моделюванням епідемічних процесів в системах популяційної динаміки.

**Практичне значення одержаних результатів.** Запропонована в роботі імітаційна мультиагентна модель популяційної динаміки, заснована на інтелектуальних раціональних агентах, що функціонують в умовах логічної невизначеності, призначена для побудови адекватного прогнозу в системах популяційної динаміки з епідемічним характером. Розроблена модель використовує бази знань і комунікації об'єктів системи. Використання розроблених моделей і методів дозволило збільшити тривалість прогнозу епідемічного процесу системи популяційної динаміки, а також підвищити його точність в прикладних задачах епідеміології та ідентифікації шкідливого програмного забезпечення в негомогенних комп'ютерних мережах.

Результати дисертаційної роботи впроваджено на підприємствах України та у начальний процес, що підтверджується відповідними актами:

1. Державна установа «Харківський обласний лабораторний центр Міністерства охорони здоров'я» (акт впровадження від 08.11.2016 р.);

2. Комунальний заклад охорони здоров'я Обласна клінічна лікарня (акт впровадження від 02.12.2015 р.);

3. ТОВ «Протектмастер Солюшнс» (акт впровадження від 30.11.2016 р.);

4. Комунальний заклад охорони здоров'я «Обласний спеціалізований будинок дитини «Зелений Гай» (акт впровадження від 05.09.2016 р.);

5. У науково-дослідницьку роботу Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» (акт впровадження від 14.12.2016 р.)

6. У навчальний процес кафедри інформатики Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» (акт впровадження від 16.12.2016 р.) у рамках курсів «Системи штучного інтелекту», «Імітаційно-подійне моделювання», «Захист інформації в ІКС» та «Programming and numerical methods»;

7. У навчальний процес кафедри епідеміології Харківського національного медичного університету (акт впровадження від 17.11.2016 р.) у рамках курсів «Епідеміологія», «Вибрані питання епідеміології інфекцій дихальних шляхів», «Епідеміологічні дослідження в клінічній та профілактичній медицині. Основи доказової медицини» та «Епідеміологія та профілактика інфекцій, які пов'язані з наданням медичної допомоги».

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні наукові положення, результати, висновки та рекомендації дисертаційної роботи отримані автором самостійно та

опубліковано у роботах [1-30]. У публікаціях, які написано у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: [1] – архітектура та програмна реалізація інформаційної технології мультиагентної моделі епідемічного процесу популяційної динаміки; [2] – структура логічної взаємодії агентів мультиагентної системи популяційної динаміки розповсюдження шкідливого програмного забезпечення типу хробак; [3] – метод аналізу системи на наявність хаотичної динаміки на основі моделі Такагі-Сугено I типу; [4] – архітектура інтелектуальної мультиагентної моделі популяційної динаміки, що застосовна до розповсюдження епідемічних захворювань; [5] – методи оптимізації інтелектуальної взаємодії раціональних агентів в умовах логічної невизначеності; [6] – програмна реалізація інтелектуальної системи прогнозування епідемічного процесу; [7] – архітектура інтелектуальної мультиагентної моделі популяційної динаміки; [8] – алгоритм розрахунку прогнозу динаміки епідемічного процесу; [9] – метод налаштування універсальної мультиагентної моделі; [10] – структура універсальної інтелектуальної мультиагентної моделі епідемічного процесу; [11] – метод побудови структури та логіки раціональних агентів; [12] – метод інтелектуальної взаємодії при контактному епідемічному процесі; [13] – метод аналізу побудованого прогнозу системи популяційної динаміки; [14] – структура інтелектуального раціонального агента; [15] – мультиагентна модель епідемічного процесу, налаштована на захворюваність на гепатит В; [16] – архітектура аналізу вхідної статистики для побудови моделі епідемічного процесу; [17] – мультиагентна модель епідемічного процесу, налаштована на захворюваність на грип та гострі респіраторні вірусні інфекції; [18] – методи нечіткої логіки для мультиагентного моделювання епідемічних процесів; [23] – спосіб епідеміологічної діагностики захворюваності на основі побудованого прогнозу епідемічного процесу; [24] – спосіб побудови прогнозу епідемічного процесу на основі розробленої мультиагентної моделі; [25] – архітектура інтерактивної інтелектуальної імітаційної середовища для мультиагентного моделювання епідемічного процесу; [26] – архітектура зовнішніх впливів на модель епідемічного процесу, що дозволяє враховувати фактори ризику; [30] – методи інтелектуальної взаємодії агентів в детектуванні шкідливого програмного забезпечення. Роботи [19–22, 27–29] опубліковано без співавторів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися та обговорювалися на 13th, 19th та 20th East West Fuzzy Colloquium “Zittau Fuzzy Colloquium” (Циттау, Німеччина, 2006, 2012, 2013); ISDS Annual Conference “New Frontiers in Surveillance: Data Science and Health Security” (Атланта, США, 2016); ISDS Annual Conference “Challenges and Solutions for the Road Ahead” (Філадельфія, США, 2014); ISDS Annual Conference “Expanding Collaborations to Chart a New Course in Public Health Surveillance” (Сан-Дієго, США, 2012); 59th American Society of Tropical Medicine & Hygiene annual meeting (Атланта, США, 2010); Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика розвитку сучасних наукових знань» (Київ, 2016); Міжнародній науково-технічній конференції «Інтегровані комп’ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ» (Харків, 2007, 2014, 2016); Міжнародній науково-

практичній конференції «Математичне моделювання процесів в економіці і управлінні проектами і програмами (ММП-2016)» (Миколаїв, 2016).

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи опубліковані у 30 наукових роботах: 1 монографія, 9 статей, з яких 5 статей у фахових виданнях України з технічних наук, 2 статті у закордонних виданнях (5 статей входять до міжнародних науко метричних баз), 12 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях, 1 патент, 1 інформаційний лист, 6 свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація містить анотацію, вступ, чотири розділи, висновки й додатки. Загальний обсяг дисертації складає 204 сторінки, у тому числі 55 рисунків за текстом (з них 27 рисунків на 15 окремих сторінках), 10 таблиць за текстом (з них 2 таблиці на 2 окремих сторінках), анотація на 15 сторінках, список зі 139 найменувань літературних джерел на 15 окремих сторінках, 8 додатків на 37 сторінках.

**Подяка.** Автор висловлює щире подяку у виборі напрямку досліджень і всебічної підтримки на всіх етапах навчання та підготовки дисертаційного дослідження першому вчителю в наукових дослідженнях і педагогічній майстерності доктору технічних наук, професору кафедри прикладної інформатики факультету фізики, астрономії та інформатики Університету Миколи Коперника в м. Торунь, Польща Соколову Олександрові Юрійовичу.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ** дисертаційної роботи містить обґрунтування актуальності теми, мету і завдання дослідження; об'єкт, предмет і методи дослідження; характеристики наукової новизни та практичного значення одержаних результатів, а також особистий внесок здобувача; дані про реалізацію, апробацію та публікацію отриманих результатів.

