

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»,
Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки,
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЧУМАЧЕНКО ДМИТРО ІГОРОВИЧ

УДК 004.032.91

ДИСЕРТАЦІЯ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МУЛЬТИАГЕНТНІ ТЕХНОЛОГІЇ
В ЕПІДЕМІЧНИХ ПРОЦЕСАХ СИСТЕМ ПОПУЛЯЦІЙНОЇ ДИНАМІКИ

05.13.23 – системи та засоби штучного інтелекту

12 Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Д. І. Чумаченко

Науковий керівник Яковлев Сергій Всеволодович,
доктор фізико-математичних наук, професор

Всі примірники дисертації ідентичні за змістом.
Учений секретар спеціалізованої
вченої ради Д64.052.01 Винокурова О.А.

Харків - 2017

АНОТАЦІЯ

Чумаченко Д.І. Інтелектуальні мультиагентні технології в епідемічних процесах систем популяційної динаміки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.23 – системи та засоби штучного інтелекту (12 – інформаційні технології). – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2017.

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

Проведено аналіз існуючих підходів і методів моделювання процесів популяційної динаміки; розглянуто основні принципи інтелектуального імітаційного моделювання і його класифікацію, існуючі методи інтелектуального імітаційного моделювання систем популяційної динаміки. На основі проведеного аналізу визначено мету і завдання дисертаційного дослідження.

Запропоновано математичний опис моделі для формалізації класу епідемічних процесів популяційної динаміки, заснований на факторах і 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.

Розроблено універсальну інтелектуальну мультиагентну модель динаміки розповсюдження епідемічних процесів систем популяційної

динаміки, засновану на інтелектуальних раціональних агентах, що функціонують в умовах логічної невизначеності, яка на відміну від існуючих враховує знання агентів у заданих умовах, що дозволяє одержати довгостроковий прогноз динамічної системи. 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 й сприйнятливою до типу епідемічного процесу. Перевагою такої побудови моделі є легкість в удосконаленні та ускладненні структури, що моделюється. Без змін уже визначених патернів моделювання можна додати нові керуючі параметри, значно ускладнити і розширити ділянку, що досліджується, а також перейти на вищий або нижчий рівень абстракції.

Розроблено структуру інтелектуальних раціональних агентів, що функціонують в умовах логічної невизначеності, яка на відміну від існуючих враховує знання агентів у заданих умовах, що дозволяє одержати довгостроковий прогноз динамічної системи. Розроблено політику агентів, інтелектуальне прийняття ними рішень та оптимальні дії в залежності від бази знань.

Удосконалено метод ідентифікації об'єктів інтелектуальної мультиагентної системи, заснований на частковому спостереженні простору станів, який на відміну від існуючих методів використовує адаптований алгоритм редукції можливих станів для довільної кількості агентів.

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: експертних систем, автоматизації технологічних процесів з використанням робототехніки, системи екстреного реагування в надзвичайних ситуаціях, соціоекономічних моніторингових систем тощо.

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.

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 бореліози, 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.

Розроблено інтелектуальну мультиагентну модель розповсюдження шкідливого програмного забезпечення типу «комп'ютерний хробак» на прикладі вірусу Code Red. Реалізовано й досліджено моделі зі структурами SEIQR, SAIR, PSIDR та SAIDR. Дослідження побудованих моделей дозволяє висунути гіпотезу про те, що для попередження виникнення епідемії шкідливого програмного забезпечення, часовий ряд, що відповідає кількості заражених хабів, не повинен перевищувати деяке порогове значення. Тобто

динамічна система, що описує мультиагентну модель, повинна бути відображенням кінцевої множини I в себе, $ABS:I \rightarrow I$, що для нелінійних відображень є ознакою хаотичної динаміки.

Розроблено інтелектуальну інформаційно-аналітичну систему підтримки прийняття рішень лікаря епідеміолога. Впровадження СППР в систему охорони здоров'я України дозволить вжити своєчасні профілактичні та протиепідемічні заходи зі зниження захворюваності на інфекційні хвороби та уникнення епідемій на всіх рівнях.

Розроблено інтелектуальну мультиагентну модель епідемічного процесу грипу та гострих респіраторних вірусних інфекцій (ГРВІ). На засадах моделі реалізовано програмний комплекс, що включає збір щоденних даних щодо захворюваності на грип та ГРВІ, розрахунок епідемічних порогів захворюваності на грип та ГРВІ у вигляді верхніх толерантних меж показників неепідемічної захворюваності, передачу даних з районів у місто/область та укладання звітів. Запропонований програмний комплекс вирішує поставлені задачі прогнозування динаміки захворюваності й розвитку епідемії грипу та ГРВІ, що значною мірою полегшує роботу лікарів-епідеміологів щодо профілактики й попередження епідемії даних захворювань.

Розроблено інтелектуальну мультиагентну модель епідемічного процесу ВІЛ-інфекції. Модель побудована на основі реальних статистичних даних щодо захворюваності на ВІЛ-інфекцію на території України. Результати імітаційного моделювання показують «сплески» кількості захворілих агентів. Ці «сплески» мають тенденцію до повторення через приблизно рівні проміжки часу, що проявляється і в реальному житті. Якщо продовжити моделювання на більш довгий термін, то, не дивлячись на зростаючу похибку, можна спостерігати тенденцію до зменшення кількості хворих в кожен епідемічний період.

Розроблено інтелектуальну мультиагентну модель епідемічного процесу дифтерійної інфекції. Модель побудована на основі реальних статистичних

даних щодо захворюваності на дифтерію в Харківській області. Результати моделювання дозволяють визначити відсоток населення, що підлягає обов'язковій імунізації для запобігання епідемії.

Розроблено інтелектуальну мультиагентну модель епідемічного процесу сифілісу. Модель протестована на реальних даних по Харківській області. Результатами експериментів над побудованою моделлю є виявлення факторів, що впливають на зниження захворюваності на шкірно-венеричні захворювання, які дозволяють визначити напрямки профілактики лікування сифілісу та головні чинники зменшення захворюваності. Як видно з результатів моделювання, соціальні чинники превалюють над медичними, що дає підстави для проведення роз'яснювальної політики в галузі охорони здоров'я серед населення, особливо молоді.

Проведене імітаційне моделювання розроблених моделей показало їх переваги перед існуючими методами. Вирішено актуальні практичні задачі інтелектуального моделювання епідемічних процесів систем популяційної динаміки. Результати дослідження впроваджені в ДУ «Харківський обласний лабораторний центр Міністерства охорони здоров'я України», КЗОЗ «Обласна дитяча 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.

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

ABSTRACT

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

The thesis of awarding the academic degree of the Candidate of Technical sciences (Philosophy Doctor) by specialty 05.13.23 – systems and means of artificial intelligence (12 – information technologies). – National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv National University of Radio Electronics, 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 modelling 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 developed. 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.

An intelligent multiagent model for the distribution of malicious software such as "computer worm" was developed using the example of the Code Red virus. Models with structures SEIQR, SAIR, PSIDR and SAIDR were implemented and investigated. The study of the constructed models allows us to propose a hypothesis that for the non-emergence of the epidemic of malicious programs, the time series corresponding to the number of infected hubs should not exceed a certain threshold value. That is, the dynamic system describing the multiagent model should be a reflection of the finite set of I into itself, $ABS: I \rightarrow I$, which for nonlinear mappings is a sign of chaotic dynamics.

An intellectual information-analytical system for supporting the decision-

making of an epidemiologist has been developed. Introduction of DSS in the health care system of Ukraine will allow taking timely preventive and preventive anti-epidemic measures to reduce the incidence of infectious diseases and avoid epidemics at all levels.

An intelligent multiagent model of the epidemic process of influenza and acute respiratory viral infections has been developed. On the basis of the model, a software package was implemented that includes the collection of daily data on the incidence of influenza and ARVI, the calculation of the epidemiological thresholds of the incidence of influenza and ARVI in the form of the upper tolerant boundaries of indicators of non-epidemic morbidity, the transfer of data from districts to the city / region; and report generation. The proposed software package solves the stated tasks of forecasting the dynamics of the incidence and development of the epidemic of influenza and ARVI, which greatly facilitates the work of epidemiologists in the prevention and prevention of epidemics of these diseases.

An intellectual multiagent model of the HIV epidemic process has been developed. The model is based on real statistics on the incidence of HIV infection in Ukraine. The results of simulation show "bursts" of the number of diseased agents. These waves tend to repeat at approximately equal intervals of time, and it also manifests itself in real life. If we continue the modeling for a longer period, then despite the growing error, we can observe a tendency to decrease the number of patients in each epidemic period.

An intelligent multiagent model of the epidemic process of diphtheria infection has been developed. The model is based on real statistical data on the incidence of diphtheria in the Kharkov region. The results of the modeling allow determining the percentage of the population subject to compulsory immunization to prevent the epidemic.

An intelligent multiagent model of the epidemic process of syphilis has been developed. The model was tested on real data in the Kharkov region. The results of experiments on the constructed model is to identify factors that affect the reduction

of the incidence of cutaneous and venereal diseases, which allow us to determine the direction of the prevention of syphilis treatment and the main factors in reducing the incidence. As can be seen from the results of the simulation, social factors prevail over medical ones, which gives grounds for conducting public health explanatory policy among the population, especially young people.

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 of Ukraine, the Regional Children 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 Kharkiv National Medical University.

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

Список публікацій здобувача

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. Тимофєєва, 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. – P. 61–67. (Входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, BazTech).

3. Чумаченко, Д. И. О нечетких рекуррентных отображениях при мультиагентном моделировании популяционной динамики [Текст] / Д. И. 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, Issue 5. – India: ARC Publications Private Limited, 2016. – P. 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. И. 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. И. Информационная технология имитационной системы эпидемического процесса [Текст] / Д. И. 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. И. 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. И. 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: зб. наук. праць Української військово-медичної академії. – Київ, 2012. – Вип. 35. – С. 310–316.

11. Чумаченко, Д. І. 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

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 (20-th Zittau Fuzzy Colloquium, September 25 – 27, 2013). – Institut für Prozesstechnik Prozessautomatisierung und Messtechnik, 2013. – P. 161–168.

15. Chumachenko, T. Multiagent Simulation of the Hepatitis B Epidemic Process [Text] / 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 (19-th Zittau Fuzzy Colloquium, September 5 – 7, 2012). – Institut für Prozesstechnik Prozessautomatisierung und Messtechnik, 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 / 59-th ASTMH 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 (13-th Zittau Fuzzy Colloquium, September 13 – 15, 2006). – Institut für Prozesstechnik Prozessautomatisierung und Messtechnik, 2006. – P. 55–60.

19. Chumachenko, D. I. Application of fuzzy linguistic systems in epidemic process simulation [Текст] / D. I. Chumachenko // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2016»: Зб. 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. – Т. 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.С. 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. № 1 1/2014.

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.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	20
ВСТУП	21
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ І ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ	28
1.1 Моделі і методи інтелектуального імітаційного моделювання популяційної динаміки	28
1.2 Сучасні підходи в мультиагентному моделюванні	33
1.3 Прогнозування епідемічних процесів в системах популяційної динаміки	42
1.4 Постановка задачі дослідження	55
1.5 Висновки до першого розділу	56
РОЗДІЛ 2. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА МУЛЬТИАГЕНТНА СИСТЕМА ПОПУЛЯЦІЙНОЇ ДИНАМІКИ	57
2.1 Епідемічні процеси як об'єкти популяційної динаміки	57
2.2 Розробка структури універсальної системи популяційної динаміки	61
2.2.1 Структура агентів	61
2.2.2 Середовище	65
2.2.3 Взаємодія агентів	66
2.3 Моделювання популяційної динаміки на основі інтелектуальних раціональних агентів	71
2.4 Інтелектуальна і логічна взаємодія агентів	78
2.5 Дослідження та реалізація інтелектуальної поведінки мультиагентної системи популяційної динаміки	89
2.6 Експериментальне дослідження інтелектуального мультиагентного підходу до прогнозування епідемічних процесів	94
2.6.1 Налаштування моделі	94

2.6.2	Перевірка точності прогнозу	96
2.7.	Висновки до другого розділу	98
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОПУЛЯЦІЙНОЇ ДИНАМІКИ МЕТОДОМ НЕЧІТКИХ РЕКУРЕНТНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ		100
3.1	Дослідження стійкості інтелектуальної моделі популяційної динаміки	100
3.2	Застосування нечітких правил до опису епідемічних процесів	102
3.3	Оцінка тривалості прогнозу моделі з точки зору хаотичної динаміки	110
3.4.	Висновки до третього розділу	126
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ПРИКЛАДНИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНИХ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ-ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ		128
4.1	Інтелектуальна інформаційно-аналітична система розповсюдження шкідливого програмного забезпечення типу «мережевий хробак» у повнозв'язних гетерогенних мережах	128
4.2	Структура інтелектуальної інформаційно-аналітичної системи підтримки-прийняття рішень лікаря епідеміолога	142
4.3	Інформаційно-аналітична система динаміки моделі типу SEIR	145
4.3.1	Проблема захворюваності на грип та ГРВІ	145
4.3.2	Налаштування інтелектуальної мультиагентної моделі	146
4.3.3	Програмна реалізація інтелектуальної мультиагентної моделі	149
4.4	Інформаційно-аналітична система динаміки моделі типу SICRD	153
4.4.1	Проблема захворюваності на ВІЛ-інфекцію	153
4.4.2	Налаштування інтелектуальної мультиагентної моделі	154
4.4.3	Інтерполяція результатів моделювання	158
4.4.4	Програмна реалізація інтелектуальної мультиагентної моделі	161
4.5	Інформаційно-аналітична система динаміки моделі типу SEICR	165

4.5.1 Проблема захворюваності на дифтерійну інфекцію	165
4.5.2 Налаштування інтелектуальної мультиагентної моделі	166
4.6 Інформаційно-аналітична система динаміки моделі типу $SI_p I_s I_L I_T R$	170
4.6.1 Проблема захворюваності на сифіліс	170
4.6.2 Налаштування інтелектуальної мультиагентної моделі	171
4.7. Висновки до четвертого розділу	174
ВИСНОВКИ	176
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	178
ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача за темою дисертації	206
ДОДАТОК Б. Відомості про апробацію результатів дисертації	211
ДОДАТОК В. Акти впровадження результатів досліджень	212
ДОДАТОК Г. Відомості про інтелектуальне право на результати дослідження	223
ДОДАТОК Д. Метод оперативного аналізу та побудови прогноза захворюваності на грип та ГРВІ	232
ДОДАТОК Е. Спосіб епідеміологічної діагностики вірусного гепатиту В у лікувально-профілактичному закладі	238
ДОДАТОК Ж. Модель динаміки захворюваності на іксодові кліщові бореліози	242
ДОДАТОК И. Експертна система диференціальної діагностики інфекцій сечовивідних шляхів	255
ДОДАТОК К. Програмний продукт типу «Reminder» для контролю тривалості застосування сечових катетерів	258
ДОДАТОК Л. Спосіб епідеміологічної діагностики катетер-асоційованої інфекції сечовивідних шляхів	265
ДОДАТОК М. Програмний продукт для автоматизованого аналізу рівня знань медичного персоналу про профілактику інфекцій, пов'язаних з наданням медичної допомоги	279

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ABS – Agent Based System.
- CRv1 – Code Red (version 1).
- CRv2 – Code Red (version 2).
- DoS – Denial of Service.
- GPSS – General Purpose Simulation System.
- IIS – Internet Information Server.
- KQML – Knowledge Query and Manipulation Language.
- MIDAS – Models of Infectious Disease Agent Study.
- PSIDR – Progressive Susceptible – Infected – Detected – Recovered.
- SAIR – Susceptible – Antidotal – Infected – Recovered.
- SEICR – Susceptible – Exposed – Infected – Convalescent – Recovered.
- SEICRD – Susceptible – Exposed – Infected – Convalescent – Recovered – Dead.
- SEIQR – Susceptible – Exposed – Infected – Quarantined – Recovered.
- SEIR – Susceptible – Exposed – Infected – Recovered.
- SI – Susceptible – Infected.
- SICRD – Susceptible – Infected – Convalescent – Recovered – Dead.
- SI_pI_sI_LI_TR – Susceptible – Primary – Secondary – Latent – Tertiary – Recovered.
- SIR – Susceptible – Infected – Recovered.
- SOARS – System Oriented Agent Role Simulator.
- STEM – Spatiotemporal Epidemiological Modeler Project.
- ВІЛ – вірус імунодефіциту людини.
- ГРВІ – гостра респіраторна вірусна інфекція.
- ЕОМ – електронна обчислювальна машина.
- СД – системна динаміка.
- СНІД – синдром набутого імунодефіциту.
- СППР – система підтримки прийняття рішень.
- ТС – Такагі – Сугено.

ВСТУП

Актуальність теми. Питанням розробки інтелектуальних проблемно-орієнтованих систем та їх застосування у популяційній динаміці присвячені сучасні роботи вчених. Управління епідемічним процесом систем популяційної динаміки є важливою частиною цієї галузі. Найважливішим інструментом вивчення цих систем є адекватні математичні моделі прогнозування динаміки та проявів епідемічного процесу. На сьогодні 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'язаної з поведінкою агентів, схожою з реальними системами і 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 використанням інформаційних технологій» (ДР № 0112U002380); «Методологія удосконалення промислових паливно-енергетичних комплексів і авіаційних двигунів з використанням 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 спостережуваності світу.

Цілі та задачі 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 наступних 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 вирішення практичних завдань, пов'язаних 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 хаотичну поведінку. Для побудови інтелектуальних моделей систем популяційної динаміки використані мультиагентні технології імітаційного моделювання.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи. 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 у 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. Дістав 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.

Практичне значення результатів дисертації. 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 у прикладних задачах епідеміології та ідентифікації шкідливого програмного забезпечення в негомогенних комп'ютерних мережах.

Результати дисертаційної роботи впроваджено на підприємствах України та у навчальний процес, що підтверджено відповідними актами. Це наступні:

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

– Комунальний заклад охорони здоров'я «Обласна дитяча клінічна лікарня» (акт впровадження від 02.12.2015 р.);

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

– Комунальний заклад охорони здоров'я «Обласний спеціалізований

будинок дитини «Зелений Гай» (акт впровадження від 05.09.2016 р.);

– у науково-дослідницьку роботу Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» (акт впровадження від 16.12.2016 р.)

– у навчальний процес кафедри інформатики Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» (акт впровадження від 14.12.2016 р.) у рамках курсів «Системи штучного інтелекту», «Імітаційно-подійне моделювання», «Захист інформації в ІКС» та «Programming and numerical methods»;

– 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 написані в 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 застосована 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 прогнозної 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 ГРВІ; [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 інтерактивного інтелектуального імітаційного середовища для мультиагентного моделювання епідемічного процесу; [26] – архітектура зовнішніх впливів на модель епідемічного процесу, що дозволяє враховувати фактори ризику; [30] – методи інтелектуальної взаємодії агентів у 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 в 30 наукових роботах: 1 монографія, 9 статей, з яких 5 статей у фахових виданнях України з технічних наук, 2 статі у фахових виданнях України з інших наук, 2 статті у закордонних виданнях (5 статей входять до міжнародних наукометричних баз), 12 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях, 1 патент, 1 інформаційний лист про нововведення в сфері охорони здоров'я, 6 свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.