У **першому розділі** проаналізовано стан проблеми інтелектуального імітаційного моделювання популяційної динаміки, розглянуто основні принципи інтелектуального імітаційного моделювання і його класифікація, розглянуто існуючі методи інтелектуального імітаційного моделювання систем популяційної динаміки. Виявлено та проаналізовано їх недоліки, серед яких можна виділити те, що в моделях передбачається, що всі індивіди однотипні і безперервно і рівномірно перемішуються на території, що моделюється, високу складність моделей та неможливість їх застосування до невеликих популяцій (в рамках міста чи області).

Проведено аналіз існуючих підходів в інтелектуальному мультиагентному моделюванні, розглянуто моделі і методи інтелектуального мультиагентного моделювання систем популяційної динаміки, які використовуються для розв'язання задачі прогнозування епідемічного процесу, виявлено недоліки існуючих інтелектуальних мультиагентних моделей епідемічного процесу систем популяційної динаміки. Серед основних недоліків існуючих моделей можна виділити їх високу обчислювальну складність, розробку під конкретні території, фік-

совані кроки дискретизації та низьку точність прогнозу.

На основі проведеного аналізу було сформульовано задачу дослідження.

Основні результати розділу опубліковано в працях [1, 6, 10].

**Другий розділ** присвячено розробці інтелектуальної мультиагентної моделі епідемічних процесів систем популяційної динаміки, та методам інтелектуальної взаємодії агентів один з одним та з оточуючим середовищем.

Класичні епідемічні моделі не враховують багатьох чинників, що знижує точність моделювання та достовірність динаміки епідемічного процесу, що розглядається. Серед таких можна виділити: вертикальну передачу, векторну передачу, неоднорідність популяції, вікові групи населення, мінливу інфекційність, неоднорідність навколишнього світу, набутий імунітет, тощо.

Таким чином формалізовано клас епідемічних процесів популяційної динаміки, заснований на факторах та характеристиках, що впливають на динаміку популяції, який на відміну від існуючих поширюється на нові галузі знань. Класу, що виділено властиві наступні характеристики: циклічність епідемічного процесу, нерегулярні підйоми і спади захворюваності, сезонні та міжсезонні періоди. Таким чином, зроблено висновок, що при дослідженні епідемічного процесу цікавим є лише прогнозування епідемічної спалаху, тобто періоду «*епідемія-спад*». Це пов'язано з тим, що динаміка процесу може поміняти правила розповсюдження після спалаху внаслідок вжитих протиепідемічних заходів, а також природного вимирання зараженої популяції.

На підставі формалізованого класу епідемічних процесів розроблено універсальну інтелектуальну мультиагентну модель динаміки розповсюдження епідемічних процесів систем популяційної динаміки. Епідеміологічна модель заснована на концепції епідемічного процесу Л. В. Громашевського, згідно з якою епідемічний процес існує при безперервній взаємодії трьох основних компонентів – джерела інфекції, механізму передачі і сприйнятливого організму.

Агента представлено як набір властивостей:

$$a = \langle s, s_t, c, t_a, l \rangle, a \in A, s \in S, c \in C, t_a \in T_a, \quad (1)$$

де  $s_t$  – час перебування в стані  $s$ ,

$A$  – множина всіх агентів,

$S$  – множина різних станів агентів,

$C$  – множина комірок робочої області,

$T_a$  – множина типів, до яких можуть належати агенти,

$l$  – тривалість життя.

Множина станів агента визначена попередньо і є постійною. Залежно від досліджуваного процесу множина може доповнюватися різними станами, початкова множина являє собою:

$$S = \{Susceptible, Exposed, Infected, Convalescent, Recovered, Dead\} \quad (2)$$

– *Susceptible* – агент здоровий (може бути схильним до зараження). В даному випадку під здоровим мається на увазі агент, який є сприйнятливим до захворювання епідемічного процесу, що моделюється.

– *Exposed* – агент зазнав захворювання. Даний стан являє собою інкуба-



ційний період. Протягом цього часу агент ще не є хворим, але вже має шанси передавати інфекцію.

– *Infected* – агент хворий. Агенти в цьому стані є найбільш ймовірними джерелами інфекції для інших агентів.

– *Convalescent* – агент одужує. Даний стан характеризує період, коли зникли клінічні симптоми захворювання, але агент як і раніше може бути носієм захворювання і джерелом інфекції. Наявність такого стану характерно для певних інфекційних захворювань.

– *Recovered* – агент видужав (придбав імунітет). Агенти в цьому стані більш не схильні до можливості захворіти.

– *Dead* – агент мертвий від старості або внаслідок захворювання.

Декомпозиція робочої області призводить до виникнення множини комірок, як умовних абстрактних об'єктів. Передбачається, що одна комірка одночасно може містити в собі множину агентів, а також один об'єкт-переносник інфекції (назвемо його інструментом). Тому комірка описана таким чином:

$$c = \langle z, \tilde{A}, i \rangle, z \in Z, \tilde{A} \subset A, i \in I, \quad (3)$$

де  $I$  – множина всіх інструментів,

$Z$  – множина всіх робочих областей.

Робоча область описана наступним чином:

$$z = \langle \tilde{C}, t_z \rangle, \tilde{C} \subset C, t_z \in T_z, \quad (4)$$

де  $T_z$  – множина типів, до яких можуть належати області. Передбачається що, в залежності від типу області, в якій знаходиться агент, змінюється специфіка епідемічного процесу.

Для експериментів було визначено 3 області:

– Домашня область. У цій області допускаються тільки контакти між агентами.

– Область ризику. У даній області, крім контактів між агентами, можливе зараження від інфікованого інструменту.

– Область «Лікарня». У даній області можливий частковий контакт між агентами і інфікування від інструменту. При попаданні в цю область агент піддається лікуванню, що знижує тривалість захворювання.

Під інструментом в даній моделі маються на увазі різні предмети, які так чи інакше здатні переносити інфекцію від одного агента до іншого. Інструмент описаний як набір:

$$i = \langle s, c, l \rangle. \quad (5)$$

Таким чином, імітаційну модель представлено у вигляді функції:

$$\text{sim}(l_{\text{mean}}, |A|_0, \bar{P}, T), \quad (6)$$

де  $l_{\text{mean}}$  – середня тривалість життя,

$|A|_0$  – початкова потужність множини агентів,

$\bar{P}$  – вектор ймовірностей, які враховуються в імітаційній моделі.

Для збільшення деталізації популяції з точки зору її належності до умовних соціальних груп були виділені типи агентів, які представляються наступ-

НИМ ЧИНОМ:

$$t = \langle \bar{P}_t, \bar{\tau}_t \rangle, \quad (7)$$

де  $\bar{P}_t$  – вектор ймовірностей, які характерні для типу агента,

$\bar{\tau}_t$  – вектор констант модельного часу.

Побудована модель допускає розширення, пов'язане зі збільшенням розмірності векторів. В рамках даної задачі обмежимося наступним набором:

$$\bar{P}_t = (P_b, P_{hr}, P_{hh}, P_{sr}, P_{sh}), \quad (8)$$

де  $P_b$  – ймовірність народження агента з заданим типом,

$P_{hr}$  – ймовірність того, що агент в здоровому стані перейде в область ризику,

$P_{hh}$  – ймовірність переходу здорового агента в область «Лікарня»,

$P_{sr}$  – ймовірність того, що агент в хворому стані перейде в область ризику,

$P_{sh}$  – ймовірність переходу хворого агента в область «Лікарня».

$$\bar{\tau}_t = (\tau_h, \tau_r, \tau_m), \quad (9)$$

де  $\tau_h$  – кількість модельного часу, який агент поточного типу проводить, перебуваючи в області «Дім»,

$\tau_r$  – кількість модельного часу, який агент поточного типу проводить, перебуваючи в області ризику,

$\tau_m$  – кількість модельного часу, який агент поточного типу проводить, перебуваючи в області «Лікарня».

Для взаємодії між агентами використовується вектор ймовірностей  $\bar{P}$  :

$$\bar{P} = (P_i, P_r, P_d, P_s, P_a), \quad (10)$$

де  $P_i$  – ймовірність передачі інфекції від хворого агента або за допомогою зараженого інструменту,

$P_r$  – ймовірність передачі інфекції від агента, що знаходиться на стадії інкубаційного періоду або на стадії спаду захворювання (назвемо це «зниженою вірогідністю зараження»),

$P_d$  – ймовірність того, що у агента в лікарні буде виявлено захворювання, яке перебуває на стадії інкубаційного періоду,

$P_s$  – ймовірність того, що при взаємодії два агента вступають в контакт,

$P_a$  – ймовірність випадкової передачі інфекції здоровому агенту від агента-носія.

Розглянуто задачу оптимального прийняття рішень агента: як агент може вибрати найкращу з можливих дій на кожному кроці часу, використовуючи свої знання про навколишній світ. Показник продуктивності, як правило, визначається користувачем (розробником агента) і відображає те, що користувач очікує від агента в задачі.

Якщо позначити через  $\theta_\tau$  спостереження агента в момент часу  $\tau$ , то щоб агент вибрав оптимальну дію в момент часу  $t$ , він повинен в цілому використовувати його повну історію спостережень  $\theta_\tau$  і дії  $a_\tau$  для  $\tau \leq t$ . Функція

$$\pi(\theta_0, a_0, \theta_1, a_1, \dots, \theta_t) = a_t, \quad (11)$$

яка вимагає відображення повної історії спостережень-пар дій і часу  $t$  до оптимальної дії  $a_t$ , є політикою агента.

Фундаментальна властивість, яка характеризує світ з точки зору агента пов'язана зі сприйняттям агента. Будемо говорити, що світ може повністю спостерігатися агентом, якщо поточне спостереження  $\theta_t$  агента повністю розкриває поточний стан світу, тобто  $s_t = \theta_t$ . З іншого боку, в світі, що спостерігається частково, поточне спостереження  $\theta_t$  агента забезпечує тільки часткову інформацію про поточний стан  $s_t$  у вигляді детермінованої або стохастичної моделі спостереження, наприклад, умовний розподіл ймовірностей  $p(s_t/\theta_t)$ . Останнє означало б, що поточне спостереження  $\theta_t$  не в повній мірі виявляє дійсний стан світу, але кожному стану  $s_t$  агент призначає ймовірність  $p(s_t/\theta_t)$ , таку, що  $s_t$  – дійсний стан (при якому виконуються умови  $0 \leq p(s_t/\theta_t) \leq 1$  і  $\sum_{s_t \in S} p(s_t | \theta_t) = 1$ ). Тут  $s_t$  розглядається як випадкова величина, яка може приймати всі можливі значення в  $S$ . Стохастичний зв'язок між  $s_t$  і  $\theta_t$  може бути альтернативно визначений моделлю спостереження у вигляді  $p(\theta_t/s_t)$ , і апостеріорний стан розподілу  $p(s_t/\theta_t)$  може бути обчислено з початкового розподілу  $p(s_t)$  з використанням правила Байеса:

$$p(s_t | \theta_t) = \frac{p(\theta_t | s_t)p(s_t)}{p(\theta_t)}. \quad (12)$$

Часткова спостережуваність набагато складніша в обігу, ніж повна спостережуваність і алгоритми для оптимального прийняття рішень в світі, що спостерігається частково, часто можуть стати важкооброблюваними. Часткова спостережуваність може вплинути не тільки на те, що кожен агент знає про стан світу, але і на те, що кожен агент знає про знання один одного.

Припустимо, що існує тільки один агент в світі, і світ стохастический з переходом моделі  $p(s_{t+1}/s_t, a_t)$ . Припустимо, що поточний стан  $s_t$ , і агент думає, як вибрати дію  $a_t$ . Нехай  $U(s)$  буде функцією вигоди для конкретного агента. Засноване на вигодах прийняття рішень виходить з передумови, що оптимальна дія  $a_t^*$  агента в стані  $s_t$  повинне максимізувати очікувану вигоду, тобто,

$$a_t^* = \arg \max_{s_{t+1}} \sum p(s_{t+1} | s_t, a_t) U(s_{t+1}) \quad (13)$$

де підсумовуються всі можливі стани  $s_{t+1} \in S$  при яких світ може перейти в новий стан, враховуючи, що теперішній стан  $s_t$  і  $i$  агент вибирає дію  $a_t$ . Щоб побачити, наскільки оптимальною є дія, агент повинен помножити вигоду кожної можливої дії в результаті стану з ймовірністю досягнення цього стану, і скласти всі стани. Потім агент повинен вибрати дію  $a_t^*$ , яка дає найбільшу суму.

Якщо кожний стан світу має величину вигоди, агент може зробити вищезгадані розрахунки і обчислити оптимальну дію для кожного можливого стану. Це забезпечує агента політикою, яка пов'язує стани і дії в оптимальному сенсі (оптимальному з урахуванням даних вигод). Зокрема, маючи набір найбільш досяжних вигід  $U^*(s)$  в даній задачі, «жадібна» політика, яка представляє собою

$$\pi^*(s) = \arg \max_a \sum_{s'} p(s' | s, a) U^*(s') \quad (14)$$

є оптимальною політикою для агента.