Подяка. Висловлюю щире подяку у виборі напрямку досліджень і всебічній підтримці на всіх етапах навчання та підготовки дисертаційного дослідження моєму 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 Олександрю Юрійовичу.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ І ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ

Штучний інтелект – галузь комп'ютерної науки, що займається створенням комп'ютерних систем, які емулюють людське рішення проблемної поведінки з метою розуміння людського інтелекту. Математичне моделювання – мультидисциплінарна галузь системної інженерії розробки програмного забезпечення та комп'ютерних наук, що спрямована на створення надійних методологій побудови комп'ютеризованих моделей з метою надання інструментів, які можуть допомогти людям у вивченні поведінки систем [31]. Хоча у кожній з цих дисциплін є своя основна задача, між ними існує багато перетинів і перехресного досвіду. З точки зору даного дослідження моделювання розглядається як уявлення деяких фундаментальних і складних завдань, при вирішенні яких використовуються концепції і методи штучного інтелекту.

1.1 Моделі і методи інтелектуального імітаційного моделювання популяційної динаміки

Для виділення класу імітаційних моделей необхідно попередньо визначити поняття моделі.

Модель – це система, дослідження якої служить засобом для отримання інформації про іншу систему, це спрощене уявлення реального пристрою і/або процесів та явищ, що протікають в ньому [31].

Моделювання є основним методом досліджень у всіх галузях знань і науково обґрунтованим методом оцінок характеристик складних систем, що використовується для прийняття рішень в різних сферах соціальної діяльності. Системи, які існують і проектуються, можна ефективно досліджувати за допомогою математичних моделей, що реалізуються на

сучасних ЕОМ, які в цьому випадку виступають в якості інструменту експериментатора з моделлю системи [32].

Будемо вважати, що існує певний об'єкт «реального світу», який цікавить дослідника, – цільовий об'єкт [33]. Необхідно створити модель цільового об'єкта, яка буде більш формалізованою для вивчення, ніж сам об'єкт. Також передбачається, що висновки, зроблені про модель, будуть також застосовуватися і до цільового об'єкту, тому що структура моделі відповідає структурі реальної системи. Оскільки обчислювальні можливості обмежені, модель завжди буде простішою, ніж цільовий об'єкт [34].

При моделюванні соціальних процесів цільовий об'єкт завжди є динамічною сутністю, яка змінюється з перебігом часу і реагує на навколишнє середовище. Він має власну структуру і поведінку. Це означає, що модель також має бути динамічною. Опис моделі можливий в різних представленнях (математичні рівняння, логічні твердження, комп'ютерна програма), однак щоб дізнатися з представлення про динаміку процесів, що досліджуються, необхідно вивчити, яким чином модель розвивається з перебігом часу [35]. Одним із способів дослідження є застосування аналітичного підходу, який веде до отримання майбутньої структури моделі з опису за допомогою логіки або математичних методів [36].

Однак аналітичні рішення не завжди існують, а ті, що існують, не завжди просто знайти. Тоді застосовують імітаційне моделювання, яке є динамічним. Імітаційну модель можна розглядати як множину правил (диференціальних рівнянь, карт станів, автоматів, мереж тощо), які визначають, у який стан система перейде в майбутньому із заданого поточного стану. Імітація тут – це процес «виконання» моделі, який проводить її через зміни стану у часі [37]. У загальному випадку для складних проблем, де час і динаміка важливі, імітаційне моделювання являє собою більш потужний засіб аналізу.

В аналітичних моделях відношення між моделлю і цільовим об'єктом виходять з представлення моделі [38]. Як показано на рис. 1.1, дослідник

розробляє модель (наприклад, набір рівнянь) через абстракцію від соціальних процесів, що передбачаються до прогнозованих даних. Ці рівняння будуть включати параметри, величини яких визначаються в процесі оцінки отриманих прогнозованих даних (на даному етапі, як правило, використовується статистичний пакет). Також при розробці моделі дослідник збирає деякі статистичні дані для оцінки адекватності отриманих прогнозів.

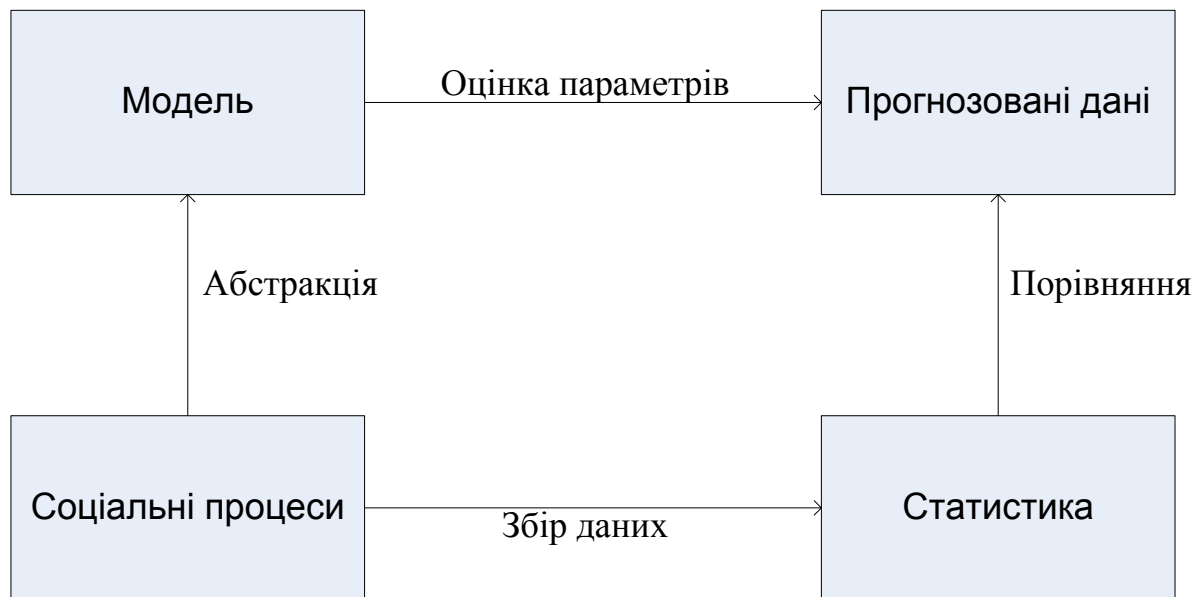


Рисунок 1.1 – Логіка аналітичного моделювання

Аналогічна логіка лежить в основі використання імітаційних моделей (рис. 1.2). Дослідник також розробляє модель, засновану на соціальних процесах, що передбачаються, однак на цей раз модель ґрунтується на комп'ютерній програмі, а не на дискретних рівняннях [39]. Модель «запускається», та її поведінка вимірюється, тобто використовується для генерації змодельованих даних. Отримані модельні дані потім порівнюються зі статистичними даними, щоб перевірити, чи отримуються за допомогою моделі результати, аналогічні реальним процесам.

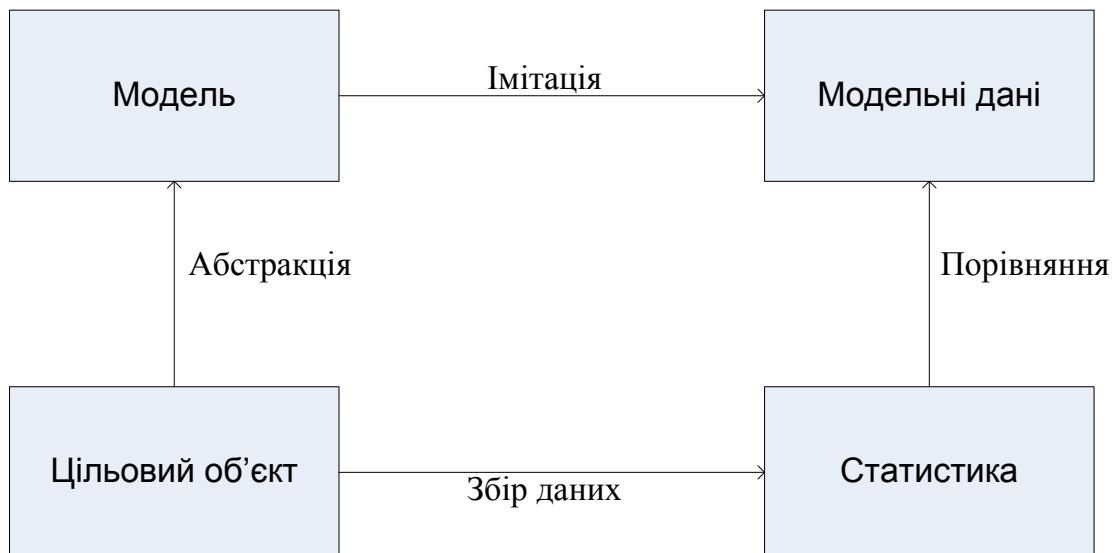


Рисунок 1.2 – Логіка імітаційного моделювання

Імітаційне моделювання можна розділити на чотири основні підходи [36]:

- системна динаміка;
- динамічні системи;
- дискретно-подієве моделювання;
- мультиагентне моделювання.

Системна динаміка (СД) була розроблена і запропонована Джеєм Форрестером наприкінці 1950-х як «дослідження інформаційних зворотних зв'язків у промисловій діяльності з метою показати як організаційна структура, посилення (в політиках) та затримки (в прийнятті рішень та дій) взаємодіють, впливаючи на успішність підприємства» [40]. Додатки СД включають також соціальні, урбаністичні, екологічні системи. Процеси, що відбуваються в реальному світі, в СД представляються в термінах накопичувачів (наприклад, матеріальних об'єктів, знань, людей, грошей), потоків між цими накопичувачами, і інформації, яка визначає величину цих потоків. СД абстрагується від окремих об'єктів і подій і передбачає «агрегатний» погляд на процеси. Моделюючи із застосуванням підходу СД, структура і поведінка системи представляється як множина позитивних і

негативних зворотних зв'язків і затримок, що взаємодіють [41]. Математично системно-динамічна модель – це система диференціальних рівнянь.

Динамічні системи моделювалися задовго до виникнення СД і є її прообразом. Моделювання динамічних систем використовується інженерами в механіці, електроніці, енергетиці, хімії як частина стандартного процесу розробки. Зазвичай при розробці систем управління для різних галузей використовують структурні схеми [42]. Відповідна математична модель, як і в разі СД, буде складатися з набору змінних стану і системи алгебро-диференціальних рівнянь над ними. На відміну від системної динаміки тут змінні стану природно безперервні, не є агрегатами дискретних об'єктів і мають прямий «фізичний» зміст: координата, швидкість, тиск, концентрація, тощо. Математична різноманітність і складність в динамічних системах можуть бути значно вище, ніж в системній динаміці, так що будь-яке завдання із застосуванням СД може бути вирішене інструментами для моделювання динамічних систем, і навіть з більш високою точністю (завдяки більш досконалим чисельним методам). Однак, такі інструменти, розроблені під інженерні потреби, не є зручними для аналітиків системної динаміки.

В основі дискретно-подієвого моделювання лежить концепція заявок, ресурсів і потокових діаграм, що визначають потоки заявок і використання ресурсів. Цей підхід запропонований Джеффри Гордоном, який в 1960-х придумав мову GPSS [43]. Заявки – це пасивні об'єкти, що представляють людей, деталі, документи, задачі, повідомлення тощо. Вони подорожують через потокові діаграми, стоячи в чергах, обробляючись, захоплюючи та звільняючи ресурси, розділяючись, з'єднуючись тощо. Існує близько сотні комерційних інструментів, що так чи інакше підтримують подібний підхід моделювання: деякі загального призначення, більшість націлені на певні ніші: обслуговування, бізнес-процеси, виробництво, логістика і таке інше. Їх інтерфейси, призначені для користувача, можуть значно відрізнитися із-за спеціалізації, але за ними неодмінно стоїть більш-менш однакове дискретно-подієве ядро комп'ютерної програми, що виконує основні функції

моделювання. Дискретно-подієву модель можна розглядати як глобальну схему обробки заявок, зазвичай зі стохастичними елементами.

За допомогою мультиагентного моделювання проводиться багато досліджень та розробок в різних галузях знань, наприклад, в штучному інтелекті, теорії складних систем, теорії ігор тощо. В науковій літературі відсутнє загальновизнане визначення, що таке агент. Досі існують різні думки про те, які якості повинен мати об'єкт, щоб називатися агентом: ініціативність і реактивність, орієнтація в просторі, здатність навчатися, спілкуватися, інтелект тощо [44]. Однак всі мультиагентні моделі значно децентралізовані. На відміну від системної динаміки або дискретно-подієвих моделей тут немає такого місця, де поведінка системи в цілому визначалася б централізовано. Замість цього аналітик визначає поведінку на індивідуальному рівні, а глобальна поведінка виникає як результат діяльності багатьох (десятків, сотень, тисяч, мільйонів) агентів, кожен з яких дотримується власних правил, живе в загальному середовищі та взаємодіє із середовищем та іншими агентами [36]. Тому мультиагентне моделювання називають ще моделюванням від низу до верху. Мультиагентні моделі мають більш широкий спектр застосування і використовуються від фізичного рівня абстракції до стратегічного.

1.2 Сучасні підходи в мультиагентному моделюванні

М. Н. Хухнс та М. П. Сінг вказують, що в цілому немає визначення того, що є «агентом», цей термін зазвичай використовується для опису автономних програм, які можуть контролювати свої дії на основі їх представлення про своє операційне середовище [45]. Програмування агентів стає важливим у соціальному моделюванні. Наприклад, в моделі Маєса [46] агенти будуються, щоб не упустити інформацію по мірі її надходження через Інтернет, та інформують користувача при знаходженні відповідних джерел. Агент отримує вказівку щодо тем, які вважаються цікавими, та постійно

відстежує відомі джерела для елементів, встановлених в анкеті. Інші агенти будуються, щоб допомогти з електронним управлінням мережею, бізнес-процесами та напрямком людей для більш ефективного використання програмного забезпечення.

Метою проектування агента є створення програм, які взаємодіють «інтелектуально» з їх навколишнім середовищем. Б. Чаїбдра і Ф. Дігнум стверджують, що програмне забезпечення агента знаходиться під сильним впливом теорії математичного моделювання реальних процесів, особливо розподіленого штучного інтелекту [47]. Останній вирішує задачі, пов'язані з властивостями і проектуванням мереж агентів, що взаємодіють один з одним. Наприклад, як можна спроектувати групу агентів, де кожен має різний досвід і знання, щоб агенти даної групи взаємодіяли для вирішення поставленої задачі. З урахуванням інтересу розподіленого штучного інтелекту в побудові мереж «інтелектуальних» агентів і дослідження їх властивостей в даній галузі існують методи для моделювання соціальних процесів [48].

Концепція мультиагентних систем, як правило, використовується для передачі природи характеру людської діяльності. При застосуванні до агентів, як до об'єктів комп'ютерної моделі, об'єм мультиагентної системи значно менший реальних систем. Рахвал зазначає, що комп'ютерні агенти зазвичай мають такі властивості [49]:

- 1) автономія – агенти працюють без інших осіб, які мають безпосереднє управління над їхніми діями і внутрішнім станом;
- 2) соціальні вміння – агенти взаємодіють з іншими агентами за допомогою якоїсь «мови» (комп'ютерної, а не природної);
- 3) реакційна здібність – агенти здатні сприймати навколишнє середовище (яке може бути фізичним світом, віртуальним світом електронних мереж або світом, що моделюється та включає інших агентів) і взаємодіяти з ним;

4) ініціативність – аналогічно з взаємодією з навколишнім середовищем агенти також в змозі взяти на себе ініціативу для спільної участі в цілеспрямованій поведінці.

Агентам часто приписують властивість інтенціональності, тобто їх поведінка інтерпретується в термінах метафоричної лексики переконань, бажань, мотивів, емоцій – понять, які найчастіше застосовуються для людей, а не для комп'ютерних програм. Наприклад, в моделі, запропонованій Шохамом і Лейтоном-Брауном, агент, побудований для збору відповідних елементів зі стрічки новин статей, «намагався» знайти щось підходяще для користувача, «хотів» отримати найбільш відповідну статтю і «вважав», що статті на схожі теми також були б цікаві [50]. Необхідно розглядати властивість інтенціональності з точки зору моделювання: комп'ютерний агент не володіє інтенціональністю, але побудований так, щоб імітувати деякі аспекти людських намірів.

Агенти повинні ґрунтувати свої дії на знаннях про навколишнє середовище, яке включає і інших агентів [51]. Частина отриманої інформації може бути некоректною із-за неправильного сприйняття, помилкових висновків з отриманих даних або неповного знання. Така інформація називається інформацією помилкового сприйняття [52].

З огляду на велику кількість переконань агенти можуть отримувати додаткову інформацію один від одного. Наприклад, вважаючи, що агент А нещодавно «з'їв» деяку «їжу», агент Б може зробити висновок, що місце, де знаходиться їжа, неподалік від місцезнаходження агента А. Однак такі висновки можуть містити помилки (агент А з'їв всю їжу).

Деякі агенти можуть мати здібність дізнатися про взаємозв'язки між іншими агентами в оточуючому їх світі [53], наприклад, що агент А нещодавно взаємодіяв з агентом В. На підставі таких фрагментів даних агенти можуть зібрати картину соціальних відносин в їхньому середовищі – тобто, уявлення про «соціальну модель». Також агенти можуть отримувати уявлення про модель і в інших аспектах. Вони можуть розробити модель

«географії» навколишнього середовища. Уявлення агентів про модель значно відрізняються від імітаційної моделі, що розробляється аналітиком.

Для того щоб побудувати свої припущення про модель, агенту необхідний спосіб представлення своїх тверджень. Одним із популярних підходів є використання предикатної логіки для зберігання декларативних тверджень, таких як «Існує їжа в комірці 12», і формул, таких як «Якщо агент їсть в комірці X , то в комірці X існує їжа», де X – змінна, яка заповнюється в залежності від того, що агент бачить навколо себе. Інший підхід, який може бути використаний окремо або в поєднанні з предикатною логікою, ґрунтується на семантичних мережах, в яких об'єкти і їх атрибути пов'язані один з одним, часто ієрархічно. Наприклад, агент може знати, що харчування є джерелом енергії, але також знати про декілька конкретних видів продуктів харчування з різними енергетичними рівнями і різними способами вилучення цієї енергії. Ці факти будуть пов'язані у вигляді деревовидної структури з найбільш загальними фактами про їжу в корені і більш конкретними фактами про різні типи їжі в її гілках.

Оскільки агенти будуються для того, щоб бути автономними, цілеспрямованими і брати участь у взаємодіях, то вони повинні мати необхідність задоволення деякою внутрішньою метою, такою, як виживання. Виживання, у свою чергу, може вимагати виконання допоміжних цілей, таких як набуття енергії і уникнення смертельної небезпеки. Задачею проектувальника є те, як дати зрозуміти агенту, які підцілі мають відношення до ситуації, що моделюється [54]. Також можуть бути труднощі в прийнятті рішення, як керувати кількома цілями, у яких може бути різна ступінь важливості і актуальності і які можуть конфліктувати між собою. Тому агент повинен мати якийсь спосіб визначення, чи призведе його поведінка до задоволення своїх цілей. Це можна реалізувати досить легко: наприклад, агент може бути запрограмований таким чином, щоб відступити, якщо він виявиться поруч з більш сильним або агресивним нападником. Такі прості продукційні правила, що приймають форму «Якщо агент знаходиться в стані

Х, то необхідно виконати дію Y», можуть бути дуже ефективними, якщо вони використовуються в комбінаціях, як показано у Стілса [55]. Часто бажано, щоб агенти використовували більш складні правила планування своєї поведінки. Планування включає в себе роботу в зворотному порядку від бажаного результату: визначення, які дії приведуть до досягнення поставленої мети, в якому стані перед дією повинен знаходитись агент, який вплив приведе до такого стану тощо, до тих пір, поки агент не опиниться у своєму звичайному становищі. Дослідники розробили кілька складних планувальників, однак, як стверджує Брукс, вони не є реалістичною моделлю людського планування, тому що значною частиною діяльності людини рухає рутинна реакція на особливості ситуації, а не точно розрахований план [56].

Всі мультиагентні моделі включають в себе деяку форму взаємодії між агентами, або, як мінімум, між окремими агентами і середовищем, в якому вони існують. У деяких моделях взаємодія може передавати тільки фактичний або ненавмисний зміст. На відміну від модельного світу люди розмовляють з наміром спілкування з іншими людьми. Такі взаємодії повинні бути змодельовані з визначенням «мови» для спілкування. Були спроби створення комп'ютерних мов для комунікації між агентами (найбільш відомий приклад KQML [57]), але вони були розроблені для стислості, лаконічності, простоти впровадження і інших аналогічних характеристик, а не для моделювання соціальної взаємодії. По даній тематиці проведені наукові дослідження [58-60], однак моделювання людської мови залишається великою складністю і предметом для суперечок. Дж. Холлан, Є. Хутчінс і Д. Кірш стверджують, що існує відповідність між словами зі словника агента і середовищем, що його оточує [61]. Один із способів уникнення деяких з цих труднощів полягає в припущенні, що повідомлення проходять безпосередньо між агентами. В залежності від об'єкта таке припущення може значно спростити процес моделювання.

Хоча люди і мають емоції, такі як щастя, горе і гнів, питання про те, як вони можуть бути найкраще змодельовані, вивчалось мало, і до сих пір

існують деякі питання про емоції, які варто уточнити [62]. Також одним з невирішених питань залишається взаємозв'язок між емоціями і цілями. Наприклад, якщо досягнення мети вдається, чи є це причиною щастя, або щастя є метою само по собі? Також емоції розглядають як форми сигналів управління, наприклад, якщо агент сумний через те, що не досяг мети, він скоректує її, щоб стати щасливим. Тобто, як стверджує Брош, емоційний стан мотивує зміну мети [63].

Райт каже, що емоції, по суті, епіфеноменальні, наприклад, агент щасливий, якщо інший агент мав успіх у взаємодії з навколишнім середовищем, і засмучений, якщо чийсь плани не спрацювали [64].

Однак Хохшилд вважає, що жодна з цих теорій не підкреслює соціального наслідку емоцій, таких як очікування того, що ті, хто дотримується певних соціальних ролей, будуть залучені в «емоційну працю» шляхом надання утіх, підтримки тощо [65].

При моделюванні мультиагентних систем необхідно виділяти ті цілі, які важливі для об'єкта, що моделюється, і нехтувати тими, що не мають ключового значення.

Традиційний підхід теорії математичного моделювання до побудови агентів з когнітивними здібностями відомий як символна парадигма. Вона ґрунтується на гіпотезі про фізично-символьну систему, що сформульована Невеллом і Саймоном [66] і маніпулює символами відповідно до символічно закодованих наборів інструкцій і здатна згенерувати інтелектуальну дію. Наприклад, агент може отримати символ «Привіт» в повідомленні від іншого агента і відреагувати відповідним чином. У такому випадку агент повинен розпізнати вхідний сигнал і мати можливість згенерувати відповідь, можливо, за допомогою співставлення зі зразком або правилом, яке свідчить, що відповідь «Чи можу я вам допомогти?» повинна бути відправлена щоразу, коли буде отримано сигнал «Привіт».

Проте символна парадигма породила велику кількість складних задач, що здаються невирішуваними, хоча їх можна уникнути або звести до

мінімуму в деяких конкретних застосуваннях. Ці проблеми можуть бути узагальнені як вразливість (система може добре працювати в конкретному контексті, однак не здатна успішно справлятися навіть з найменшими змінами параметрів); складність (деякі задачі, наприклад задачі планування, вимагають розробки алгоритмів високої складності); труднощі в рішенні деяких задач, які для людей проблеми не представляють (наприклад, застосування «здорового глузду» або будь-яких загальноприйнятих етичних норм). Методами, які долають ці труднощі для мультиагентного моделювання, є виробничі системи, об'єктно-орієнтований підхід, мова синтаксичного аналізу, методи машинного навчання тощо, описані Гільбертом і Троїццем в роботі [52].

Більшість агентів у мультиагентних моделях використовують деякі системи правил, найпростішою з яких є продукційна система. Продукційна система має три компоненти: набір правил, робочу пам'ять та інтерпретатор правил. Кожне правило складається з двох частин: частина умови, яка визначає, коли правилу варто запуснитися, та частина дії, яка визначає, при якому стані агента який вплив він повинен виконувати, якщо правило дотримується. Наприклад, агент-робот може мати наступне правило: «Якщо (А) ваша рука піднята, та (Б) варто підняти об'єкт, та (В) предмет лежить на столі, тоді опустити руку». Перевірка чи задоволена умовна частина агента полягає в тому, щоб у робочій пам'яті агента проаналізувати стан положення руки, поточну мету агента та стан навколишнього середовища [67]. Роботою частини дії агента є перевірка виконання умови правила та при необхідності виконання відповідної дії.

Основною перевагою продукційних систем є те, що проектувальник не повинен заздалегідь знати послідовності виконання правил. На відміну від більш поширеного порядку виконання правил, який складається зі звичайних програм або блок-схем, агент може сам адекватно реагувати та розуміти, які правила варто виконувати в залежності від його робочої пам'яті, його минулого досвіду та стану навколишнього середовища. Також

проектувальник системи повинен вирішити, що повинен робити інтерпретатор, якщо умовні частини декількох правил задоволені одночасно. Він може прийняти такі рішення: виконувати перше правило, умовна частина якого була задоволена; виконувати всі правила, які можуть бути виконані; або використовувати якусь іншу процедуру для розв'язання конфлікту. Останнє особливо важливо за умови, коли бази правил включають в себе правила, що відносяться до конкретних ситуацій, а також правила, які застосовуються в багатьох ситуаціях, у тому числі в тих, які охоплені більш конкретними правилами.

Природним способом програмування агентів є об'єктно-орієнтовані мови програмування. В їх контексті об'єктами є програмні структури, в яких можуть міститися як дані, так і процедури для роботи з ними. В об'єктно-орієнтованому програмуванні дані зберігаються в слотах об'єктів, а процедури називаються методами. Як стверджує Д. Кларк, в об'єктно-орієнтованих мовах програмування об'єкти створюються з шаблонів, які називаються класами, що визначають композицію об'єкта, дані, які він зберігає, і методи, які використовує [68]. Всі об'єкти, що належать одному і тому ж класу, мають аналогічні слоти і методи, а значення даних різних об'єктів можуть відрізнятися. Класи мають ієрархічну структуру з класами-нащадками, що успадковують властивості і методи батьківських класів, а також додатково додають до них свої. Розглянемо, наприклад, імітацію пішохідного потоку через торговий центр, описану Хелбінгом в роботі [69]. В системі може бути клас, що представляє структуру і процедури пішохода, що моделюється. Клас буде визначати слоти для зберігання даних, наприклад, розташування агента-пішохода і його поточний напрямок, і методи, що визначають, як варто рухатися. Цей основний клас агента може мати два класи-нащадки, один для одиночних пішоходів і другий для пішоходів, що є частиною групи. Обидва успадкують від батьківського класу слоти, які описують місцезнаходження і напрямок руху, але другий клас-нащадок буде зберігати ще і слот зі списком пасажирів, які прямують з ним в

групі. Клас для членів групи буде також мати загальний метод для руху в групі, наприклад, зменшити швидкість руху, якщо агент сильно відірвався від групи.

Перевагою об'єктно-орієнтованого підходу є те, що слоти можуть являти собою внутрішні стани агента (в тому числі його робочу пам'ять і правила, якщо він був розроблений як система виробництва), в той час як методи можуть реалізовувати інтерпретатор правил. Вказавши правила на рівні класу, всі агенти, що належать до цього класу, мають одні й ті ж правила, в той час як вміст їх пам'яті може відрізнятися один від одного. Крім того, об'єктно-орієнтований підхід призводить до корисних інкапсуляцій, з кожним агентом, чітко помітним в рамках програми. Відповідність між об'єктно-орієнтованим підходом і мультиагентним моделюванням так близька, що практично всі мультиагентні моделі написані з використанням об'єктно-орієнтованих мов програмування. Прикладами таких мов є C++ [70], Objective C [71], Lisp [72], Smalltalk [73], Java [74], C# [75].

У будь-якій мультиагентній моделі агент знаходиться в навколишньому середовищі. Що буде представляти із себе середовище, залежить від того, яка система моделюється. І якщо агенти є людьми, а не організаціями, то однією з головних функцій навколишнього середовища буде забезпечення просторового контексту. Кожен з агентів буде розташований в просторі, що моделюється, таким самим чином, як клітинні автомати розташовані на сітці. У багатьох моделях агенти можуть переміщатися в середовищі, і хоча просторовий світ найбільш поширений в моделюванні, існують також і інші варіанти представлення середовища. Наприклад, агенти можуть переміщатися через мережу вузлів або зв'язків.

Оскільки агенти розташовані в середовищі, вони мають потребу в датчиках, що сприймають їх місцезнаходження, а також деяких методах впливу на навколишнє середовище. Як правило, зв'язок між агентами проходить через навколишнє середовище, яке направляє повідомлення відповідному одержувачу. В цьому випадку агенти також повинні мати

здібність отримувати повідомлення, що приходять з навколишнього середовища, а також відправляти їх в середу для подальшої передачі.

Також розробник моделі повинен вирішити, в якому порядку агентам має розподілятися обчислювальний час, в ідеалі всі агенти повинні працювати паралельно. Так як більшість моделей розроблені в послідовних, а не паралельних системах, бажана паралельна робота повинна бути змодельована окремо, як правило, шляхом циклічного програмного коду для кожного агента або шляхом вибору наступного агента випадковим чином. Порядок, в якому відбувається звернення до агентів, може зробити істотний вплив на хід моделювання, якщо не буде вжито відповідних заходів обережності. Наприклад, в моделі, описаній Фішером [76], якщо агент А посилає повідомлення агенту Б, але агент Б запущений раніше агента А, то агент Б не отримає повідомлення від А до наступного кола циклу, за який повідомлення може перестати бути актуальним. У більшості випадків необхідним рішенням є буферизація повідомлень в межах навколишнього середовища. Протягом кожного часового кроку повідомлення від агентів збираються і зберігаються в навколишньому середовищі. На початку наступного часового кроку всі збережені повідомлення доставляються адресатам.

1.3 Прогнозування епідемічних процесів у системах популяційної динаміки

У західній літературі введено поняття епідемічного моделювання (epidemic modeling) [77] для моделювання процесів і систем, поведінка яких схожа з динамікою розповсюдження захворюваності і виникнення епідемій. Такі моделі побудовані для аналізу поведінки популяції в соціальних мережах [78], побудови ботнетів [79], аналізу розповсюдження шкідливого програмного забезпечення в мережах різного типу [80], дослідження логістичних систем [81] та інших динамічних систем і процесів.

В охороні здоров'я та епідеміології такі моделі застосовуються для кількісної оцінки гідності різних методів боротьби і профілактики, таких як ізоляційно-обмежувальні заходи, проведення вакцинації і вибір контингентів для імунізації, виявлення груп ризику захворюваності та ін. [82], що необхідно для того, щоб органи охорони здоров'я могли прийняти найбільш раціональні і дієві заходи в боротьбі з інфекціями. Тільки правильно сформульовані математичні моделі дозволяють підійти до строгого вивчення всіх аспектів цієї проблеми, незалежно від того, чи йде мова про епідеміологічну діагностику, оцінку ефективності існуючих профілактичних та протиепідемічних заходів або про заходи, що плануються органами охорони здоров'я та санітарно-епідеміологічної служби.

Крім кількісних оцінок результатів тих чи інших видів динамічних систем, варто зазначити й інше важливе застосування математичних моделей – прогнозування [83]. Несподіване виникнення епідемічної поведінки в різних системах призводить до формування складної обстановки, що швидко змінюється. В умовах надзвичайної ситуації поспішні або хаотичні дії фахівців різних служб можуть негативно вплинути на організацію та реалізацію заходів боротьби з проблемою [84].

Слід наголосити на важливості застосування математичних методів у галузі охорони здоров'я, про що свідчать дані наукової літератури. Наприклад, одним з головних висновків спільних зборів фахівців Національної інженерної академії США (National Academy of Engineering) та Інституту медицини США (Institute of Medicine) була необхідність будувати сучасні підходи до боротьби з захворюваністю на основі співпраці між інженерами та епідеміологами [85]. В країнах СНД в рамках системної модернізації охорони здоров'я пропонується впровадження методів системного, кореляційного та регресійного аналізу, нейронних мереж та інших математичних методів в практику охорони здоров'я [86]. В Україні наказом Міністерства охорони здоров'я від 1998 р. передбачається

інформатизація сфери охорони здоров'я шляхом впровадження в неї комп'ютерних технологій [87].

Для того щоб вибрати найкращий та актуальний спосіб моделювання розповсюдження захворюваності, розглянемо найбільш популярні та практично значущі з уже існуючих моделей.

Задача моделювання поведінки соціальних процесів відома давно, об'єктом моделювання служили епідемії. Початок застосування математичних методів при вивченні динамічних процесів був покладений в XVII ст. кількісною роботою Граунта і Петті, що склали «біллі про смертність в Лондоні» [88]. У своїй роботі, що ґрунтується на статистиці смертності в Лондоні, зібраній за двадцять років, вони оцінювали ймовірність загинути від того чи іншого виду захворювання [89].

Данііл Бернуллі представив роботу з аналізу смертності від віспи. В ній за допомогою найпростішого математичного апарату, заснованого на диференціальних рівняннях, він оцінював ефективність профілактичних заходів [84]. Роботу Бернуллі можна вважати першою моделлю розповсюдження захворюваності.

Наступним етапом розвитку моделювання соціальних процесів стали роботи Уільяма Фарра [90]. Він вивчав і моделював статистичні показники смертності населення Англії (Уельсу) від епідемії натуральної віспи в 1837-1839 рр. і отримав математичні моделі показників «руху» епідемії натуральної віспи у вигляді статистичних закономірностей. Отримані моделі дозволили йому скласти прогностичну модель цієї епідемії. На початку XX ст. статистичний підхід Фарра у вивченні епідемій був переосмислений і потім розвинений в роботах Джона Браунлі [84].

Принцип, який і досі лежить в основі епідемічного моделювання, заснований на диференціальних рівняннях, був сформульований Хемером в 1906 році. Нехай $x(t)$ – число індивідів з популяції, що моделюється, здорових і схильних до захворювання, а $y(t)$ – число вже хворих (інфікованих) індивідів. Тоді зміну числа інфікованих індивідів з часом

можна описати таким чином [89]: $\frac{dy}{dt} = \beta xy$, де β – параметр, що визначає інтенсивність передачі інфекції.

Подальший розвиток моделі епідемічної поведінки динамічних процесів отримали з розвитком ЕОМ в 60-х – 70-х рр. ХХ століття. Більша частина існуючих епідемічних моделей – безперервні, засновані на застосуванні апарату диференціальних рівнянь. В цих моделях динаміка процесу описується системою диференціальних рівнянь. В якості змінних станів виступають кількості об'єктів різного типу на території, що моделюється. Рішенням системи рівнянь є рівень процесу, що розглядається в кожен момент модельного часу. Подібні підходи в моделюванні активно використовуються і сьогодні [91, 92].

Найбільш відомими серед цих моделей є моделі SIR і SEIR. Модель SIR була запропонована Кермаком і Мак-Кендриком в 1927 р. [93]. У цій моделі вся популяція на території, що моделюється, ділиться на групи: «Susceptible» – люди, сприйнятливі до певного впливу (S); «Infectious» – люди, під впливом певного процесу (I); «Recovered» – люди, які зазнали певного впливу, більш до нього не сприйнятливі (R). Враховуючи, що загальне число індивідів у популяції залишається незмінним, приріст числа людей в кожній з виділених груп можна описати за допомогою наступної системи рівнянь:

$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI, \frac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I, \frac{dR}{dt} = \gamma I, \quad (1.1)$$

де β – інтенсивність контактів між індивідами, γ – інтенсивність переходу індивідів у стан R .

Існують модифікації моделі SIR, виконані для врахування особливостей того чи іншого процесу, що моделюється. У більшості випадків вони використовуються для моделювання динаміки епідемічного процесу захворюваності. Наприклад, для моделювання розповсюдження грипу підходить модель SEIR [94]. У ній до перелічених вище груп індивідів, що моделюються в моделі SIR, додається ще одна: «Exposed» – люди,

захворювання у яких знаходиться в інкубаційному періоді (E). Тоді система рівнянь, що описує приріст числа хворих індивідів, буде

$$\frac{dS}{dt} = B - \beta SI - \mu S, \frac{dE}{dt} = \beta SI - (\varepsilon + \mu)E, \frac{dI}{dt} = \varepsilon E - (\gamma + \mu)I, \frac{dR}{dt} = \gamma I - \mu R, \quad (1.2)$$

де B – середній рівень народжуваності індивідів на території, що моделюється, μ – середній рівень смертності індивідів на території, що моделюється, $1/\varepsilon$ – середня тривалість інкубаційного періоду захворювання.

Завдяки своїй простоті моделі SIR і SEIR можуть реалізовуватися як в будь-якій системі комп'ютерної математики, так і на цільовій мові програмування [95]. Модель не вимагає великих обчислювальних витрат, і експерименти з нею можуть бути проведені на будь-якому персональному комп'ютері. Кауфманом, Едлундом і Дугласом створено навіть середовище моделювання STEM [96], в якому моделі SIR і SEIR вже реалізовані в різних варіантах і можуть бути використані після мінімальної настройки.

Академіком О. В. Барояном і професором Л. А. Рвачевим була запропонована модель, яка сьогодні широко відома [84, 97] і є однією з кращих детермінованих моделей епідемічної поведінки динамічних систем, заснованих на диференціальних рівняннях. Бароян і Рвачев застосовували модель для розповсюдження захворюваності на грип. Модель Барояна – Рвачева можна умовно віднести до моделей типу SEIR, проте вона має ряд істотних відмінностей.

У ній виділені ті самі чотири групи індивідів, що і в моделі SEIR, але для опису прирощення числа людей в кожній з груп використовується наступна система нелінійних інтегродиференціальних рівнянь в частинних похідних [97]:

$$\begin{aligned} \frac{dS(t)}{dt} &= -\frac{\lambda}{p(t)} S(t) \int I(t, \tau) d\tau, \frac{\partial E(t, \tau)}{\partial t} + \frac{\partial E(t, \tau)}{\partial \tau} = -\gamma(\tau) E(t, \tau), \\ \frac{\partial I(t, \tau)}{\partial t} + \frac{\partial I(t, \tau)}{\partial \tau} &= \gamma(\tau) E(t, \tau) - \delta(\tau) I(t, \tau), \frac{dR(t)}{dt} = \int \delta(\tau) I(t, \tau) d\tau, \end{aligned} \quad (1.3)$$

де t – календарний час розвитку епідемії, λ – середня частота передачі збудника від інфікованих хворих до чутливих індивідів, p – чисельність

популяції; τ – локальний час, що минув з моменту зараження індивіда; $\gamma(\tau)$ – функція розвитку періоду інкубації; $\delta(\tau)$ – функція розвитку інфекційного періоду.