В розділі знайдено ефективність за Нешем:

$$\pi_i^*(\theta_i) = \arg \max_{\pi_i(\theta_i)} \sum_{\theta_{-i}} p(\theta_{-i} | \theta_i) Q_i(\theta, [\pi_i(\theta_i), \pi_{-i}^*(\theta_{-i})]) \quad (15)$$

Також розраховано Парето оптимальну рівновагу Неша  $\pi^* = (\pi_1^*, \pi_2^*)$  гри:

$$\pi_1^* : \pi_1^*(\theta_1) = \bar{a}_1, \pi_1^*(\bar{\theta}_1) = \bar{a}_1 \quad (16)$$

$$\pi_2^* : \pi_2^*(\theta_2) = \bar{a}_2, \pi_2^*(\bar{\theta}_2) = \bar{a}_2 \quad (17)$$

Це рішення дає кожному агенту очікуваний вигравш.

Розроблено програмну реалізацію інтелектуальної поведінки об'єктів мультиагентної системи за допомогою середовища NetLogo та мови програмування Prolog. Запропонована інформаційна технологія інтеграції декларативних мов із середовищем мультиагентного моделювання NetLogo може бути застосована для широкого кола завдань: експертні системи, автоматизація технологічних процесів з використанням робототехніки, системи екстреного реагування в надзвичайних ситуаціях, соціо-економічні моніторингові системи, тощо.

Проведено експериментальні дослідження універсальної інтелектуальної мультиагентної системи епідемічних процесів. Налаштування моделі показане на прикладі захворюваності на вірусний гепатит В, в якій враховано специфіку епідемічного процесу вірусного гепатиту В, розподіл на вікові та соціальні групи, шляхи зараження. Розрахований за допомогою побудованої моделі прогноз перевірено на статистичних даних по захворюваності на вірусний гепатит В в Харківській обл. (рис. 1). Точність побудованого прогнозу становить 97,06 %.

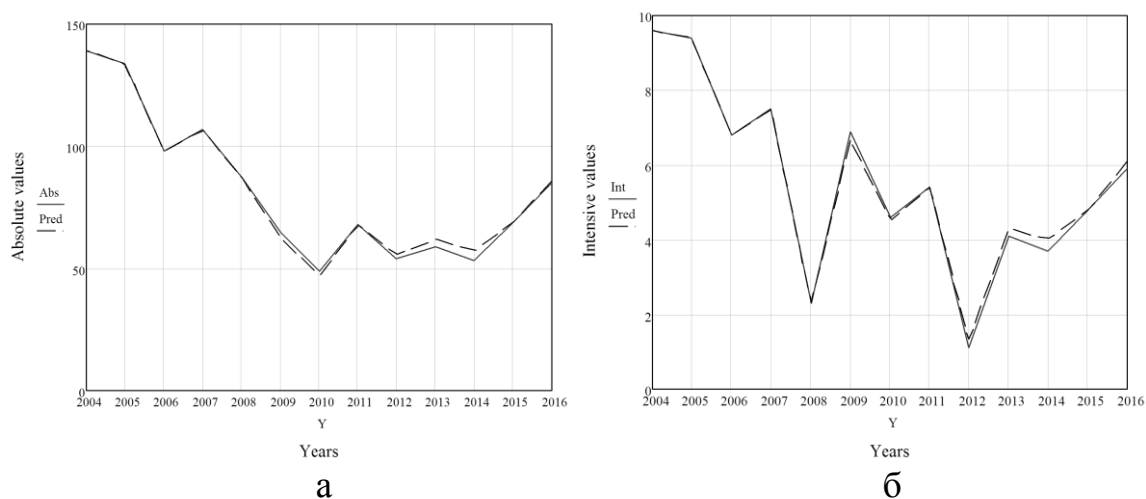


Рисунок 1 – Порівняння абсолютних (а) та інтенсивних (б) показників по захворюваності вірусним гепатитом В в Харківській області та побудованого прогнозу. Суцільна лінія – статистичні дані, переривчаста – побудований прогноз.

Основні результати розділу опубліковано в працях [1, 4–6, 9, 13–15, 19–21, 23–26].

В **третьому розділі** формалізовано залежності в динаміці поведінки систем популяційної динаміки, максимально можливу кількість особин популяції в залежності від вхідних даних, та зв'язок майбутніх та поточних станів системи.

Виявлено, що кількість особин  $N_{k+1}$   $(k+1)$ -го року пов'язана з кількістю особин  $N_k$   $k$ -го року наступним чином:

$$x_{n+1} = Ax_n(I - x_n) = f_A(x_n), \quad (18)$$

де  $x_n$  – це популяція в  $n$ -ому році,  $A$  – коефіцієнт, що залежить від умов навколишнього середовища.

Розглянуто низку перешкод при перевірці імітаційних моделей на точність та адекватність, а також при залученні експертів з області, що моделюється. Ці проблеми можуть бути успішно вирішені за допомогою використання моделей, заснованих на застосування нечітких лінгвістичних правил, які дозволяють враховувати невизначеності, пов'язані зі змінними, параметрами, граничними умовами і початковими станами і моделювати їх еволюцію, дотримуючись основних правил і закономірностей динаміки системи.

Розроблено лінгвістичну нечітку модель, що застосована до мультиагентної моделі, описаній в розділі 2. Основна ідея такого підходу полягає в тому, що системна динаміка описується набором правил, які застосовуються ітеративно. Кожне правило передбачає вхід і вихід у вигляді нечітких множин або нечітких функцій. З емпіричного досвіду групи експертів можливо створити нечітку функцію належності для кожної змінної і/або параметра, а також лінгвістичні правила, які регулюють динаміку системи. Таким чином, нечітка модель складається з набору правил і відповідного логічного виводу кінцевого автомата. Лінгвістична модель приймає наступну форму:

$$\begin{aligned} &\text{IF } U = B_1 \text{ AND } W_1 = A_{11} \text{ AND } \dots \text{ AND } W_n = A_{1n} \\ &\text{THEN } \bar{W}_1 = \hat{A}_{11} \text{ AND } \dots \text{ AND } \bar{W}_n = \hat{A}_{1n} \text{ AND } V = D_1 \\ &\text{IF } U = B_2 \text{ AND } W_1 = A_{21} \text{ AND } \dots \text{ AND } W_n = A_{2n} \\ &\text{THEN } \bar{W}_1 = \hat{A}_{21} \text{ AND } \dots \text{ AND } \bar{W}_n = \hat{A}_{2n} \text{ AND } V = D_2 \quad (19) \\ &\dots \\ &\text{IF } U = B_m \text{ AND } W_1 = A_{m1} \text{ AND } \dots \text{ AND } W_n = A_{mn} \\ &\text{THEN } \bar{W}_1 = \hat{A}_{m1} \text{ AND } \dots \text{ AND } \bar{W}_n = \hat{A}_{mn} \text{ AND } V = D_m \end{aligned}$$

де  $U$  – вхідна змінна,  $W_i$  – змінні станів системи,  $V$  – вихідна змінна,  $\bar{W}_i$  – змінні станів системи після кожної ітерації,  $B_i$  і  $A_{ij}$  – вхідні нечіткі множини,  $D_i$  і  $\hat{A}_{ij}$  – вихідні нечіткі множини.