Незважаючи на те, що модель створювалася для моделювання розповсюдження грипу, методологія її побудови може бути використана для моделювання розповсюдження більшості динамічних систем, що мають епідемічний характер [98]. Всі моделі типу SEIR мають недолік: для використання математичного апарату диференціальних рівнянь в моделях передбачається, що всі індивіди однотипні і безперервно і рівномірно перемішуються на території, що моделюється. Ця умова прийнятна в якості першого наближення, проте є надмірним спрощенням [99]. Більшість реальних популяцій мають вкрай складну структуру, обумовлену соціальним розшаруванням, різноманітністю географічних умов і складними часовими і просторовими схемами переміщення. Моделі типу SEIR є повністю детермінованими і підходять тільки для оцінки поведінки дуже великих популяцій. Під час створення моделі Барояна – Рвачева реалізація стохастичних моделей стикалася з непереборними обчислювальними труднощами [88], що в даний час можуть бути успішно вирішені.

Перші спроби врахувати географічні чинники розповсюдження захворювання ґрунтувалися на тих само принципах, що і модель SIR. Наприклад, в детермінованій моделі, розробленій Д. Кендаллом [84], передбачається існування нескінченного двовимірного континууму популяції, в якій на одиницю площі припадає σ індивідів. Розглянемо область dS , оточуючу точку P , і припустимо, що кількість сприйнятливих, заражених і індивідів, що видужали, дорівнюють відповідно $\alpha x dS$, $\sigma y dS$ і $\sigma z dS$. Величини x , y і z можуть бути функціями часу і положення, однак їх сума повинна дорівнювати одиниці. Тоді система рівнянь, що описує процес розповсюдження захворювання, матиме вигляд

$$\frac{\partial x}{\partial t} = -\beta \alpha x \tilde{y}, \quad \frac{\partial y}{\partial t} = \beta \alpha x \tilde{y} - \gamma y, \quad \frac{\partial z}{\partial t} = \gamma y, \quad \tilde{y}(P, t) = \iint \lambda(PQ) y(Q, t) dS, \quad (1.4)$$

де β і γ – постійні коефіцієнти; \tilde{y} – просторово зважене середнє значення; dS – елемент площі, що оточує точку Q ; $\lambda(PQ)$ – невід'ємний ваговий коефіцієнт.

У рамках методології SIR деяким чином вводиться множина комірок, усередині кожної з яких використовуються типові непросторові моделі (наприклад, SIR або SEIR), і за певним правилом допускається міграція індивідів між комірками [100]. Розбиття основних груп індивідів в моделі SEIR на підгрупи, відповідні індивідам різного віку, є досить поширеним прийомом. Наприклад, в моделі Ейхнера, Швема, Дуерра і Брокмана InFluSim [101] розв'язується система з 1081 диференціального рівняння.

Інший напрямок удосконалення моделей типу SIR, крім реалізації просторових особливостей популяції, що моделюється, – це облік ймовірнісної природи епідемічних процесів. Наприклад, в роботі [97] розглядається модель Барояна – Рвачева, в якій величини S, E, I і R представлені у вигляді суми середнього по статистичному ансамблю значення і пульсації. Шляхом певних аналітичних перетворень отримана система рівнянь, що дозволяє визначити ймовірність того, що число хворих індивідів в кожен момент модельного часу перевищує задане граничне значення. Така модель, на відміну від детермінованих моделей типу SEIR, дозволяє визначити ризик певного сценарію розвитку епідемії і більш об'єктивно оцінити обмежені ресурси, необхідні для проведення протиепідемічних заходів.

Безперервні стохастичні моделі динамічних систем, що мають епідемічний характер, не обов'язково будуються на основі систем диференціальних рівнянь типу SIR. Існує ряд моделей [88], в яких кількість сприйнятливих до захворювання індивідів і кількість джерел інфекції представляються як випадкові процеси ($X(t)$ і $Y(t)$ відповідно). Тоді, наприклад, якщо частота контактів між індивідами дорівнює β , ймовірність появи в інтервалі Δt нового джерела інфекції буде дорівнювати $\beta XY \Delta t$. Якщо

частота видалення з колективу заражених індивідуумів дорівнює γ , то ймовірність того, що в інтервалі Δt буде видалений один індивід, складе $\gamma \Delta t$. Тоді, якщо змінити часовий масштаб, перейшовши до $\tau = \beta t$, і позначити через $\gamma / \beta = \rho$ відносну частоту видалення, то можна отримати наступне рівняння для функції ймовірностей:

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = (y^2 - xy) \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} + \rho(1 - y) \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (1.5)$$

Рішення подібних рівнянь викликає труднощі, тому стохастичні моделі такого типу не використовуються для розв'язання практичних задач моделювання розповсюдження захворювань [102]. У разі моделювання захворюваності для малих груп населення використовуються більш точні стохастичні моделі.

Припустимо, що u_i – кількість сприйнятливих індивідів в групі безпосередньо перед моментом t і що v_i – кількість індивідів, що заразилися в цей момент. Зручно визначити ймовірність достатнього контакту $p=1-q$, тобто ймовірність того, що будь-які два члена групи в будь-який момент часу будуть знаходитися в контакті, достатньому для появи нового джерела інфекції, якщо один з індивідів сприйнятливий до інфекції, а інший є джерелом інфекції. Тоді ймовірність того, що будь-який сприйнятливий індивід уникне зараження в момент t , дорівнює q^{v_t} , а ймовірність того, що він заразиться, – $(1 - q^{v_t})$. Таким чином, умовна ймовірність появи v_{t+1} , нових випадків в момент $(t + 1)$ має біноміальний розподіл

$$P\{v_{t+1} | u_t, v_t\} = \binom{u_t}{v_{t+1}} (1 - q^{v_t})^{v_{t+1}} q^{v_t u_{t+1}}, \text{ де } u_t = u_{t+1} + v_{t+1}. \quad (1.6)$$

Цей процес визначається послідовністю біноміальних розподілів, звідки й походить його назва – ланцюгово-біноміальний процес. Таку модель первісно використовували Рід і Фрост, Грінвуд [88]. Недоліком моделі є те, що в ній не враховуються особливості передачі інфекції, пов'язані з соціальним розшаруванням і особливостями поведінки.

Ці особливості, а також інші обмеження традиційних моделей типу SIR можуть бути успішно враховані в сучасних дискретно-подієвих моделях. Найбільш перспективні дослідження щодо розповсюдження захворювань сьогодні проводяться за допомогою дискретно-подієвих моделей [103].

Найпростіша дискретно-подієва модель розповсюдження епідемічних процесів – клітинний автомат. Клітинний автомат – це набір клітин, що утворюють деяку періодичну решітку із заданими правилами переходу, що визначають стан клітини в наступний момент часу через стан клітин, які знаходяться від неї на відстані, що не більше деякого, в поточний момент часу [104].

Перші спроби використання клітинних автоматів для моделювання розповсюдження захворювань були зроблені Бейлі [88]. Він розглядав квадратну решітку, кожен вузол якої зайнятий одним індивідом. В один із вузлів він поміщав джерело інфекції і розглядав такий процес, в якому небезпеці зараження піддаються тільки індивіди, що безпосередньо примикають до якого-небудь джерела інфекції. На кожному часовому кроці такої моделі захворювання з певною ймовірністю може бути передано від хворого індивіда до одного з сприйнятливих сусідів. Як правило, використовується решітка обмеженого розміру. Стани індивідів у такій моделі зазвичай відповідають моделям типу SEIR: сприйнятливі індивіди («Susceptible») при достатньому контакті з хворим («Infectious») переходять в стан інкубаційного періоду захворювання («Exposed»), після закінчення якого також стають хворими. Хворі індивіди з часом одужують («Recovered») і, або залишаються в цьому стані, або переходять в стан «Susceptible».

Найбільший внесок в розвиток моделювання динамічних систем з епідемічною поведінкою в останні роки зробили популяційні моделі [105]. Популяційні моделі – це дискретно-подієві моделі, в яких усі індивіди, що моделюються, явно розділені на соціальні групи, які формуються з урахуванням віку індивідів, у детальних моделях може враховуватися рід занять індивіда. Розповсюдження інфекції між індивідами може статися

тільки в рамках однієї «контактної» групи. Кожен день в моделі індивіди в залежності від своєї соціальної групи формують певні контактні групи, в яких від хворого індивіда захворювання може передаватися здоровому. Контактні групи визначаються характерною структурою суспільства, яка буде залежати від території, що моделюється.

Розглянемо структуру контактних груп однієї з перших популяційних моделей Лонгіні, Халоррана, Нізама і Янга [106]. В ній популяція з 10 000 осіб була розбита на п'ять спільнот по 2000 осіб. Кожна така спільнота включала в себе по чотири райони, одну середню школу і дві початкові. В кожному районі перебувало кілька сімей («С»), дитячих садків («ДС») та ін. Кожна з таких місцезнаходжень (локацій) й утворювала контактну групу. В залежності від свого віку індивід брав участь у деяких з них (наприклад, школяр відвідував локацію «сім'я» та «школа» тощо). Тип локації також визначав ймовірність передачі інфекції від хворого індивіда до сприйнятливого.

Стадії перебігу захворювання в популяційних моделях зазвичай відповідають виділенім в моделі SEIR. Час в популяційних моделях рухається з фіксованим кроком дискретизації, в якості якого зазвичай вибирають 24 години [106] або 12 годин [107]. На кожному кроці аналізується, які локації відвідував кожен індивід та аналітично розраховується ймовірність його зараження за минулий проміжок часу. Для розрахунку ймовірності використовуються складні формули, що враховують багато чинників, такі як, наприклад, тип локації, що відвідується, число хворих індивідів, одночасно присутніх в одній локації, вакцинацію індивіда тощо.

Існують популяційні моделі [106, 107], що відрізняються одна від одної в основному структурою популяції, що моделюється (контактні групи) та формулою для розрахунку ймовірності передачі інфекції сприйнятливому індивіду. На основі найбільш вдалих з них були створені системи підтримки прийняття рішень [108] та середовища моделювання [107]. Найбільше з них

середовище FluTE [107] дозволяє побудувати сценарії розповсюдження захворювання по території США на основі призначених для користувача налаштувань з урахуванням авіаперельотів та міграцій індивідів.

Популяційні моделі і середовища моделювання дозволяють найкращим з доступних на сьогоднішній день чином промоделювати розповсюдження інфекції у великих популяціях з урахуванням їх географічних і соціальних особливостей. Так, популяційні моделі зберігають ймовірнісний характер розповсюдження захворювання, враховують структуру спільноти, що моделюється, та, завдяки аналітичному розрахунку ймовірності достатнього контакту, вимагають обмеженої кількості обчислювальних ресурсів. Однак саме формула для розрахунку ймовірності достатнього контакту – основне джерело похибок в роботі популяційної моделі [109]. Досить великий крок дискретизації в 12 годин та необхідність калібрування коефіцієнтів, які використовуються в цій формулі, можуть привести до того, що результати роботи популяційної моделі прийнятної точності для дуже великих популяцій будуть вже непридатними для моделювання популяцій середньої та малої чисельності. Під калібруванням тут мається на увазі процес тонкого настроювання наборів початкових даних таким чином, щоб забезпечити максимальне наближення результатів розрахунку до даних натурних вимірювань. Подолати ці складності дозволяє розширення популяційних моделей – мультиагентні моделі розповсюдження захворювань.

Мультиагентні моделі розповсюдження епідемічного процесу схожі на популяційні. В якості агентів у таких моделях розглядаються індивіди, що формують популяцію, кожен агент має індивідуальні властивості, наприклад, вікову групу. В моделі певним чином описується перебіг захворювання у кожного агента, наприклад, на основі станів, запропонованих в моделі SEIR. Так само, як і в популяційних моделях, на основі соціальної структури популяції, що моделюється, формуються контактні групи, між якими переміщуються агенти та в яких один агент може передати захворювання

іншому. Більшість мультиагентних моделей, так само як і популяційні – дискретно-подієві.

Основна відмінність мультиагентних від популяційних моделей розповсюдження захворювань полягає в тому, що вони децентралізовані. В популяційних моделях визначений фіксований проміжок часу, через який в моделі виникає подія обробки всіх переміщень індивідів, що відбулися з попередньої такої події, можливих передач інфекції тощо. При цьому вся ця обробка ведеться централізовано і за певними аналітичними формулами, що визначають ймовірність тих чи інших змін в моделі. В мультиагентних моделях така обробка відсутня. Кожен агент як активний об'єкт самостійно породжує всі події, пов'язані з його переміщеннями між різними локаціями, розповсюдженням захворювання, розвитком захворювання та інше [110]. Кожна така подія включає в себе набір нескладних дій, однак навіть при невеликих популяціях агенти породжують тисячі подій, обробка яких вимагає чималих обчислювальних ресурсів.

Сьогодні мультиагентні моделі розповсюдження захворюваності є найбільш перспективними. Вони не мають явних обмежень, по всьому світу ведеться активна розробка подібних моделей. Наприклад, в США за підтримки Національного інституту загальноомедичних наук США (National Institute of General Medical Sciences) організовано великий проект MIDAS [111], спрямований на розробку і вивчення мультиагентних моделей розповсюдження захворювань.

Жоден інший підхід до моделювання розповсюдження захворювань не дає таких широких можливостей, як мультиагентний. Такі моделі добре підходять для створення систем підтримки прийняття рішень, мультиагентна модель, побудована для одного захворювання, може бути ефективно доповнена і для моделювання інших інфекційних захворювань. Тому в даній роботі для створення початкової версії універсальної імітаційної моделі розповсюдження епідемічного процесу обрано мультиагентний підхід.

Незважаючи на те, що мультиагентні моделі розповсюдження захворювань тільки починають розроблятися, на цю тему вже опублікований ряд робіт. Розглянемо вже реалізовані моделі.

Одні з перших мультиагентних моделей епідемічного процесу були реалізовані в Японії. Однак їх проектування ускладнювало їх практичне застосування. Модель [112], реалізовану Дегучі та іншими, можна розглядати як демонстрацію мультиагентного підходу, так як, не дивлячись на те, що в ній досить докладно відображені процеси розвитку інфекції в організмі людини, була використана сильно спрощена структура навколишнього середовища, яка включала лише кілька видів локацій. Крім того, для створення моделі застосовувалося нове середовище мультиагентного моделювання SOARS [113]. Ця система моделювання включає в себе тільки базові засоби проектування мультиагентних моделей, тому в розробленій системі існують деякі обмеження. Наприклад, вона підтримує тільки дискретно-подієві мультиагентні моделі з фіксованим кроком дискретизації.

Також в Японії Окхусо і Суговара була побудована мультиагентна модель розповсюдження захворювання з повітряно-крапельним шляхом передачі [114], що включає деталізацію переміщення агентів за допомогою громадського транспорту. Були використані реальні розклади поїздів, автобусів, враховані способи передачі інфекції в таких місцях від агента до агента. Однак реалізація настільки детальної моделі через брак обчислювальних ресурсів дозволила проектувальникам промоделювати розповсюдження хвороби лише в дуже малій популяції. В роботі [114] була отримана тільки одна реалізація випадкового процесу, що визначається моделлю, на підставі якої неможливо зробити адекватні висновки. Великим недоліком моделі є те, що вона розроблена для конкретного регіону Японії, і перенести її на іншу територію вкрай складно.

Дас, Савачкін і Жу розробили мультиагентну модель [115], яка не поступається за своїми можливостями детальним популяційним моделям розповсюдження захворювань. В моделі детально відображено структуру

суспільства, соціальні характеристики агентів, особливості розповсюдження інфекції, що моделюється, заходи боротьби з розвитком епідемії тощо. Дана модель хоч і є однією з найбільш розвинених мультиагентних моделей розповсюдження захворювань, однак її можна розглядати тільки як проміжний етап між популяційними і мультиагентними моделями.

Таким чином, поки ще не існує моделі розповсюдження епідемічного процесу, в якій були б повністю реалізовані всі можливості мультиагентного підходу до імітаційного моделювання.

1.4 Постановка задачі дослідження

Незважаючи на велику кількість досліджень поведінки епідемічного процесу, не досягнута висока точність прогнозу з урахуванням факторів, що впливають на популяційну динаміку.

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'язаною з поведінкою агентів, схожою з реальними системами і їх прийняттям рішень.

Вирішення поставленої науково-прикладної задачі 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 вирішення практичних завдань, пов'язаних з розвитком епідемічного процесу популяційної динаміки.

Висновки до першого розділу

1. Проаналізовано стан проблеми інтелектуального імітаційного моделювання популяційної динаміки.
2. Розглянуто основні принципи інтелектуального імітаційного моделювання і його класифікація.
3. Розглянуто методи інтелектуального імітаційного моделювання систем популяційної динаміки. Виявлено та проаналізовано їх недоліки.
4. Проведено аналіз існуючих підходів в інтелектуальному мультиагентному моделюванні.
5. Розглянуто моделі і методи інтелектуального мультиагентного моделювання систем популяційної динаміки, які використовуються для розв'язання задачі прогнозування епідемічного процесу.
6. Виявлено недоліки існуючих інтелектуальних мультиагентних моделей епідемічного процесу систем популяційної динаміки.
7. Сформульовано задачу дослідження.

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

РОЗДІЛ 2.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА МУЛЬТИАГЕНТНА СИСТЕМА ПОПУЛЯЦІЙНОЇ ДИНАМІКИ

2.1 Епідемічні процеси як об'єкти популяційної динаміки

Моделювання епідемічного процесу є інструментом, який використовується для вивчення механізмів розповсюдження хвороб, прогнозування майбутнього розвитку спалаху і оцінки стратегій боротьби з епідемією.

Виділяють наступні типи моделей епідемічного процесу:

- *стохастична модель* є інструментом для оцінки ймовірнісних розподілів потенційних результатів, допускаючи випадкову зміну в одному або декількох вхідних даних з плином часу. Стохастичні моделі залежать від випадкових варіацій ризику впливу, хвороби та інших захворювань. Вони використовуються, коли ці коливання важливі, як в невеликих групах населення;

- при роботі з великими популяціями часто використовуються *детерміновані математичні моделі*. У детермінованій моделі індивіди в популяції призначаються різним підгрупам, кожна з яких представляє собою конкретний етап епідемії.

Коефіцієнти переходу з одного класу в інший математично задаються похідними, а модель описується відповідними диференціальними рівняннями. При створенні таких моделей передбачається, що функція зміни чисельності населення диференційована за часом, а епідемічний процес є детермінованим. Іншими словами, зміна чисельності населення розраховується, використовуючи тільки передісторію, використану при оцінці параметрів моделі.

Найпростіше визначення епідемічної динаміки розглядає загальну чисельність населення в системі як фіксовану, що складається з N індивідів і

ігнорує будь-який інший демографічний процес (міграції, народження і т.д.). Однією з найпростіших спроможних компартиментацій є модель SIS з двома можливими переходами: перша, позначена $S \rightarrow I$, зустрічається, коли сприйнятливий індивід взаємодіє з інфекційним індивідом і заражується. Другий перехід, позначений $I \rightarrow S$, відбувається, коли інфекційний індивід відновлюється після хвороби і повертається в пул сприйнятливих індивідуумів. Модель SIS передбачає, що хвороба не надає імунітету, і люди можуть бути інфіковані знову і знову, піддаючись циклу $S \rightarrow I \rightarrow S$, який за певних умов може підтримуватися назавжди. Ще однією базовою моделлю є класична SIR-модель з трьома станами. У моделі SIR перехід $I \rightarrow S$ процесу SIS замінюється на $I \rightarrow R$, що відбувається, коли інфекційний індивід відновлюється після хвороби і вважається, що він придбав постійний імунітет або був видалений (наприклад, помер).