Тому, вибираючи відповідний метод логічного виводу і, при необхідності, метод дефазифікації, на кожному кроці після запуску моделі розраховується значення змінної стану, яке буде вхідним параметром системи на наступному кроці, і так далі, ітеративно. Звідси випливає, наступне:

$$U(l+1) = V(l) \quad (20)$$

$$W_i(l+1) = \bar{W}_i(l) \quad (21)$$

де  $(l+1)$  – наступний крок після  $l$ .

Існують і інші нечіткі динамічні системи, і вибір конкретної моделі залежить від типу наявної інформації про систему. Іноді частина правил поведінки системи відома заздалегідь, тоді правила будуть приймати наступний вигляд:

$$\begin{aligned} &\text{IF } U(l) = B_m \text{ AND } W_1(l) = A_{m1} \text{ AND } \dots \text{ AND } W_n(l) = A_{mn} \\ &\text{THEN } y(l+1) = f(U(l), W_1(l), \dots, W_n(l)); \end{aligned} \quad (22)$$

де  $y(l+1)$  – деяка апріорна функція, відома з системної динаміки.

Формалізоване нечітке рекурентне відображення, яке визначається множиною наборів правил  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_N\}$ , що зв'язують значення змінних стану  $(x_1, \dots, x_N)$  динамічної системи в поточний  $\tau$  і майбутній  $t$  моменти часу:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_N \end{pmatrix}_t = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ r_N \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_N \end{pmatrix}_\tau \quad (23)$$

Набори правил (19) мають вигляд

$$r_i : \left\{ \begin{array}{l} \text{IF } x_1 = A_1^1 \text{ AND } x_2 = A_2^1 \dots \\ \left[ \text{AND } x_k = A_k^1 \right] \dots x_N = A_N^1 \quad \Big|_\tau \\ \text{THEN } x_i = B^1 \Big|_t \\ \\ \text{IF } x_1 = A_1^2 \text{ AND } x_2 = A_2^2 \dots \\ \left[ \text{AND } x_k = A_k^2 \right] \dots x_N = A_N^2 \quad \Big|_\tau \\ \text{THEN } x_i = B^2 \Big|_t \\ \\ \dots \dots \dots \\ \text{IF } x_1 = A_1^{K_i} \text{ AND } x_2 = A_2^{K_i} \dots \\ \left[ \text{AND } x_k = A_k^{K_i} \right] \dots x_N = A_N^{K_i} \quad \Big|_\tau \\ \text{THEN } x_i = B^{K_i} \Big|_t \end{array} \right. , \quad (24)$$

де  $K_i$  – кількість правил в наборі  $r_i$ ; елементи в квадратних дужках є необов'язковими, тобто не всі змінні стану можуть бути задіяні в правилі;  $A_i, B$  – значення лінгвістичних змінних з відповідних терм-множин.

Показано, що кількість правил набору знаходиться в діапазоні

$$0 \leq K_i \leq \prod_{i=1}^N \text{card}(S(x_i)), \quad (25)$$

де  $\text{card}(S(x_i))$  – потужність терм-множини лінгвістичної змінної  $x_i$ . Допускаються також і порожні набори правил.

Розроблену модель досліджено на хаотичність в сенсі Лі – Йорке. Дістав подальший розвиток метод інтелектуального аналізу популяційної динаміки, заснований на нечітких рекурентних моделях, що дозволяє оцінити можливість виникнення хаотичної динаміки системи, що моделюється. Визначено, що мінімальна кількість правил в інтелектуальній моделі системи популяційної динаміки Такагі-Сугено першого порядку для продукування хаосу дорівнює двом.

Запропонований підхід до дослідження систем популяційної динаміки дозволяє застосовувати уніфікований опис процесів різноманітної природи у вигляді продукційних правил. Крім того, вони дають можливість визначити властивості динамічних рекурентних нечітких моделей Такагі – Сугено нульового порядку, що володіють хаотичною динамікою в сенсі Лі – Йорке, на підставі значень коефіцієнтів в консеквентах правил, а не на традиційному підході, що базується на дослідженнях перехідних функцій або часових рядів.

Основні результати розділу опубліковано в працях [1, 3, 17, 18, 22, 26].

У **четвертому розділі** розроблено інтелектуальну інформаційно-аналітичну систему підтримки прийняття рішень лікаря-епідеміолога, що включає інтелектуальні мультиагентні моделі динаміки захворюваності на дифтерійну інфекцію, грип та гострі респіраторні вірусні інфекції, сифіліс, ВІЛ-інфекцію, вірусний гепатит В, метод оперативного аналізу та побудови прогнозу захворюваності на грип та гострі респіраторні вірусні інфекції, спосіб епідеміологічної діагностики вірусного гепатиту В у лікувально-профілактичному закладі, модель динаміки захворюваності на іксодові кліщові борреліози, експертну систему диференціальної діагностики інфекцій сечовивідних шляхів, програмний продукт типу «Reminder» для контролю тривалості застосування сечових катетерів, спосіб епідеміологічної діагностики катетер-асоційованої інфекції сечовивідних шляхів, програмний продукт для автоматизованого аналізу рівня знань медичного персоналу про профілактику інфекцій, пов'язаних з наданням медичної допомоги. Універсальну інтелектуальну мультиагентну модель застосовано до моделювання шкідливого програмного забезпечення типу комп'ютерний хробак на прикладі епідемії Code Red.

Проведене імітаційне моделювання розроблених моделей показало їх переваги в порівнянні з методами, що існують. Вирішені актуальні практичні задачі інтелектуального моделювання епідемічних процесів систем популяційної динаміки.

Основні результати розділу опубліковано в працях [2, 7, 8-12, 16, 27-30].

У **додатках** наведено перелік публікацій за темою дисертації, відомості про апробацію результатів дисертації, акти про впровадження дисертаційного дослідження, відомості про інтелектуальне право на результати, використані в роботі, та деякі результати дослідження.

## ВИСНОВКИ

У дисертації наведено вирішення науково-прикладної задачі розробки інтелектуальних мультиагентних технологій в динамічних системах з епідемічним характером, що дозволяє врахувати бази знань агентів, їх комунікації, а також уникнути ускладнення аналізу по відношенню до популяційної динаміки, пов'язаного з поведінкою агентів, схожою з реальними системами і їх прийняттям рішень.

1. Проведено аналіз існуючих підходів і методів моделювання процесів популяційної динаміки; розглянуто основні принципи інтелектуального іміта-

ційного моделювання і його класифікація, існуючі методи інтелектуального імітаційного моделювання систем популяційної динаміки. На основі проведеного аналізу сформовано мету та завдання дисертаційного дослідження.

2. Формалізовано клас епідемічних процесів популяційної динаміки, заснований на факторах та характеристиках, що впливають на динаміку популяції, який на відміну від існуючих поширюється на нові галузі знань.

3. Розроблено універсальну інтелектуальну мультиагентну модель динаміки розповсюдження епідемічних процесів систем популяційної динаміки, засновану на інтелектуальних раціональних агентах, що функціонують в умовах логічної невизначеності. Модель дозволяє враховувати типи та структуру популяції, що моделюється, особливості розповсюдження епідемічного процесу. Описана узагальнена модель реалізує всі особливості мультиагентного підходу і є найбільш універсальною і сприйнятливою до типу епідемічного процесу.

4. Розроблено метод логічної взаємодії об'єктів інтелектуальної мультиагентної системи, заснований на частковій спостережуваності простору станів, який використовує адаптований алгоритм редукції можливих станів для довільної кількості агентів. Знайдено Парето оптимальну рівновагу Неша гри Байеса для інтелектуальних агентів.

5. Побудовано модель епідемічного процесу, засновану на застосуванні нечітких лінгвістичних правил, яка дозволяє враховувати невизначеності, пов'язані зі змінними, параметрами, граничними умовами і початковими станами і моделювати їх еволюцію, дотримуючись основних правил і закономірностей динаміки системи. Розроблено метод інтелектуального аналізу системи популяційної динаміки, заснований на нечітких рекурентних моделях, що дозволяє оцінити можливість виникнення хаотичної динаміки в сенсі Лі – Йорке системи, що моделюється, та застосовувати уніфікований опис процесів різноманітної природи у вигляді продукційних правил.

6. Проведене імітаційне моделювання розроблених моделей показало їх переваги в порівнянні з методами, що існують. Вирішені актуальні практичні задачі інтелектуального моделювання епідемічних процесів систем популяційної динаміки. Результати дослідження впроваджені в ДУ «Харківський обласний лабораторний центр Міністерства охорони здоров'я», КЗОЗ Обласна клінічна лікарня, ТОВ «Протектмастер Солюшнс», КЗОЗ «Обласний спеціалізований будинок дитини «Зелений Гай», у НДР Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», а також у навчальний процес кафедри інформатики Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ» та кафедри епідеміології Харківського національного медичного університету.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Чумаченко, Д. І. Інформаційна технологія епідеміологічного нагляду [Текст] / Д. І. Чумаченко, Т. О. Чумаченко // Інформаційні технології та інновації в економіці, управлінні проектами і програмами : [монографія] / за заг. ред.



В.О. Тимофеева, І.В. Чумаченко. – Харків: ФОП Панов А.М., 2016. – С.368 – 379.

2. Chumachenko, D. Investigation of agent-based simulation of malicious software / D. Chumachenko, S. Yakovlev [Text] // ECONTechMOD. An international quarterly journal, Vol. 5, No 4. – Poland: Lublin-Rzeszow, 2016. – pp. 61-67. (Входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, VazTech).

3. Чумаченко, Д. І. О нечетких рекуррентных отображениях при мультиагентном моделировании популяционной динамики [Текст] / Д. І. Чумаченко, С. В. Яковлев // Бионика интеллекта: Научно-технический журнал. №2 (87). – Х.: ХНУРЭ, 2016. – С. 23 – 27.

4. Chumachenko, D. Agent-Based Model of the Epidemic Process of Diseases with Multiple Routes of Infection Transmission Development and Evaluation [Text] / D. Chumachenko, T. Chumachenko // International Journal of Research Studies in Computer Science and Engineering (IJRSCSE), Vol. 3, Iss. 5. – India: ARC Publications Private Limited, 2016. – pp. 20-24. (Входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, CrossRef).

5. Чернышев, Ю. К. Оптимизация структуры событий для агентного моделирования эпидемического процесса [Текст] / Ю. К. Чернышев, А. В. Товстик, Д. І. Чумаченко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2013. – Вып. 59. – С.295-303. (Входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

6. Чумаченко, Д. І. Информационная технология имитационной системы эпидемического процесса [Текст] / Д. І. Чумаченко, Т. А. Чумаченко, Ю. К. Чернышев, А. В. Товстик // Научно-методический журнал «Клиническая информатика и телемедицина». – Харьков, 2012. – Т.8. Вып.9. – С.129-132. (Входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

7. Рыжко, П. П. Моделирование распространения дерматовенерологических заболеваний на основе мультиагентных технологий [Текст] / П. П. Рыжко, А. Ю. Соколов, Л. В. Рощенюк, Е. К. Чмыхун, Д. І. Чумаченко, А. А. Соколов // Научно-методический журнал «Клиническая информатика и телемедицина». – Х., 2008. – Т.4, Вып.5. – С.56 - 59. (Входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

8. Чумаченко, Д. І. Методика оцінки епідемічних ситуацій та прогнозування розвитку захворюваності на грип та ГРВІ [Текст] / Д. І. Чумаченко, Д. Г. Бондарева, О. О. Соколов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – №2(21). – С. 111-115.

9. Чумаченко, Т. О. Моделювання епідемічного процесу вірусного гепатиту В [Текст] / Т. О. Чумаченко, О. С. Коваленко, Д. І. Чумаченко, В. І. Макарова, Я. В. Акопян // Науково-практичний журнал «Медицина сьогодні і завтра». – Х.: ХНМУ, 2011. – №4(53). – С. 145-149.

10. Чумаченко, Д. І. Найпростіша модель розповсюдження інфекційної хвороби з множинними шляхами передачі на основі ситуаційного моделювання [Текст] / Д. І. Чумаченко, Т. О. Чумаченко, В. І. Макарова, О. С. Коваленко,

Я. В. Акопян // Проблеми військової охорони здоров'я. Збірник наукових праць української військово-медичної академії. Випуск 35. – Київ, 2012 – С.310-316.

11. Чумаченко, Д. И. Имитационное мультиагентное моделирование популяционной динамики на основе использования интеллектуальных агентов [Текст] / Д. И. Чумаченко, С. В. Яковлев // Теорія і практика розвитку сучасних наукових знань (частина II): матеріали Міжнародної науково-практичної конференції м. Київ, 24-25 грудня 2016 року. – Київ.: МЦНД, 2016. – С.56 – 59.