Класичні епідемічні моделі не враховують багатьох чинників, що знижує точність моделювання та достовірність динаміки епідемічного процесу, що розглядається.

Серед таких факторів можна виділити наступні:

- *вертикальну передачу*. У випадку деяких захворювань, таких як ВІЛ-інфекція та гепатит В, можливо, що потомство інфікованих батьків народиться інфікованим. Ця передача хвороби від наступника називається вертикальною трансмісією. Приплив додаткових членів в категорію інфікованих можна розглядати в рамках моделі, включивши частку новонароджених членів в інфікованому відсіку [116];

- *векторну передачу*. Хвороби, що передаються від людини до людини побічно, тобто поширення малярії за допомогою комарів або хвороби Лайма через іксодових кліщів, передаються через вектор. У цих випадках інфекція переноситься від людини до комахи, а модель епідемії повинна включати обидва види, як правило, тих, що потребують набагато більше властивостей, ніж модель для прямої передачі [117];

- *неоднорідність популяції*;

- *вікові групи населення;*
- *мінливу інфекційність.* В результаті сезонності або інших факторів, що впливають;
- *неоднорідність навколишнього світу;*
- *імунітет, набутий за допомогою вакцинації.*

Для виключення даного недоліку і обліку викладених факторів пропонується застосування інтелектуального мультиагентного підходу до моделювання епідемічного процесу систем популяційної динаміки. Для цього необхідно виділити клас моделей епідемічного процесу серед моделей популяційної динаміки.

Епідемічному процесу властиві наступні характеристики:

циклічність (періодичність) епідемічного процесу – це регулярно повторювані підвищення або зниження захворюваності населення в багаторічній динаміці. Більшість проявів циклічності пояснюється інфекційно-імунологічними відносинами популяцій. Збільшення сприйнятливої прошарку за рахунок народжуваності визначає формування збудника з більш високим епідемічним потенціалом і наростанням захворюваності. Активізація епідемічного процесу в свою чергу супроводжується збільшенням прошарку імунних, які знижують епідемічний потенціал збудника і визначають спад захворюваності ще до вичерпання прошарку сприйнятливих. Виявлення багаторічної циклічності має важливе значення для вироблення прогнозів захворюваності та розробки раціональних профілактичних заходів;

нерегулярні підйоми і спади захворюваності в багаторічній динаміці виникають у зв'язку з епізодичними змінами в соціальних і природних факторах. Ці зміни сприяють формуванню збудників з високим епідемічним потенціалом, що тягне за собою розвиток епідемічних спалахів або епідемій. Епідемії розвиваються в період війн, після стихійних лих, при упущеннях в проведенні високоефективних протиепідемічних заходів. Будь-які виражені міграційні процеси супроводжуються розвитком епідемій.

Річна динаміка захворюваності характеризується регулярними підвищеннями і зниженнями захворюваності, так званими *сезонними і міжсезонними періодами*. Інтервал, що включає перший місяць сезонного підйому захворюваності в одному році, і місяць, що передує новому сезонному підвищенню захворюваності в наступному році, називається епідемічним роком. При розгляді епідемічних процесів в різних галузях знань виділяється різна сезонність. Наприклад, зазвичай говорять про зимову сезонність аерозольних інфекцій і літню сезонність кишкових інфекцій, під час розгляду вірусного маркетингу в мережі Інтернет спостерігається осінньо-весняна сезонність тощо. Однак конкретні прояви сезонності індивідуальні для різних форм епідемічного процесу, а в межах окремих форм вони індивідуальні для різних територій і для окремих груп популяції на одній і тій самій території. Сезонність – одне з найбільш виразних проявів фазності розвитку епідемічного процесу. Саме тут легко виявляються міжепідемічний і епідемічний періоди, пов'язані з фазами резервації збудника і його епідемічного розповсюдження.

У річній динаміці захворюваності, крім періодично повторюваних сезонних епідемій, розвиваються епідемії, що не мають регулярної повторюваності або характеризуються тими чи іншими відносно локальними проявами. Межі між цими поняттями відносні, оскільки сезонна епідемія супроводжується збільшенням кількості уражених популяцій в кожному з них.

При прогнозуванні виділяють три типи прогнозів: коротко-, середньо- і довгостроковий. При цьому експертам, які досліджують епідемічний процес, цікаво лише прогнозування епідемічної спалаху, тобто періоду **«епідемія-спад»** [118]. Це пов'язано з тим, що динаміка процесу може поміняти правила розповсюдження після спалаху внаслідок вжитих протиепідемічних заходів, а також природного вимирання зараженої популяції.

2.2 Розробка структури універсальної системи популяційної динаміки

Епідеміологічна модель заснована на концепції епідемічного процесу Л. В. Громашевського [119], згідно з якою епідемічний процес існує при безперервній взаємодії трьох основних компонентів – джерела інфекції, механізму передачі і сприйнятливою організму.

У загальному вигляді запропонована імітаційна модель епідемічного процесу описана в працях [1, 5, 6, 15, 120].

2.2.1 Структура агентів

Найбільш вигідним типом агента при дослідженні епідемічних процесів є емоційно-мотивований інтелектуальний агент, для найбільш повної і точної моделі поведінки людини. Представимо агента як набір властивостей

$$a = \langle s, s_t, c, t_a, l \rangle, \quad a \in A, s \in S, c \in C, t_a \in T_a, \quad (2.1)$$

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:

$$S = \{Susceptible, Exposed, Infected, Convalescent, Recovered, Dead\}. \quad (2.2)$$

Використання такого набору станів ґрунтується на ідеї розподілу всієї популяції на підмножини, виходячи з їхніх станів за епідемічними ознаками

(класична модель типу SIR [121]). Запропонований набір характеризує модель, як аналог розширеної моделі типу SEIR [122].

На рисунку 2.1 наведені переходи між станами агентів:

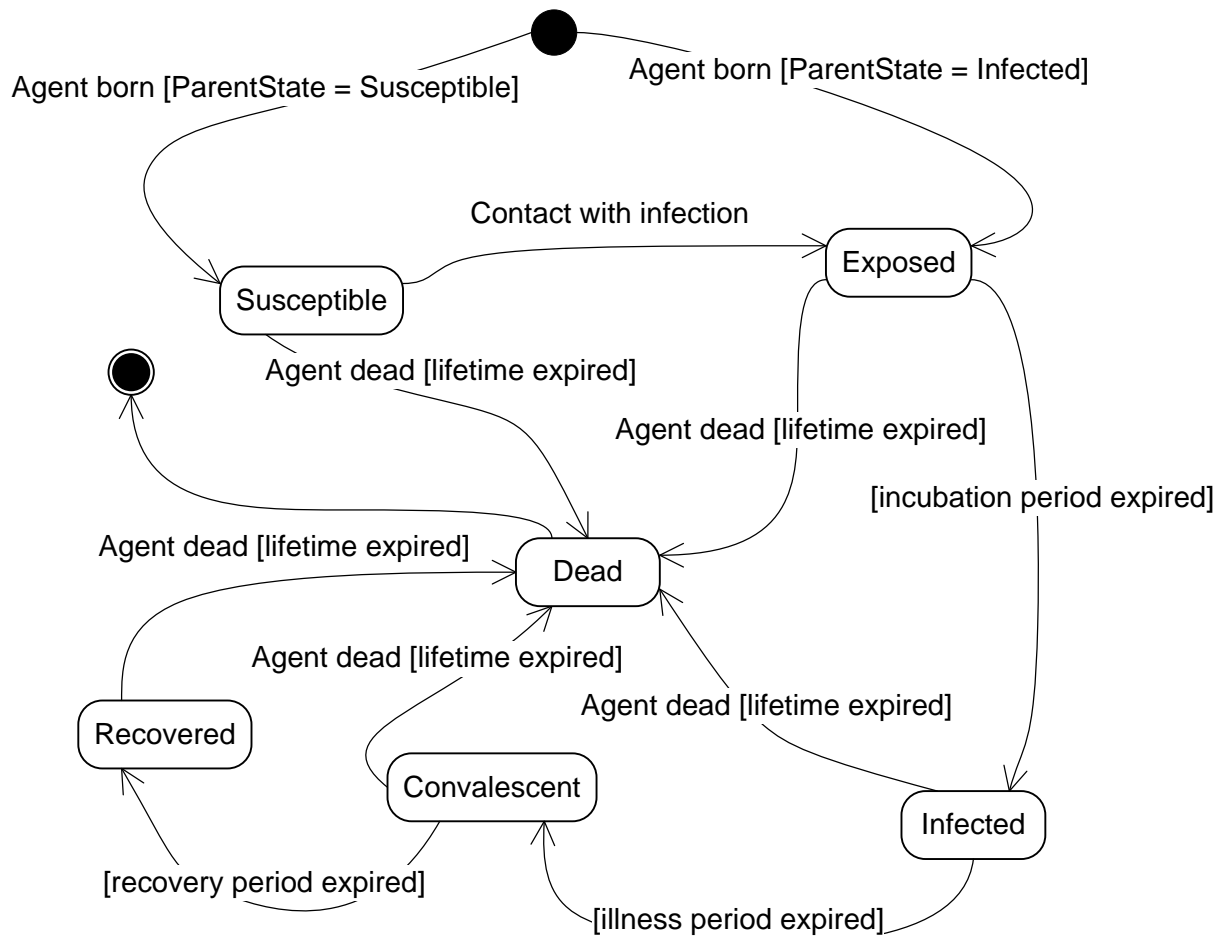


Рисунок 2.1 – Схема, що описує зміни станів агента

- **Susceptible** – агент здоровий (може бути схильним до зараження). В даному випадку під здоровим мається на увазі агент, який є сприйнятливим до захворювання на інфекцію, епідемічний процес якої моделюється.

- **Exposed** – агент зазнав захворювання. Даний стан являє собою інкубаційний 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 характерна для певних інфекційних захворювань.

- Recovered – агент видужав (придбав імунітет). Агенти в цьому стані більш не схильні до захворювання.

- Dead – агент мертвий від старості або внаслідок захворювання.

Для агентів було визначено два типи, які можна умовно назвати, як «розсудливі» і «що ризикують». Характеристики, визначені для кожного з типів, представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Опис типів агентів

Тип	Розсудливі	Що ризикують
Ймовірність народження	80,0 %	20,0 %
Ймовірність переходу в область ризику в здоровому стані	1,0 %	10,0 %
Ймовірність переходу до лікарні в здоровому стані	0,7 %	0,1 %
Ймовірність переходу в область ризику в хворому стані	0,5 %	5,0 %
Ймовірність переходу до лікарні в хворому стані	80,0 %	25,0 %
Тривалість перебування в домашній області	20 ч	15 ч
Тривалість перебування в області ризику	2 ч	8 ч
Тривалість перебування в області Лікарня	2 ч	1 ч

З урахуванням особливостей моделювання епідемічного процесу, описаних вище, розроблена внутрішня структура агентів, яка включає в себе наступні поля (Рисунок 2.2):

1. *Порядковий номер (Index)*. Призначений для точного детермінування агента серед інших.
2. *Локальний час агента (LocalTime)*. Призначено для регулювання черговості діяльності агентів, а також для визначення необхідності обробки агента системою.
3. *Глобальний час агента (GlobalTime)*. Містить час модельного світу, актуальний для агента.
4. *Координати агента (X, Y)*. Призначені для визначення фізичного місця розташування в модельному світі.
5. *Напрямок руху (VX, VY)*. Містить інформацію про фізичний напрямок агента в модельному світі.
6. *Стан агента (State)*. Містить стан, в якому перебуває агент в поточний момент часу.
7. *Поточна комірка (CurrentCell)*. Містить характеристики, притаманні поточному розташуванню агента.
8. *Поточна область (RegionType)*. Дозволяє отримати інформацію про область, в якій в даний момент знаходиться агент.
9. *Час, проведений в поточній області (TimePass)*. Містить момент завершення перебування агента в поточній області. При досягненні цього моменту часу агент переходить в іншу область.
10. *Тип агента (AgentType)*.
11. *Вік агента (Age)*. Величина, яка відображає модельний вік агента.
12. *Стать агента (Gender)*.
13. *Інкубаційний період (IncubationPeriod)*. Містить момент закінчення інкубаційного періоду. При досягненні цього моменту часу агент захворює.
14. *Тривалість життя (LifeTime)*. Містить кількість модельного часу, що відводиться агенту для життя. Для кожного агента це значення різне. Також передбачається, що це значення може змінюватися при певних умовах (наприклад, після перенесеної хвороби).

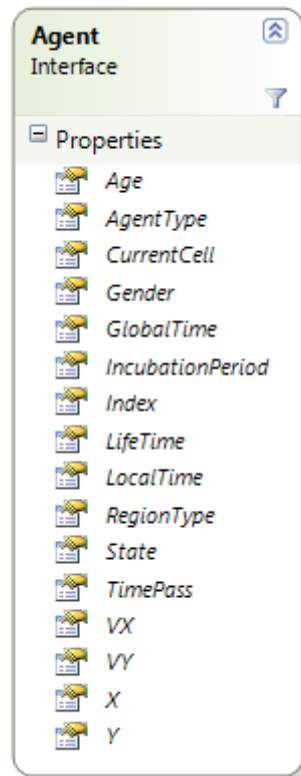


Рисунок 2.2 – Поля, що входять у внутрішню структуру агента.

2.2.2 Середовище

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 комірку можна описати

$$c = \langle z, \tilde{A}, i \rangle, z \in Z, \tilde{A} \subset A, i \in I, \quad (2.3)$$

де I – множина всіх інструментів,

Z – множина всіх робочих областей.

Робоча область може бути описана наступним чином

$$z = \langle \tilde{C}, t_z \rangle, \tilde{C} \subset C, t_z \in T_z, \quad (2.4)$$

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 три області:

- домашня, в ній допускаються тільки контакти між агентами.
- ризику, в ній, крім контактів між агентами, можливе зараження від інфікованого інструменту.

- «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 у даній моделі маються на увазі різні предмети, які так чи інакше здатні переносити інфекцію від однієї людини до іншої (шприци, ножиці та ін.). Вони в різному ступені можуть бути піддані незаражувальному впливу. Щоб уникнути надмірного ускладнення моделі, описані особливості зводяться до тривалості життя інструменту. Таким чином, інструмент може бути описаний як набір

$$i = \langle s, c, l \rangle. \quad (2.5)$$

Імітаційну модель можна представити у вигляді функції

$$\text{sim}(l_{\text{mean}}, |A|_0, \bar{P}, T), \quad (2.6)$$

де l_{mean} – середня тривалість життя,

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

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

2.2.3 Взаємодія агентів

У своїй основі інтелектуальні мультиагентні технології містять елементи дискретно-подієвого підходу. Це проявляється в тому, що в системі є тимчасова шкала, по якій йде процес моделювання.

Особливість полягає в тому, що на цій шкалі за певними правилами, виходячи із загальної ситуації в системі та індивідуальних характеристик осіб, з'являються події агентів, які відбуваються і обробляються системою після досягнення необхідного моменту часу. Серед подій є події-перетинання кордонів комірок, що утворюють потік подій першого типу. Такі події представлені зростаючою послідовністю моментів часу, обробляються, як перехід з однієї комірки в іншу. Також в системі присутні події взаємодії з іншими агентами, що призводить до розгалуження результатів події в залежності від індивідуальних властивостей агентів, що взаємодіють один з одним. Таким чином створюється потік подій другого типу. Обробка обох типів подій і генерація наступних для кожного агента – складна задача, яка пов'язана з деякими проблемами технічного характеру, від вирішення яких безпосередньо залежить адекватність і доцільність використання моделі.

Якщо намагатися розглядати взаємодію агентів як безпосередній фізичний контакт, то при використанні подієвого підходу взаємодії агентів будуть подіями другого типу [123]. Додавання в систему обробки подій другого типу веде до значного зменшення швидкості моделювання. Подібна ситуація була б прийнятною в разі моделювання процесів фізичного характеру. При моделюванні такого явища, як епідемічний процес, очевидно, що учасники процесу можуть взаємодіяти один з одним не тільки при безпосередньому фізичному контакті (наприклад, захворювання, що передаються повітряно-крапельним шляхом). Обробка такого типу подій досить складна, що призводить до уповільнення процесу моделювання [124]. У даній роботі пропонується спростити розгляд моменту інфікування шляхом встановлення належності агентів одній комірці. Це дозволяє врахувати можливість взаємодії агентів і при цьому істотно знизити втрату продуктивності.

У програмній структурі комірки передбачено поле, що містить список всіх агентів, що знаходяться в поточний момент часу в даній комірці. Для спрощення процесу моделювання потрапляння в одну комірку множини

агентів вважається їх взаємодією. Взаємодія агентів обробляється середовищем моделювання в залежності від області, до якої належить комірка, а також від типів агентів, що взаємодіють.

Контактна передача захворювання від агента до агента реалізована наступним чином. Для початку перевіряється можливість контактного зараження. Вважається, що це можливо, якщо в одній комірці разом з поточним агентом, що обробляється, розташовуються також і інші агенти. Відбувається зіставлення кожної пари агентів (що утворюються з поточного агента, який обробляється з іншими агентами в поточній комірці). Якщо, принаймні, один з агентів є носієм захворювання, то вважається, що з певною ймовірністю між агентами відбувається контакт, достатній для здійснення зараження, і здоровий агент інфікується.

Обробка взаємодії між агентами здійснюється середовищем моделювання в залежності від захворювання, що моделюється. При розгляді певних епідемічних процесів логіка обробки взаємодії агентів може ускладнюватися.

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

$$t = \langle \bar{P}_t, \bar{\tau}_t \rangle, \quad (2.7)$$

де \bar{P}_t – вектор ймовірностей, характерних 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:

$$\bar{P}_t = (P_b, P_{hr}, P_{hh}, P_{sr}, P_{sh}), \quad (2.8)$$

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 у хворому стані перейде в область ризику,

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

$$\bar{\tau}_t = (\tau_h, \tau_r, \tau_m), \quad (2.9)$$

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

τ_r – кількість модельного часу, який агент поточного типу проводить, перебуваючи в області ризику,

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

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

$$\bar{P} = (P_i, P_r, P_d, P_s, P_a), \quad (2.10)$$

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 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.

Крім того, кожен тип зумовлює для агента тривалість перебування в кожній з областей. По закінченні перебування в конкретній області, агент із заданою ймовірністю переходить в іншу область. Перехід здійснюється на основі того, в якому стані (CurrentState) і в якій області (CurrentRegion) перебував агент, а також під впливом ймовірностей переходу, визначених його типом (рис. 2.3).