12. Chumachenko, D. Agent-based investigation of sexually transmitted infection [Electronic resource] / D. Chumachenko, T. Chumachenko // ISDS 2016 Annual Conference “New Frontiers in Surveillance: Data Science and Health Security” (Atlanta, USA, December, 6-8). Proceedings. – Atlanta, 2016. – P.40. – Access mode: [http://www.syndromic.org/storage/documents/2016\\_Conference/abstracts/posters/isds16\\_pos\\_agent-based\\_chumachenko.pdf](http://www.syndromic.org/storage/documents/2016_Conference/abstracts/posters/isds16_pos_agent-based_chumachenko.pdf)

13. Chumachenko, T. Effect of the Ukrainian Crisis on the Current Measles Situation and ways of Improving Surveillance [Electronic resource]/ T. Chumachenko, D. Chumachenko, T. Karlova // Online Journal of Public Health Informatics, Vol 7, №1 (2015), ISSN 1947-2579, USA. – P.188. – Access mode: <http://ojphi.org/ojs/index.php/ojphi/article/view/5944/4460>

14. Chernyshev, Yu. Development of intelligent agents for simulation of hepatitis B epidemic process [Text] / Yu. Chernyshev, D. Chumachenko, A. Tovstik // Proceedings of East West Fuzzy Colloquium 2013 (20th Zittau Fuzzy Colloquium, September 25 – 27, 2013). – IPM, 2013. – P.161 – 168.

15. Chumachenko, T. Multiagent Simulation of the Hepatitis B Epidemic Process [Electronic resource] / T. Chumachenko, D. Chumachenko, O. Sokolov // Online Journal of Public Health Informatics, Vol 5, №1 (2013), ISSN 1947-2579, USA. – P.178. – Access mode: <http://ojphi.org/ojs/index.php/ojphi/article/view/4585/5021>

16. Chernyshev, Yu. System of Simulation of Epidemic Diseases Spreading [Text] / Yu. Chernyshev, T. Chumachenko, D. Chumachenko, A. Tovstik // Proceedings of East West Fuzzy Colloquium 2012 (19th Zittau Fuzzy Colloquium, September 5 – 7, 2012). – IPM, 2012. – P.154 – 161.

17. Chumachenko, T. Monitoring of influenza and acute respiratory viral infections morbidity and simulation of its spreading [Text] / T. Chumachenko, O. Sokolov, D. Chumachenko // Late breaker abstract schedule / 59th ASTMН annual meeting, November 3-7, 2010, Atlanta, Georgia/. – Atlanta, Georgia, 2010. – P. 34.

18. Sokolov, Oleksiy Multiagent Investigation of Epidemic Disease Using Fuzzy Logic [Text] / Oleksiy Sokolov, D. Chumachenko, Oleksandr Sokolov // Proceedings of East West Fuzzy Colloquium 2006 (13th Zittau Fuzzy Colloquium, September 13 – 15, 2006). – IPM, 2006. – P.55 – 60.

19. Chumachenko, D. I. Application of fuzzy linguistic systems in epidemic process simulation [Текст] / Д. І. Чумаченко // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2016»: Збірник матеріалів конференції. – Харків: ХАІ, 2016. – С.197.

20. Чумаченко, Д. І. Математичне моделювання соціально-економічних систем з використанням раціональних агентів [Текст] / Д. І. Чумаченко // Труды

Международной научно-практической конференции «Математическое моделирование процессов в экономике и управлении проектами и программами (ММП-2016)» – Харьков-Николаев, 2016. – С.189 – 190.

21. Чумаченко, Д. И. Мультиагентное моделирование эпидемических заболеваний на примере гепатита В [Текст] / Д. И. Чумаченко // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2014»: Тези доповідей. – Харків: ХАІ, 2014. – Том 2. – С.6.

22. Чумаченко, Д. И. Применение алгоритма Takagi – Sugeno в решении задач математического моделирования [Текст] / Д. И. Чумаченко // Міжнародна науково-технічна конференція “Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2007”: Тези доповідей. – Харків: ХАІ, 2007. – С.167 – 168.

23. Спосіб прогнозування захворюваності на гепатит В за допомогою мультиагентного моделювання: Інформаційний лист №3-2014; Харк. нац. мед. ун-т МОЗ України, Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського, Укрмедпатентінформ МОЗ України. – К.: Б.в., 2014. – 4 с.

24. Патент України №90971, А61В10/00. Спосіб епідеміологічної діагностики вірусного гепатиту В у лікувально-профілактичному закладі / Чумаченко Т. О., Макарова В. І., Чумаченко Д. І. – №u201401729; Заявл. 24.02.2014; Опубл. 10.06.2014, Бюл. №11/2014.

25. Комп'ютерна програма «Компьютерная интерактивная имитационная среда агентного моделирования эпидемического процесса гепатита В «EventEpidSim»» / Чернишев Ю. К., Товстік А. В., Чумаченко Д. І., Чумаченко Т. О., Макарова В. І.: Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір №55118. – Зареєстр. 02.06.2014.

26. Комп'ютерна програма «Автоматизована система дослідження інфекційних захворювань за факторами ризику «ФАКТОР»» / Чумаченко Т. О., Радивоненко О. С., Бреус Н. В., Макарова В. І., Чумаченко Д. І.: Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір №56462. – Зареєстр. 11.09.2014.

27. Комп'ютерна програма «Мультиагентная модель динамики заболеваемости гриппом и ОРВИ «InfluenzaSim»» / Чумаченко Д. І.: Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір №68480. – Зареєстр. 07.11.2016.

28. Комп'ютерна програма «Мультиагентная модель динамики заболеваемости на сифилис «SyphilisSim»» / Чумаченко Д. І.: Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір №68481. – Зареєстр. 07.11.2016.

29. Комп'ютерна програма «Мультиагентная модель динамики заболеваемости на дифтерию «DiphtheriaSim»» / Чумаченко Д. І.: Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір №68482. – Зареєстр. 07.11.2016.

30. Комп'ютерна програма «Мультиагентна система розповсюдження комп'ютерних хробаків у повнозв'язних гетерогенних мережах «MASWorm»» / Чумаченко Д. І., Чумаченко К. І.: Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір №68849. – Зареєстр. 29.11.2016.

## АНОТАЦІЯ

**Чумаченко Д.І.** Інтелектуальні мультиагентні технології в епідемічних процесах систем популяційної динаміки. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.23 – системи та засоби штучного інтелекту. – Харківський національний університет радіоелектроніки, МОН України, Харків, 2017.