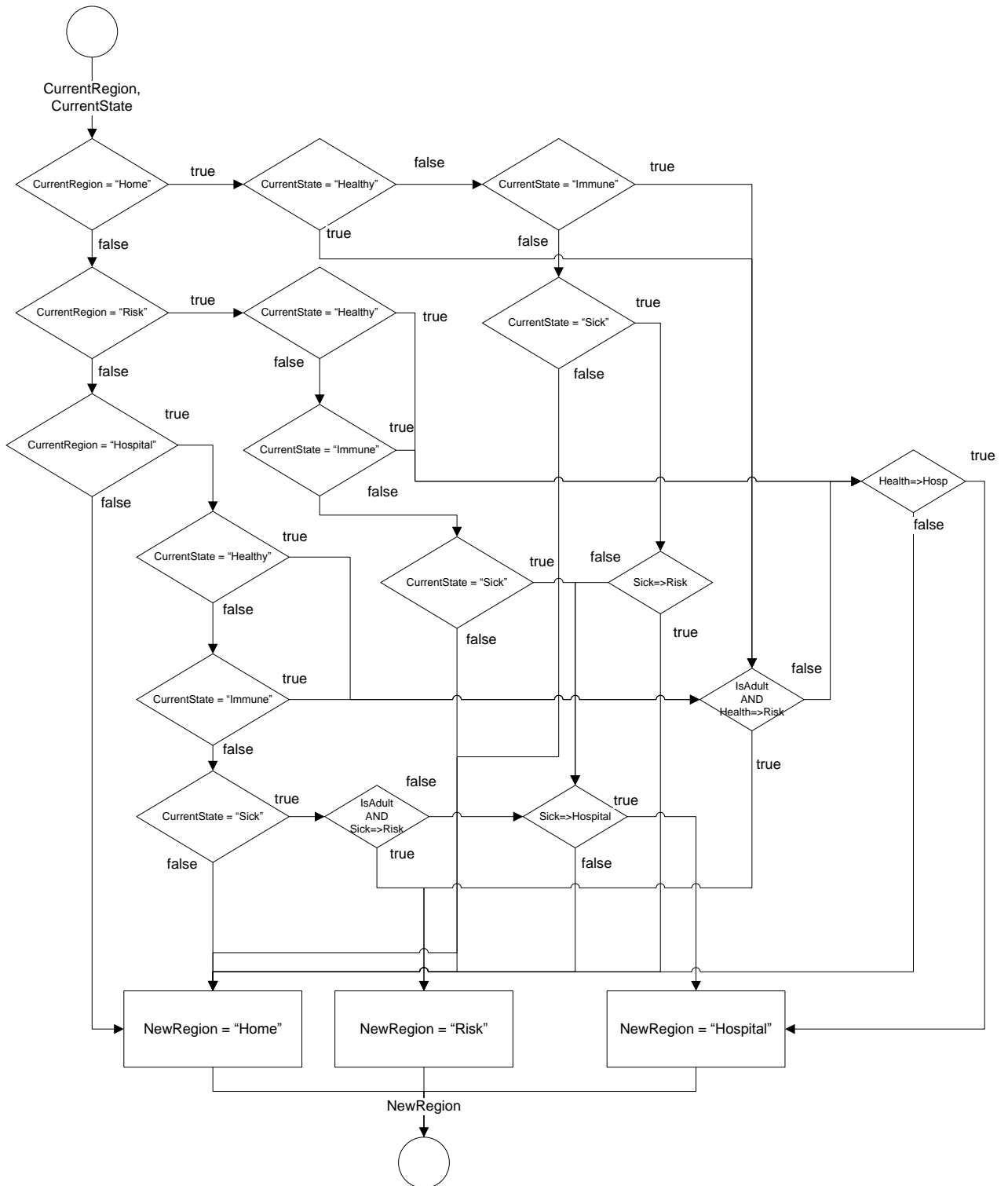


Рисунок 2.3 – Правила переходу агентів з однієї області в іншу

Адекватність отриманої моделі перевірено шляхом порівняння її з класичною моделлю SIR. Графіки на рис. 2.4. відображають кількість агентів, що знаходяться в певному стані в конкретний момент модельного часу. На графіках вісь абсцис – час, вісь ординат – кількість індивідумів, S – здорові агенти, I – інфіковані, R – що видужали.

Можна відзначити, що загальна поведінка розробленої моделі збігається з поведінкою класичної моделі.

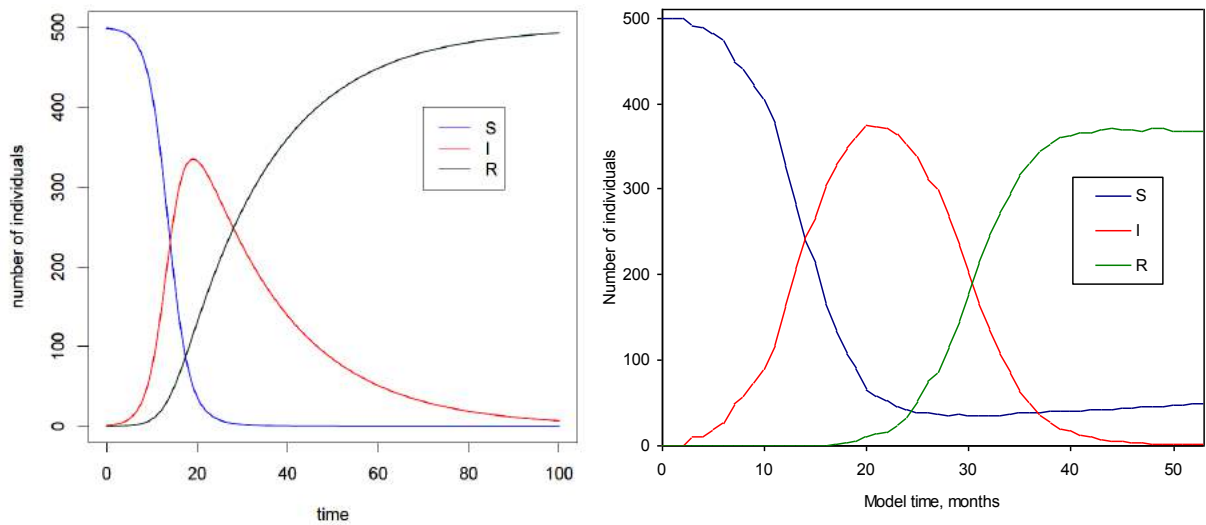


Рисунок 2.4 – Порівняння результатів отриманої моделі (праворуч) з результатами класичної моделі (зліва [121])

2.3 Моделювання популяційної динаміки на основі інтелектуальних раціональних агентів

У модель, що описано в підрозділі 2.2, пропонується ввести поняття раціонального агента.

Згідно Расселу і Норвігу [125], агентом є все, що може бути розглянуто як сприйняття його навколишнього середовища за допомогою датчиків і дію відповідно до цього середовища за допомогою пристроїв, що впливають. Приклади включають людей, роботів і програмних агентів.

Термін «автономний» часто використовується для позначення агента, чие прийняття рішень залежить більшою мірою від його власного сприйняття, ніж від знань, даних йому під час розробки.

В даному підрозділі розглянуто задачу оптимального прийняття рішень агента: як агент може вибрати найкращу з можливих дій на кожному кроці часу, використовуючи свої знання про навколишній світ. Будемо вважати, що агент є раціональним, якщо він завжди вибирає дію, яка оптимізує відповідні заходи продуктивності, використовуючи те, що він знав досі [126]. Показник продуктивності, як правило, визначається користувачем (розробником агента) і відображає те, що користувач очікує від агента в задачі. Наприклад, хворий агент повинен діяти таким чином, щоб максимально скоротити час одужання, здоровий агент повинен намагатися не захворіти, і т.д. Раціональних агентів також називають розумними агентами.

Надалі будемо в основному використовувати обчислювальних агентів, тобто тих, які призначені для вирішення конкретної задачі і реалізуються на певних обчислювальних пристроях.

Проблема прийняття рішень агентом є предметом оптимального контролю [127, 128]. Для цілей дослідження приймемо дискретний набір часових кроків $t=0,1,2, \dots$, в кожному з яких агент повинен вибрати дію a_t з кінцевої множини дій A , які він має в своєму розпорядженні. Інтуїтивно, щоб діяти раціонально в момент часу t , агент повинен взяти до уваги минуле і майбутнє при виборі дії. Минуле належить до того, що агент опанував і які дії зробив до часу t , а майбутнє належить до того, що агент розраховує пізнати і які дії зробити після часу t .

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

$$\pi(\theta_0, a_0, \theta_1, a_1, \dots, \theta_t) = a_t, \quad (2.11)$$

що вимагає відображення повної історії спостережень-пар дій і часу t до оптимальної дії a_t , називається політикою агента.

Оскільки можливо знайти функцію π , що реалізує дане відображення, частину оптимального прийняття рішень, які відносяться до минулого, можна вирішити. Проте визначення і застосування такої функції проблематично, повна історія може складатися з дуже великого (навіть нескінченного) числа спостережень-пар дій, які можуть варіюватися від однієї задачі до іншої. Просто зберігання всіх спостережень вимагатиме дуже великий обсяг пам'яті, не враховуючи витрати для фактичного обчислення π , що вимагає більш простої політики. Однією з можливостей для агента є ігнорування всієї його історії, крім останнього спостереження θ_t . В цьому випадку його політика приймає форму

$$\pi(\theta_t) = a_t, \quad (2.12)$$

яка є відображенням поточного спостереження агентом дії. Агент, який просто відображає його поточне спостереження θ_t до нової дії a_t , тобто, ефективно ігноруючи минуле, називається рефлекторним агентом, і його політика (2.12) називається реактивною [129].

Із викладеного виходить, що терміни «агент» і «навколишнє середовище» зв'язані і жоден з них не може бути визначений без іншого [130]. Для моделювання динамічних систем з епідемічним характером будемо вважати далі існування світу, в якому впроваджено один або більше агенти, і в яких вони сприймають, мислять і діють. Зібрана інформація, яка міститься в світі в крок часу t і яка має відношення до задачі, буде називатися станом світу і позначатися s_t . Множину всіх станів світу будемо позначати як S . Як приклад, при моделюванні епідемічного захворювання стан світу можна охарактеризувати за кількістю зон ризику, розташуванню лікарень, положенню і швидкостям усіх учасників епідемічного процесу, тому що кожен агент знає один про одного, і іншим параметрам, які мають відношення до прийняття рішень агентами.

Залежно від характеру проблеми світ може бути дискретним або безперервним. Дискретний світ може характеризуватися кінцевим числом станів, наприклад, можливі варіанти переходу агентів у різні зони в залежності від їх стану (хворий із зони ризику в лікарню, здоровий з лікарні в дім, і т.д.). Безперервний світ може мати нескінченно багато станів, наприклад можливі конфігурації точок робота, який переміщується на площині, в цьому випадку $S = IR^2$. Більшість існуючих методик штучного інтелекту були розроблені для дискретних світів, які будуть і основними об'єктами даної дисертаційної роботи.

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 θ_t агента повністю розкриває поточний стан світу, тобто $s_t = \theta_t$. З іншого боку, в світі, що спостерігається частково, поточне спостереження θ_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 θ_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 и θ_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 Баєса:

$$p(s_t | \theta_t) = \frac{p(\theta_t | s_t)p(s_t)}{p(\theta_t)}. \quad (2.13)$$

Часткова спостережуваність пов'язана з двома факторами. По-перше, це може бути результатом шуму в сенсорах агента. Наприклад, через помилку лікаря той же стан може «генерувати» різні спостереження агента в різні моменти часу. Тобто кожен раз, коли агент буває в певному стані, він може сприйматися, як щось інше. По-друге, часткова спостережуваність може бути пов'язана з невід'ємною властивістю навколишнього середовища, званою перцепційним згладжуванням: різні стани можуть приводити до ідентичних спостережень агента на різних часових кроках. Іншими словами, два стани можуть «виглядати» однаково для агента, хоча вони різняться. Наприклад, хворий і здоровий агенти будуть виглядати однаково для звичайного агента і для лікаря до тих пір, поки не будуть проведені необхідні дослідження, незалежно від того, наскільки точними є датчики кожної системи.

Часткова спостережуваність набагато складніша в обігу, ніж повна і алгоритми для оптимального прийняття рішень у світі, що спостерігається частково, часто можуть стати важкооброблювальними. 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.

Розглянемо випадок рефлекторного агента з реактивною політикою $\pi(\theta_t) = a_t$ в світі, що спостерігається повністю. Припущення про спостережуваність передбачає, що $s_t = \theta_t$ і, отже, політика агента

$$\pi(s_t) = a_t. \quad (2.14)$$

Іншими словами, у світі, що спостережується, політика рефлекторного агента відображається зі стану світу в дії. Мета досягається завдяки тому, що в багатьох задачах стан світу в момент часу t забезпечує повну характеристику історії станів до моменту t . Такий стан світу, який узагальнює всю необхідну інформацію про минуле, називається Марковим або тим, що має Марківську властивість. Виходячи зі сказаного, в світі Маркова агент може безпечно використовувати безпам'ятну політику (2.14) для прийняття рішень.

Досі розглядалося, що політика агента може залежати від його минулого досвіду і характерних особливостей навколишнього середовища. Однак, як стверджувалось на початку підрозділу 2.3, оптимальне прийняття рішень має також брати до уваги майбутнє. У класичному штучному інтелекті метою для конкретної задачі є бажаний стан світу. Відповідно, планування визначається як пошук оптимального шляху до мети серед станів простору.

У стохастичному світі, однак, планування не може бути здійснено за допомогою простого пошуку графа, тому що переходи між станами є недетермінованими. Тепер агент повинен взяти до уваги невизначеність переходів при плануванні. Щоб побачити як це може бути реалізовано, відзначимо, що в детермінованому світі агент віддає перевагу за замовчуванням цільовому стану нецільовому. Загалом кажучи, агент повинен тримати переваги між будь-якими станами світу. Наприклад, хворий агент найбільш віддасть перевагу одужати швидко, менш (але все ще сильно), віддасть перевагу одужати за більш тривалий час, і т.д.

Способом формалізувати поняття вподобань стану є присвоєння кожному стану s реального числа $U(s)$, яке називається вигодою стану s для цього конкретного агента. Формально для двох станів s і s' вірно, що $U(s) > U(s')$, тоді і тільки тоді, коли агент віддає перевагу стану s перед станом s' і $U(s) = U(s')$, тоді і тільки тоді, коли агент індиферентний по відношенню до станів s і s' . Інтуїтивно, вигода стану висловлює «бажаність» цього стану для конкретного агента, чим більше вигода стану, тим краще стан для цього агента. У дискретному світі на рис. 2.5, наприклад, агент вважав би за краще стан $d3$ станам $b2$ або $d2$. У мультиагентній системі стан може бути бажаним для конкретного агента і в той же час бути небажаним для іншого агента.

				1
			+1	2
	-1		-1	3
Start				4
	a	b	c	d

Рисунок 2.5 – Світ з одним бажаним (+1) і двома небажаними (-1) станами

Припустимо, що існує тільки один агент у світі, і світ стохастичний 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 повинна максимізувати очікувану вигоду, тобто

$$a_t^* = \arg \max \sum_{s_{t+1}} p(s_{t+1} | s_t, a_t) U(s_{t+1}), \quad (2.15)$$

де підсумовуються всі можливі стани $s_{t+1} \in S$ при яких світ може перейти в новий стан, враховуючи, що теперішній стан s_t та 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 згадані 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

$$\pi^*(s) = \arg \max_a \sum_{s'} p(s' | s, a) U^*(s'), \quad (2.16)$$

є оптимальною політикою для агента.

Також для кожного стану s і кожної можливої дії a можна визначити оптимальне значення дій або значення Q , $Q^*(s,a)$, яке вимірює ступінь відповідності дії a в стані s для даного агента. Для Q вірно, що $U^*(s) = \max_a Q^*(s,a)$, коли оптимальна політика може бути обчислена як

$$\pi^*(s) = \arg \max_a Q^*(s,a), \quad (2.17)$$

що є більш простою формулою, ніж (2.16), яка не використовує моделі переходу.

2.4 Інтелектуальна і логічна взаємодія агентів

Розглянемо випадок, де частини станів приховані від агентів. В такому світі, що спостерігається частково, агент завжди повинен розмірковувати про свої знання та знання інших перед прийняттям рішення. Формалізуємо поняття знань і загальних знань в таких галузях, і опишемо модель гри Баєса для мультиагентного прийняття рішень в умовах часткової спостережуваності.

Для того щоб діяти раціонально, агент завжди повинен реагувати на те, що він знає про поточний стан світу. Як показано в підрозділі 2.3, якщо стан повністю спостерігається, агент може працювати досить добре без широкого обмірковування. Якщо стан спостерігається частково, агент повинен спочатку уважно розглянути, що він знає і те, чого не знає, перш ніж вибрати дію.

У мультиагентній системі часткова спостережуваність змушує раціонального агента думати інтерактивно, тобто брати до уваги знання інших агентів під час прийняття рішень. Крім того, агент повинен розглянути те, що інші агенти знають про нього, а також те, що вони знають про його знання.

Часткова спостережуваність може мати різні наслідки для прийняття рішень агентами. Наприклад, оптимальне планування при частковій

спостережуваності може бути важкою задачею навіть у випадку з єдиним агентом. У мультиагентному випадку оптимальне планування при частковій спостережуваності є нерозв'язним [131]. Останнє обумовлено тим, що, як зазначено вище, кожен агент повинен брати до уваги знання кожного іншого агента в прийнятті своїх рішень, що може істотно збільшити складність проблеми.

Розглянемо поняття інформації та загальних знань на прикладі моделі розповсюдження гепатиту В [132].

Три агента здали кров на гепатит В. З метою економії коштів, в лабораторії використовується пул сироваток крові, тобто змішуються сироватки від декількох хворих. Якщо результат негативний, то усі пацієнти здорові, якщо позитивний – хтось із пацієнтів хворий, і тоді проводяться подальші дослідження [133]. Їх стани можуть бути або «здоровий», або «хворий», але припустимо, що всі агенти хворі. Кожен агент не знає свого стану. Лікар, який проводить дослідження крові, запитує у агентів про їх спосіб життя, оцінює належність кожного до групи ризику і передає цю інформацію двом іншим агентам. Він запитує агентів, чи знають вони про свої стани. Кожен агент відповідає негативно. Після проведених досліджень лікар оголошує «Принаймні, один із вас хворий», а потім питає їх знову по черзі. Агент 1 говорить «ні», Агент 2 також говорить «ні», але коли лікар запитує агента 3, той говорить «так». Як це можливо, що агент 3 може, нарешті, з'ясувати свій стан? Перед оголошенням, що, принаймні, один з них хворий, жоден агент не був в змозі сказати, хворий він чи ні. Які зміни відбулися після оголошення? Здавалося б, оголошення не виявило нічого нового; кожен агент вже міг припустити, що серед них є, принаймні, один хворий, тому що він знає інформацію про їх належність до групи ризику.

Враховуючи, що кожен з агентів чув, що є, принаймні, один хворий, агент 3 може визначити свій стан, розмірковуючи таким чином: «Ні» агента 1 означає, що або я, або агент 2 знаходиться в зоні ризику, тобто швидше за все хворий. Агент 2 знає про це, так що якби я не був в зоні ризику, агент 2

сказав би «Так». Але агент 2 сказав «Ні», оскільки я перебуваю в зоні ризику, а значить, швидше за все хворий ».

Хоча кожен агент вже знає (з сприйняття) той факт, що, принаймні, один агент хворий, ключовим моментом є те, що публічне оголошення про людину, робить цей факт загальним знанням серед агентів. (Побічно також передбачається, що загальним знанням є те, що кожен агент може сприймати інформацію і розмірковувати раціонально.) Такий приклад демонструє наслідки інтерактивних міркувань і міцність загальних знань.