Метою дослідження є створення та дослідження інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для отримання довгострокового прогнозу в системах популяційної динаміки за допомогою мультиагентного моделювання. Розроблено мультиагентну модель популяційної динаміки, засновану на інтелектуальних раціональних агентах, що функціонують в умовах логічної невизначеності. Формалізовано клас епідемічних процесів, заснований на факторах та характеристиках, що впливають на динаміку популяції. Удосконалено метод ідентифікації об'єктів інтелектуальної мультиагентної системи, заснований на частковій спостережуваності простору станів для довільної кількості агентів. Дістав подальший розвиток метод інтелектуального аналізу популяційної динаміки, заснований на нечітких рекурентних моделях, що дозволяє оцінити можливість виникнення хаотичної динаміки модельованої системи.

**Ключові слова:** штучний інтелект, мультиагентне моделювання, епідемічний процес, популяційна динаміка, нечіткий аналіз даних, хаотична динаміка.

## АННОТАЦИЯ

**Чумаченко Д.И.** Интеллектуальные мультиагентные технологии в эпидемических процессах систем популяционной динамики. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание степени кандидата технических наук по специальности 05.13.23 – системы и средства искусственного интеллекта. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, МОН Украины, 2017.

Целью исследования является создание и исследование интеллектуальной системы поддержки принятия решений для получения долгосрочного прогноза в системах популяционной динамики с помощью мультиагентного моделирования. Разработана мультиагентная модель популяционной динамики, основанная на интеллектуальных рациональных агентах, функционирующих в условиях логической неопределенности. Формализован класс эпидемических процессов, основанный на факторах и характеристиках, влияющих на динамику популяции. Усовершенствован метод идентификации объектов интеллектуальной мультиагентной системы, основанный на частичной наблюдаемости пространства состояний для произвольного количества агентов. Получил дальнейшее развитие метод интеллектуального анализа популяционной динамики, основанный на нечетких рекуррентных моделях, позволяющий оценить возможность возникновения хаотической динамики моделируемой системы.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, мультиагентное моделирование, эпидемический процесс, популяционная динамика, нечеткий анализ данных, хаотическая динамика.

## ABSTRACT

**Chumachenko D.I.** Intelligent multiagent technologies in epidemic processes of population dynamics systems. – Manuscript.

The thesis of awarding the academic degree of the Candidate of Technical sciences by specialty 05.13.23 – systems and means of artificial intelligence. – Kharkiv National University of Radio Electronics MES of Ukraine, Kharkiv, 2017.

The aim of the thesis is to create and research the intelligent decision support system for long-term forecast in population dynamics systems using multiagent modelling.

The analysis of existing approaches and methods of population dynamics modeling was carried out; the basic principles of intelligent simulation modeling and its classification, existing methods of intelligent simulation modeling of population were analyzed. Based on the analysis, tasks and a goal of the thesis were defined.

The mathematical description of the model of formalization of the class of epidemic processes of population dynamics was described. It is based on the factors and characteristics that affect the dynamics of the population, which, unlike existing, extend to new areas of knowledge, which allows developing intelligent decision support system for forecasting the spread of the epidemic process in population dynamics systems and implementing the preventive measures in timely manner.

A universal intellectual multiagent model of the dynamics of spread of epidemic processes of population dynamics systems was built. It is based on rational intelligent agents operating in conditions of logical uncertainty that takes into account the knowledge of agents in the defined conditions, allowing obtaining a long-term forecast of the dynamic system, unlike existing ones. The model allows taking into account the types and structure of the modeled population, the features of the spread of the epidemic process. The described generalized model realizes all the features of the multiagent approach and is the most universal and susceptible to the type of epidemic process. The advantage of this model construction is the ease in improving and complicating the structure of the simulated system. You can add new control parameters without changing already defined modeling patterns, significantly complicate and expand the area under investigation, and move to higher or lower abstraction levels.

The structure of intellectual rational agents functioning under conditions of logical uncertainty is developed. The structure, unlike existing ones, takes into account the knowledge of agents under given conditions. This allows obtaining a long-term forecast of the dynamic system. The policy of agents, their intellectual decision-making and optimal actions depending on the knowledge base was developed.

The method of identification of objects of an intelligent multiagent system based on partial observability of the state space is improved. The method, unlike existing methods, uses an adapted algorithm for reducing possible states for an arbitrary number of agents.

A software implementation of the intelligent behavior of multiagent system objects using the NetLogo environment and Prolog programming language has been de-

veloped. The proposed information technology for the integration of declarative languages with NetLogo's multiagent modeling environment can be applied to a wide range of tasks: expert systems, automation of technological processes using robotics, emergency response systems in emergency situations, socio-economic monitoring systems, etc.

A model of the epidemic process based on the application of fuzzy linguistic rules is constructed, which allows taking into account the uncertainties associated with variables, parameters, boundary conditions and initial states and simulate their evolution, adhering to the basic rules and regularities of system dynamics. The method of intellectual analysis of the system of population dynamics based on fuzzy recurrent models is developed. The method makes it possible to estimate the possibility of the appearance of chaotic dynamics in the sense of Li – Yorke of the modeled system, and to apply a unified description of processes of various nature in the form of production rules.

An intellectual information and analytical system for decision-making support of an epidemiologist has been developed. It includes an intelligent multiagent model of diphtheria infection morbidity, an intelligent multiagent model of the dynamics of the incidence of influenza and acute respiratory viral infections, the method of operative analysis and the construction of the prognosis of the incidence of influenza and acute respiratory viral infections, model of the dynamics of the incidence of syphilis, an intellectual multiagent model of the dynamics of the incidence of HIV infection, an intelligent multiagent model of the dynamics of the incidence of viral hepatitis B, a method for the epidemiological diagnosis of viral hepatitis B in the treatment and prophylactic institution, a model of the incidence of ixodes tick-borne borreliosis, an expert system for differential diagnosis of urinary tract infections, a Reminder-type software product for monitoring the duration of urinary catheters, a method for the epidemiological diagnosis of catheter-associated urinary tract infections, a software product for automated analysis of the level of knowledge of medical personnel on the prevention of infections associated with the provision of medical care. A universal intelligent multiagent model is applied to the modeling of malicious software such as a computer worm using the example of the Code Red epidemic.

The simulation of the developed models showed their advantages in comparison with existing methods. The actual practical problems of intellectual modeling of epidemic processes of population dynamics systems are solved. The results of the research are implemented in the Kharkiv Regional Laboratory Center of the Ministry of Health, the Regional Clinical Hospital, Protectmaster Solutions, Ltd., the Regional Specialized Orphanage “Zeleniy Gay”, to R&D of the National Aerospace University, as well as in the educational process of the Department of Informatics of the National Aerospace University and of the Department of Epidemiology of Kharkov National Medical University.

**Keywords:** artificial intelligence, multiagent simulation, epidemic process, population dynamics, fuzzy data analysis, chaotic dynamics.