Спробуємо тепер формалізувати деякі з концепцій, які з'являються в прикладі. Відправною точкою є те, що стан світу частково спостерігається для агентів. У світі, що спостерігається частково, сприйняття агента надає тільки часткову інформацію про справжній стан за допомогою детермінованої або стохастичної моделі спостереження (розділ 2.3). В даному прикладі ця модель являє собою детерміновану модель.

Нехай S – множина всіх станів і $s \in S$ – поточний стан світу. Припускаємо, що сприйняття агента i надає інформацію про стан s через інформаційну функцію $P_i : S \mapsto 2^S$, яка відносить s до $P_i(s)$, непустій підмножині S , званій інформаційною множиною агента i в стані s . Інтерпретація інформаційної множини така, що коли дійсний стан – s , агент i вважає, що будь-який стан в $P_i(s)$ може бути істинним станом. Множина $P_i(s)$ буде завжди містити s , але власне це єдине, що агент i знає про справжній стан. У разі декількох агентів кожен агент може мати різну інформаційну функцію.

Таблиця 2.2 – Вісім станів світу з прикладу

		Стани світу							
		a	b	c	d	e	f	g	h
Агенти	1	I	I	I	I	H	H	H	H
	2	I	I	H	H	I	I	H	H
	3	I	H	I	H	I	H	I	H

У прикладі, розглянутому вище, стан є трикомпонентним вектором, що містить стани агентів. Нехай I і H позначають «хворий» і «здоровий» відповідно. Тоді існує 8 станів $S = \{a, b, c, d, e, f, g, h\}$, як показано в табл. 2.2. Ймовірно, істинним станом є $s=a$. З умов ми знаємо, що стан частково спостерігається кожним з агентів, тільки два з трьох станів прямо відомі кожному з агентів. Іншими словами, в будь-якому стані s інформаційна множина кожного агента складається з двох рівноймовірних станів, таких, в яких єдиною відмінністю є власний стан агента. Наприклад, в стані $s=a$ інформаційна множина агента 2 – $P_2(s) = \{a, c\}$, підмножина S – з двох станів.

Інформаційна множина $P_i(s)$ агента i складається з тих станів S , які агент i вважає можливими при істинному стані s . В цілому, припускаємо, що інформаційна функція агента розділяє стан простору на зібрання пересічних підмножин, званих комітками, які разом формують множину P_i з S . Інформаційна множина $P_i(s)$ для агента i в істинному стані s – це комітка P_i , яка містить s , поки об'єднання всіх коміток множини P_i це S .

На основі інформаційних функцій, можливо обчислити множини агентів в прикладі

$$P_1^t = \{\{a, e\}, \{b, f\}, \{c, g\}, \{d, h\}\}; \quad (2.18)$$

$$P_2^t = \{\{a, c\}, \{b, d\}, \{e, g\}, \{f, h\}\}; \quad (2.19)$$

$$P_3^t = \{\{a, b\}, \{c, d\}, \{e, f\}, \{g, h\}\}, \quad (2.20)$$

де t відноситься до часового кроку до будь-яких оголошень. В істинному стані $s=a=III$: жоден агент не знає свого стану, оскільки відповідна клітка кожного розділу містить два рівноймовірні стани. Агент 1 вважає a та e можливими, агент 2 вважає a та c можливими, агент 3 вважає a та b можливими.

Наступним кроком є додаткове припущення, що всі стани є загальними знаннями серед агентів. У разі гомогенних агентів, наприклад, це припущення реалістично, оскільки кожен агент буде знати про можливості сприйняття один одного. В даному прикладі розумно припустити, що всі

агенти можуть сприймати отриману інформацію адекватно та що вони усі раціональні.

Якщо стани є загальними знаннями, тоді в стані a агент 1 думає, що агент 2 може думати, що агент 3 може думати, що $h=ННН$ можливо. Слід зауважити, що в стані a агент 1 думає, що a чи e можуть бути істинним станом (2.18). Але якщо e істинно, тоді з 2.19 випливає, що агент 2 може вважати g істинним станом. Але тоді бачимо з 2.20, що агент 3 може вважати h істинним станом. Слід зауважити, що аналітичні рамки, описані вище, дозволяють сформулювати складні твердження.

Тепер оголошення лікаря відкриває, що дійсний стан не h . Це автоматично змінює сприйняття агентів

$$\begin{aligned} P_1^{t+1} &= \{\{a, e\}, \{b, f\}, \{c, g\}, \{d\}, \{h\}\} \\ P_2^{t+1} &= \{\{a, c\}, \{b, d\}, \{e, g\}, \{f\}, \{h\}\} \\ P_3^{t+1} &= \{\{a, b\}, \{c, d\}, \{e, f\}, \{g\}, \{h\}\} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Слід зазначити, що h знімає неоднозначність з d , f та g в трьох можливих станах. Потім лікар запитує кожного агента по черзі, чи знають вони власні стани. Агент 1 говорить «ні». В якому випадку агент 1 сказав би «так»? Як видно з 2.21, тільки в стані d агент 1 знав би власний стан. Але дійсним станом є a , в якому агент 1 все ще вважає стан e можливим.

Відповідь агента 1 виключає стан d з множини можливих станів. Це призводить до уточнення агентів 2 та 3

$$\begin{aligned} P_1^{t+2} &= \{\{a, e\}, \{b, f\}, \{c, g\}, \{d\}, \{h\}\} \\ P_2^{t+2} &= \{\{a, c\}, \{b\}, \{d\}, \{e, g\}, \{f\}, \{h\}\} \\ P_3^{t+2} &= \{\{a, b\}, \{c\}, \{d\}, \{e, f\}, \{g\}, \{h\}\} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Далі опитується агент 2. З його сприйняття станів бачимо, що він би знав, чи хворий він тільки в стані b або f . Однак, в істинному стані a агент 2 все ще вважає c можливим, тому він відповідає негативно. Його відповідь виключає b та f з множини можливих станів, що призводить до уточнення сприйняття агентів 1 та 3

$$\begin{aligned}
P_1^{t+3} &= \{\{a,e\},\{b\},\{f\},\{c,g\},\{d\},\{h\}\} \\
P_2^{t+3} &= \{\{a,c\},\{b\},\{d\},\{e,g\},\{f\},\{h\}\} \\
P_3^{t+3} &= \{\{a\},\{b\},\{c\},\{d\},\{e\},\{f\},\{g\},\{h\}\}
\end{aligned}
\tag{2.23}$$

Сприйняття агента 3 тепер містить тільки одноелементні комірки, тому агент 3 тепер може розпізнати власний стан. Відзначимо, що агенти 1 та 2 досі не можуть сказати, чи хворі вони. Фактично вони не зможуть назвати власні стани незалежно від того, скільки оголошень послідує, стани (2.23) не можуть бути далі уточнені. Цікаво, що описаний аналіз був би абсолютно таким же при будь-якому з істинних станів $\{a, c, e, g\}$.

Будь-яка підмножина E з S називається подією. Якщо для агента i вірно, що $P_i(s) \subseteq E$ в істинному стані s , тоді говоримо, що агент i «знає» подію E . В загальному випадку функція знання агента i визначена як

$$K_i(E) = \{s \in S : P_i(s) \subseteq E\}.$$
(2.24)

Так, для будь-якої події E , множина $K_i(E)$ включає в себе всі стани, в яких агент i знає E . $K_i(E)$ може бути записано як об'єднання всіх клітин P_i , які повністю містяться в E . У прикладі, наприклад, в фінальних сприйняттях (2.23) вірно, що $K_1(\{a,e,c\}) = \{a,e\}$, у той час як для випадку $E = \{a,c,e,g\}$ вірно, що $K_i(E) = E$ для всіх $i=1,2,3$.

Подія $E \subseteq S$ називається самоочевидною для агента i , якщо E може бути записано, як об'єднання клітин P_i . Наприклад, в (2.23) подія $E = \{a,c,e,g\}$ є самоочевидною для всіх трьох агентів. Як інший приклад, припустимо, що простір стану складається з натуральних чисел від 1 до 8, дійсний стан $s=1$, два агента мають такі сприйняття:

$$\begin{aligned}
P_1 &= \{\{1,2\},\{3,4,5\},\{6\},\{7,8\}\} \\
P_2 &= \{\{1,2,3\},\{4\},\{5\},\{6,7,8\}\}
\end{aligned}
\tag{2.25}$$

При $s=1$ агент 1 вважає, що $\{1,2\}$ можливо. Агент 1 також вважає, що агент 2 може думати, що $\{1,2,3\}$ можливо. Більш того, агент 1 вважає, що агент 2 може думати, що агент 1 може думати, що $\{1,2\}$ або $\{3,4,5\}$ можливі. Але нікому не потрібно думати понад $\{5\}$. У цьому прикладі подія $\{1,2,3,4\}$

самоочевидна для агента 2, в той час як подія $\{1,2,3,4,5\}$ самоочевидна для обох агентів.

Тепер можна сформулювати поняття загальних знань. Для спрощення, перше твердження сформульовано для двох агентів:

Подія $E \subseteq S$ є загальним знанням для агентів 1 та 2 при істинному стані $s \in S$, якщо s є членом кожного з множин нескінченної послідовності $K_1(E), K_2(E), K_1(K_2(E)), K_2(K_1(E)), \dots$.

Подія $E \subseteq S$ є загальним знанням серед групи агентів при істинному стані $s \in S$, якщо s є членом певної множини $F \subseteq E$, яка є самоочевидною для всіх агентів.

Ці два твердження еквівалентні [134]. Проте друге твердження набагато простіше застосовувати; воно вимагає лише обчислень самоочевидних множин, які є об'єднаннями сприйняття клітин i , таким чином, їх легко знайти. Наприклад, у наведеному прикладі подія $E = \{1,2,3,4,5\}$ є загальним знанням між двома агентами, оскільки E самоочевидна для них обох та дійсний стан $S=1$ відноситься до E . Аналогічно в прикладі з агентами, зараженими гепатитом В, в кінцевих сприйняттях (2.23), та з дійсним станом $S=a$, подія $E = \{a, c, e, g\}$ є загальним знанням серед всіх трьох агентів.

Вище розглянуто, яким чином спостереження агентів відносяться до станів світу за допомогою інформаційних функцій i що означає те, що випадок є загальним знанням для групи агентів.

Розглянемо приклад з хворими на гепатит В знову, а зокрема, часовий крок після публічного оголошення лікаря. Ідентифікуємо примітиви мультиагентної взаємодії в той крок, який відноситься до прийняття рішення агентами.

Істинний стан $s=a=III$, і він частково спостерігається іншими агентами: кожен агент I отримує спостереження $\theta_i \in \Theta_i$, яке надає інформацію про s через інформаційну функцію P_i . (Вище θ_i не були явними; тут робимо їх

явними, асоціюючи кожен інформаційну множину $P_i(s)$ з відповідним спостереженням θ_i .) Наприклад, при $s=III$ агент 1 спостерігає $\theta_1 = II$, що означає, що він бачить два стани «хворий» агентів 2 і 3, де θ_i є членом множини $\Theta_1 = \{II, IH, HI, HH\}$ (всі можливі спостереження агента 1). Сукупність індивідуальних спостережень всіх агентів (θ_i) визначає поточне спостереження θ .

Модель сприйняття асоціює кожне спостереження θ_i агента i з єдиною інформаційною множиною $P_i(s)$, яка є підмножиною простору стану. Наприклад, $\theta_1 = II$ асоціюється з інформаційною множиною $P_1(s) = \{a, e\}$. У цьому випадку кожне спостереження є певною функцією стану: спостереження кожного агента в кожному стані повністю визначено умовами події (станами кожного з агентів). Як було відмічено в підрозділі 2.3, більш загальні моделі спостереження можуть бути визначені в разі, якщо зв'язок між станами і спостереженнями стохастичний. Наприклад, спостережна модель може визначити спільний ймовірнісний розподіл $p(s, \theta)$ по станах і спільним спостереженням, з яких може бути підраховано множину інших кількостей, таких як $p(\theta)$ або $p(\theta|s)$, з використанням законів теорії ймовірності.

У прикладі з хворими кожен агент відповідає «так» чи «ні» на запитання лікаря: «Ви знаєте свій стан?». Така відповідь може бути розглянута як дія агента, котрий володіє поточною інформацією. Наприклад, в фінальних сприйняттях (2.23), агент 1 відповідає «ні», маючи в своєму розпорядженні інформаційну множину $\{a, e\}$, а агент 3 відповідає «так», маючи в своєму розпорядженні множину $\{a\}$. Загалом, в мультиагентному прийнятті рішень в умовах часткової спостережуваності політикою кожного агента i є співставлення $\pi_i : \Theta_i \mapsto A_i$ індивідуальних спостережень θ_i до індивідуальних дій $a_i = \pi_i(\theta_i)$. Профіль індивідуальних політик (π_i) визначає об'єднану політику π .

В розглянутому прикладі агенти відповідають правдиво на питання. Незважаючи на те, що платіжну функцію в даній задачі не визначено явно, можливо думати про неявну платіжну функцію, яку максимізують агенти і в якій правдивість високо оцінена. Мультиагентне прийняття рішень вимагає визначення явної платіжної функції Q_i для кожного агента. Ця функція може приймати кілька форм, наприклад, це може бути функція $Q_i(s, a)$ від станів і об'єднаних дій, або функція $Q_i(\theta, a)$ від об'єднаних спостережень і об'єднаних рухів, або функція $Q_i(\theta_i, a)$ від індивідуальних спостережень і об'єднаних рухів. Слід зауважити, що часто одна форма може бути отримана з іншої, наприклад, коли зворотна модель спостереження $p(s | \theta)$ можлива, можливо записати $Q_i(\theta, a) = \sum_{s \in S} p(s | \theta) Q_i(s, a)$.

Коли твердження, що згадане вище, визначене, мультиагентне прийняття рішень при частковій спостережуваності може бути змодельоване грою Баєса, також відомою як «стратегічна гра з недосконалою інформацією», зокрема, гра Баєса передбачає, що існує множина станів S , з яких один стан (дійсний) визначено на початку гри. Дійсний стан лише частково спостерігається агентами, кожен агент i отримує спостереження θ_i , також зване типом агента i , яке приховано від інших агентів, і яке відноситься до стану через визначену або стохастичну модель спостереження. Кожен агент додатково володіє платіжною функцією Q_i , як описано вище. Рішенням гри є набір індивідуальних політик $\pi_i(\theta_i)$, які є оптимальними по відношенню до деяких концепцій рішення, наприклад, рівновага Неша, визначена нижче. Кожна індивідуальна політика $\pi_i(\theta_i)$ визначає дію, яку повинен здійснити агент i для кожного з його спостережень, а не тільки спостережень, які агент дійсно отримує після початку гри. Таке прогнозоване рішення гри необхідно, оскільки воно охоплює ідею інтерактивного мислення, що агент i може бути не впевненим в тому, що інший агент j вважає, що i буде грати після спостереження певного θ_i .

В залежності від типу моделі спостережень і платіжної функції існують різні моделі гри Басса. Наведемо дві такі моделі. Перша приймає платіжні функції визначеними через стани і об'єднані дії в формі $Q_i(s, a)$ і те, що кожен агент i має доступ до зворотної моделі спостережень, яка залежить від індивідуальних спостережень, в формі $p(s | \theta_i)$. У такій моделі рівновага Неша визначена, як рівновага нової стратегічної гри, в якій кожен гравець є парою (агент i , спостереження θ_i) і має платіжну функцію

$$u_i(\pi_i(\theta_i)) = \sum_s p(s | \theta_i) Q_i(s, [\pi_i(\theta_i), a_{-i}(s)]) \quad (2.26)$$

де $a_{-i}(s)$ є набором дій, здійснених усіма гравцями крім гравця (i, θ_i) в стані s .

Щоб дане твердження було можливо застосувати, кожен агент повинен мати можливість робити висновок з дії інших агентів в кожному стані. Для цього необхідно, щоб модель спостереження була загальними знаннями і щоб вона була детермінованою моделлю, де для кожного i спостереження θ_i є детермінованою функцією від s (наприклад, модель сприйняття, як в прикладі з хворими на гепатит В). В такому випадку політика $\pi_j(\theta_j)$ агента j єдиним чином ідентифікує його дію в s через $a_j(s) = \pi_j(\theta_j(s))$.

Друга модель гри Байеса не використовує стани. Замість цього вона приймає, що платіжні функції визначені через об'єднані спостереження і дії в формі $Q_i(\theta, a)$ і що гранична модель спостереження $p(\theta)$ доступна. В такому випадку рівновага Неша визначена так само, але (2.26) замінено на

$$u_i(\pi_i(\theta_i)) = \sum_{\theta_{-i}} p(\theta_{-i} | \theta_i) Q_i(\theta, [\pi_i(\theta_i), \pi_{-i}(\theta_{-i})]) \quad (2.27)$$

де тепер кількості $\pi_{-i}(\theta_{-i})$ доступні, а $p(\theta_{-i} | \theta_i)$ може бути розраховано з $p(\theta)$.

З другою моделлю гри простіше працювати, вона часто краща у порівнянні з першою.

В спеціальному випадку з n спільними агентами із загальною платіжною функцією $Q_1 = \dots = Q_n \equiv Q$ координація вимагає обчислення

ефективності по Парето рівноваги Неша. У другій моделі гри Баєса, описаній вище, така рівновага може бути обчислена, як наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Гра Баєса з загальними платіжними функціями, що включає два агента і бінарні дії і спостереження.

		θ_2		$\bar{\theta}_2$	
		a_2	\bar{a}_2	a_2	\bar{a}_2
θ_1	a_1	+0.1	+2.2	+0.4	-0.2
	\bar{a}_1	-0.5	+2.0	+1.0	+2.0
$\bar{\theta}_1$	a_1	+0.4	-0.2	+0.7	-2.6
	\bar{a}_1	+1.0	+2.0	+2.5	+2.0

Парето оптимальна рівновага Неша гри Баєса із загальною платіжною функцією $Q(\theta, a)$ є об'єднаною стратегією $\pi^* = (\pi_i^*)$, яка задовольняє

$$\pi^* = \arg \max_{\pi} \sum_{\theta} p(\theta) Q(\theta, \pi(\theta)). \quad (2.28)$$

З точки зору певного агента i , формула (2.28) читається:

$$\pi_i^* = \arg \max_{\pi_i} \sum_{\theta_i} p(\theta_i) \sum_{\theta_{-i}} p(\theta_{-i} | \theta_i) Q_i(\theta, [\pi_i(\theta_i), \pi_{-i}^*(\theta_{-i})]). \quad (2.29)$$

Сума аргументів максимальна, коли кожен з аргументів максимальний, тому вірно

$$\pi_i^*(\theta_i) = \arg \max_{\pi_i(\theta_i)} \sum_{\theta_{-i}} p(\theta_{-i} | \theta_i) Q_i(\theta, [\pi_i(\theta_i), \pi_{-i}^*(\theta_{-i})]), \quad (2.30)$$

що є ефективністю по Нешу (2.27). Це показує, що π^* є рівновагою Неша. В табл. 2.3 наведений приклад дваагентної гри Баєса з загальними платіжними функціями, де кожен агент i має дві можливі дії $A_i = \{a_i, \bar{a}_i\}$ і два можливі спостереження $\Theta_i = \{\theta_i, \bar{\theta}_i\}$. Припускаючи форму $p(\theta)$, можливо розрахувати з (2.28) Парето оптимальну рівновагу Неша $\pi^* = (\pi_1^*, \pi_2^*)$ гри

$$\pi_1^* : \pi_1^*(\theta_1) = \bar{a}_1, \pi_1^*(\bar{\theta}_1) = \bar{a}_1; \quad (2.31)$$

$$\pi_2^* : \pi_2^*(\theta_2) = \bar{a}_2, \pi_2^*(\bar{\theta}_2) = \bar{a}_2. \quad (2.32)$$

Це рішення дає кожному агенту очікуваний виграш.

2.5 Дослідження та реалізація інтелектуальної поведінки мультиагентної системи популяційної динаміки

Як показано в підрозділі 2.4, найбільш ефективними для реалізації мультиагентних систем з різними видами агентів є інтелектуальні агенти. Невдвлячись на дослідження в цій галузі, доступні засоби поки не дозволяють вільно використовувати елементи логічного програмування [135]. Якщо агенту відомо достатньо фактів про середовище, відповідний логічний підхід дозволяє йому формувати плани, які гарантовано будуть працювати. Така організація функціонування агента є дуже зручною. На жаль, агенти майже ніколи не мають доступу до всіх необхідних відомостей про навколишнє середовище [136]. Тому агенти повинні діяти в умовах невизначеності.

Отже, окремий інтерес при вивченні мультиагентного моделювання і інтелектуальної взаємодії агентів представляє розширення автономії агентів шляхом наділення їх здатністю до логічних висновків до інтелектуального прийняття рішень. Для формалізації механізму прийняття рішень в мультиагентному середовищі розглянемо приклад, описаний в підрозділі 2.4, що передбачає взаємодію інтелектуальних агентів в умовах невизначеності.

На основі методу розв'язання задачі, описаному в підрозділі 2.4, розроблено модифікований метод рішення задачі і сформульований алгоритм (рис. 2.6), розрахований на будь-яку кількість агентів.

Задається кількість агентів і для кожного агента встановлюється відповідний йому стан. Створюється світ, виходячи із заданої кількості агентів. Для кожного агента прораховуються розбиття і виділяються інформаційні множини на основі того, які стани мають інші агенти. Спостерігач вносить загальну інформацію, і гра починається. Послідовно кожному агенту задається питання про те, чи може він назвати свій стан.

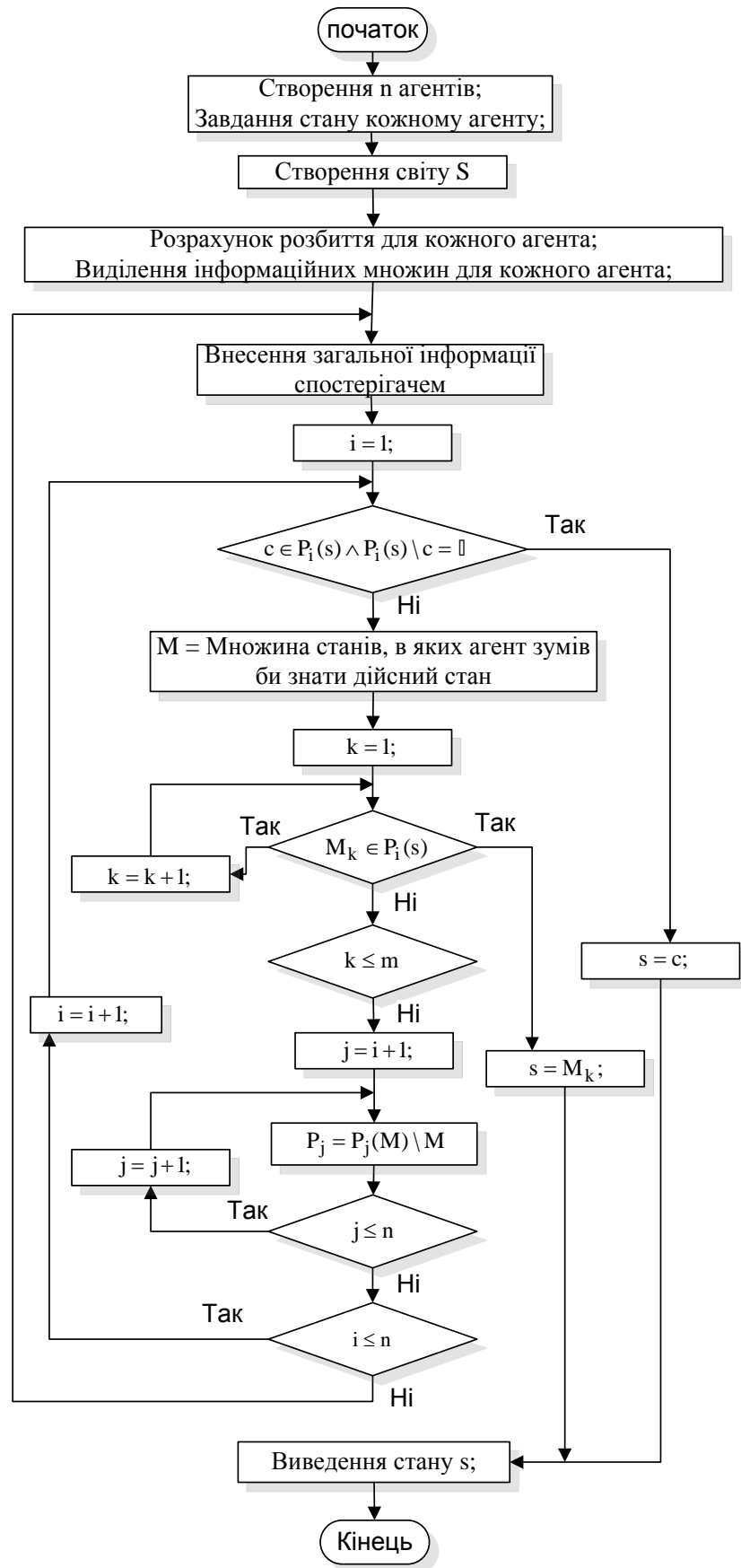


Рисунок 2.6 – Модифікований метод інтелектуальної взаємодії агентів, розрахований на будь-яку кількість агентів

В алгоритмі, описаному на рис 2.6, використано наступні позначення:

S – множина всіх станів (світ),

s – істинний стан,

P_i – розбиття для i -го агента,

$P_i(s)$ – інформаційна множина i -го агента,

n – кількість агентів,

i – лічильник по зовнішньому циклу агентів,

j – лічильник по внутрішньому циклу агентів,

M – множина станів, в яких агент міг би знати дійсний стан,

m – кількість станів в множині M ,

k – лічильник по множині M ,

c – будь-який стан з множини S .

При цьому кожен агент, дочекавшись своєї черги, здійснює наступну послідовність дій:

1. Перевірка очевидності відповіді. Якщо в інформаційній множині присутній тільки один стан, саме він і є дійсним. В іншому випадку перехід до кроку 2.

2. Пошук станів, в яких агент точно міг би відповісти на питання про свій стан.

3. Перегляд всіх знайдених станів. Якщо стан входить в інформаційну множину, тоді цей стан є дійсним і агент каже, що може назвати свій стан. В іншому випадку, перехід до кроку 4.

4. Якщо жоден зі знайдених станів не входить в інформаційну множину агента, тоді він не може визначити свій стан. Агент виключається з розгляду, а агенти, чия черга ще не настала, відсікають стани, знайдені поточним агентом.

5. Перехід до наступного агента.

Проведено порівняльний аналіз продуктивності початкового і модифікованого методів розв'язання задачі. Як видно з графіка на рис. 2.7, модифікований метод володіє вищою продуктивністю внаслідок зменшення

кількості необхідних операцій. В даному випадку під однією операцією будемо розуміти операцію читання елемента з масиву або видалення елемента з масиву. Не беруться до уваги набори операцій, що притаманні обом алгоритмам.

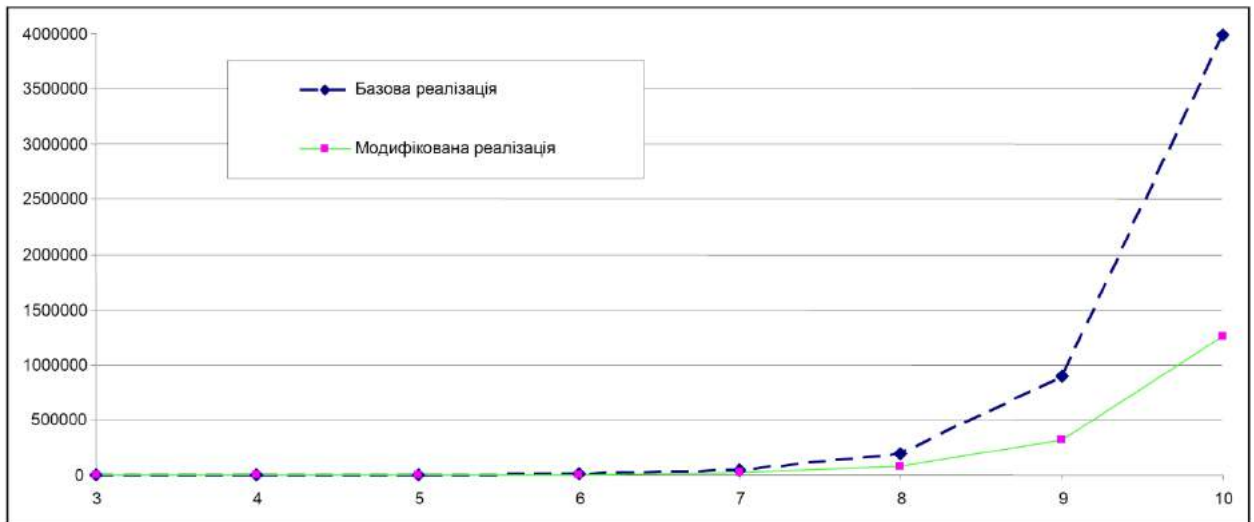


Рисунок 2.7 – Графіки продуктивності базового і модифікованого методів

Розроблений метод реалізовано на мові Prolog, а за допомогою середовища NetLogo забезпечено мультиагентний підхід. Для забезпечення взаємодії між NetLogo і Prolog реалізовано за допомогою розширення для NetLogo, яке написано на мові Java і створене спеціально для цієї задачі. Розширення містить в собі реалізацію трьох операторів NetLogo:

```
import org.nlogo.api.*;
public class RationalAgents extends DefaultClassManager {
    public void load(PrimitiveManager primitiveManager)
    {
        primitiveManager.addPrimitive("start_prolog", new StartEngine());
        primitiveManager.addPrimitive("answer", new Answer());
        primitiveManager.addPrimitive("get_possible_states", new
        GetPossibleStates());
    }
}
```

Клас Answer приймає всю необхідну для логічного виводу інформацію, обробляє об'єкти з NetLogo і формує запит до Prolog. На виході повертає

відповідь від Prolog. Клас `GetPossibleStates` повертає стани, які будуть відсікатися у інших агентів, якщо поточний агент не зможе дізнатися про свій стан. Крім того, існує клас `PrologClass`, що приймає запити відповідно до вимог Prolog, виконує запити, після чого робить обробку відповідей, приводячи їх до виду, необхідному для передачі їх в NetLogo.

Після створення програми на Prolog і розширення, необхідного для роботи з ним, впливає етап реалізації методу в NetLogo, яка робить всі необхідні підготовчі роботи (генерування світу для зазначеної кількості агентів, визначення інформаційних множин тощо), а також забезпечує візуальне відображення процесу розв'язування задачі. Інтерфейс розробленого програмного продукту представлено на рис. 2.8.

Таким чином, розроблений механізм інтеграції мови Prolog і середовища NetLogo дозволяє розв'язувати задачі інтелектуального прийняття рішень в мультиагентному середовищі з використанням бази знань на базі логіки предикатів. Використання запропонованого механізму показано на прикладі розв'язання задачі прийняття рішень агентами в умовах невизначеності. На прикладі розробленого модифікованого методу виявлено можливості підвищення ефективності логічного виводу в мультиагентному середовищі.

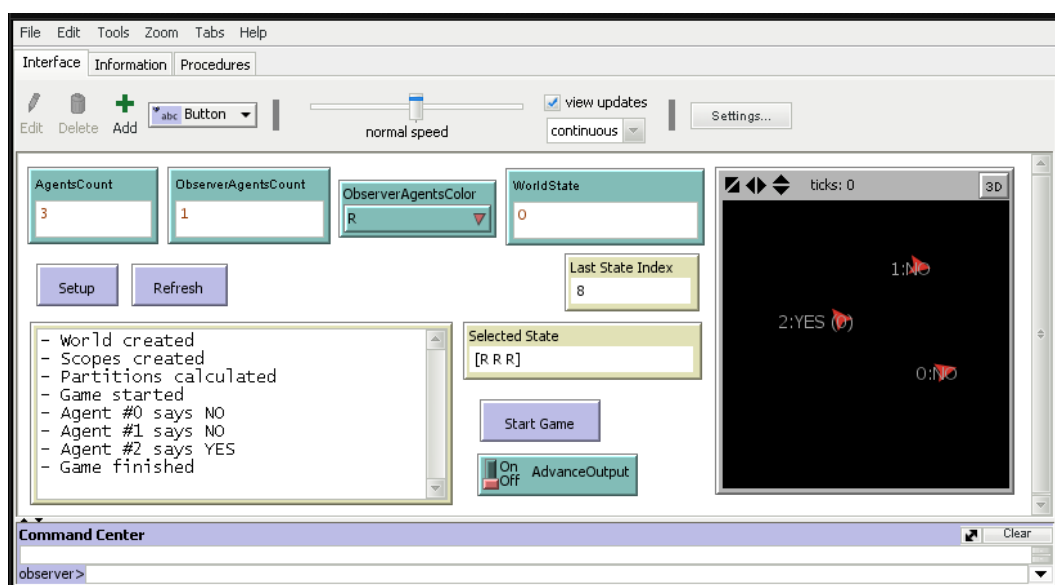


Рисунок 2.8 – Програмна реалізація методу

2.6 Експериментальне дослідження інтелектуального мультиагентного підходу до прогнозування епідемічних процесів

2.6.1 Налаштування моделі

Перевірку моделі природно провести на реальних статистичних даних про епідемічний процес. Для проведення експериментів вибрано захворюваність на вірусний гепатит В та його статистичні дані по Харківській області з 1994 по 2016 рр.

Вірусний гепатит В – це антропонозна інфекція, джерелом якої може бути хвора людина з різною виразністю клінічних симптомів і вірусоносій [137]. При побудові моделі враховувалася тривалість інкубаційного періоду, періоду розпалу клінічних проявів і реконвалесценції, тривалість носійства. Враховувалися основні шляхи передачі вірусу.

Дані для проведення експериментальних досліджень надано Державною установою «Харківський обласний лабораторний центр Міністерства охорони здоров'я України», яка веде нагляд за епідемічним процесом, розробляє та впроваджує профілактичні та протиепідемічні заходи для зменшення рівня захворюваності. Статистичні дані епідемічного процесу вірусного гепатиту В включали помісячну захворюваність по Харківській області з 1994 по 2016 роки. З 1994 по 2009 рр. захворюваність розподілялася на наступні вікові групи: діти до двох років, діти від 3 до 6 років, діти від 7 до 14 років, підлітки від 14 до 18 років, дорослі від 19 до 30 років, дорослі від 31 до 40 років, дорослі від 41 до 50 років, дорослі від 51 до 60 років, дорослі старші 61 року.

Також з 1994 по 2009 рр. дані включали передбачувані шляхи зараження: природний, статевий, побутовий, вертикальний, через медичні втручання, через наркотичні ін'єкції, через маніпуляції поза лікувально-профілактичними закладами. В свою чергу дані про парентеральний шлях зараження через медичні втручання розділися на ін'єкції, переливання крові,

хірургічні маніпуляції, гінекологічні маніпуляції, забір крові на лабораторний аналіз і стоматологічну допомогу.

Всі дані розділялися на абсолютні показники, тобто реальну кількість хворих, та інтенсивні показники, тобто захворюваність на 100 тис. населення. З 2009 по 2016 рр. статистичні дані були надані без розділення на вікові групи та передбачувані шляхи зараження. Це пов'язано із зміною стандартів Міністерства охорони здоров'я України про збір даних про захворюваність.

Враховуючи структуру отриманих даних і специфіку розповсюдження епідемічного процесу, було проведено налаштування розробленої інтелектуальної мультиагентної моделі. Були враховані вікові та соціальні групи, додано умови, що агенти є повнолітніми і взаємодія відбувається не в області «Лікарня», тому що передача збудника від людини до людини найчастіше здійснюється статевим шляхом.

Для моделювання епідемічного процесу вірусного гепатиту В було вибрано структуру популяції агентів, представлену на рис. 2.9 [138], де показано також переходи між станами.

$$S = \{\text{Susceptible, Exposed, Infected, Convalescent, Recovered, Dead}\}. \quad (2.33)$$

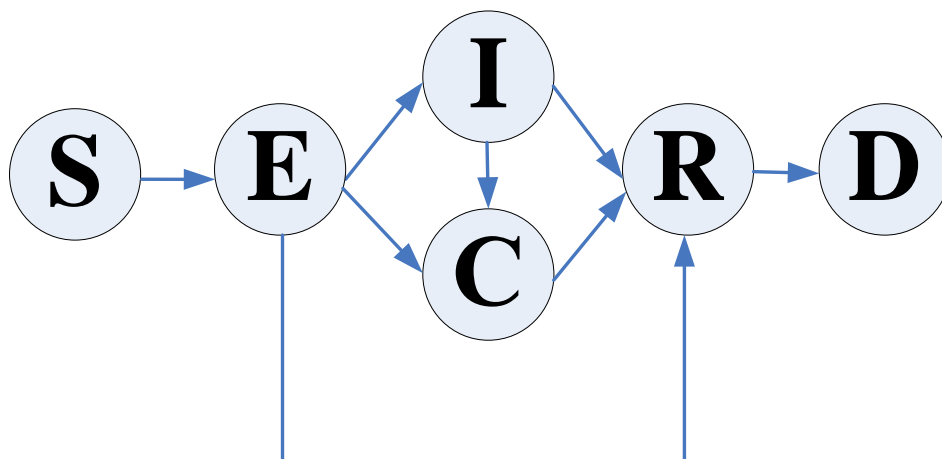


Рисунок 2.9 – Перехід між станами при моделюванні епідемічного процесу вірусного гепатиту В

Вектор ймовірностей \bar{P} , який був використаний для налаштування інтелектуальної мультиагентної моделі розповсюдження вірусного гепатиту В, описаний в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Перелік ймовірностей, використаних для перевірки адекватності моделі

Опис	Значення, %
Ймовірність зараження	1,0
Знижена ймовірність зараження	0,5
Ймовірність виявлення захворювання	5,0
Ймовірність статевого контакту	5,0
Ймовірність випадкової передачі	1,0

2.6.2 Перевірка точності прогнозу

Точність побудови прогнозу виконано порівнянням зі статистикою щодо захворюваності на вірусний гепатит В в Харківській області за абсолютними (рис. 2.10) та інтенсивними (рис. 2.11) показниками. По осі абсцис розташовані роки, по осі ординат – показники. Червона суцільна лінія – статистичні дані, синя переривчаста – розрахований побудованою моделлю прогноз [139].

Показники точності розрахованої за допомогою розробленої інтелектуальної мультиагентної моделі прогнозу інтенсивної захворюваності на вірусний гепатит В наведена в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Показники точності побудованої моделі.

Середня абсолютна похибка	2,94%
Середньоквадратична похибка	0,017
Середня похибка	-0,54
Стандартна похибка	0,12
Середнє відхилення	1,95%

Таким чином, точність побудованого прогнозу становить 97,06 %.

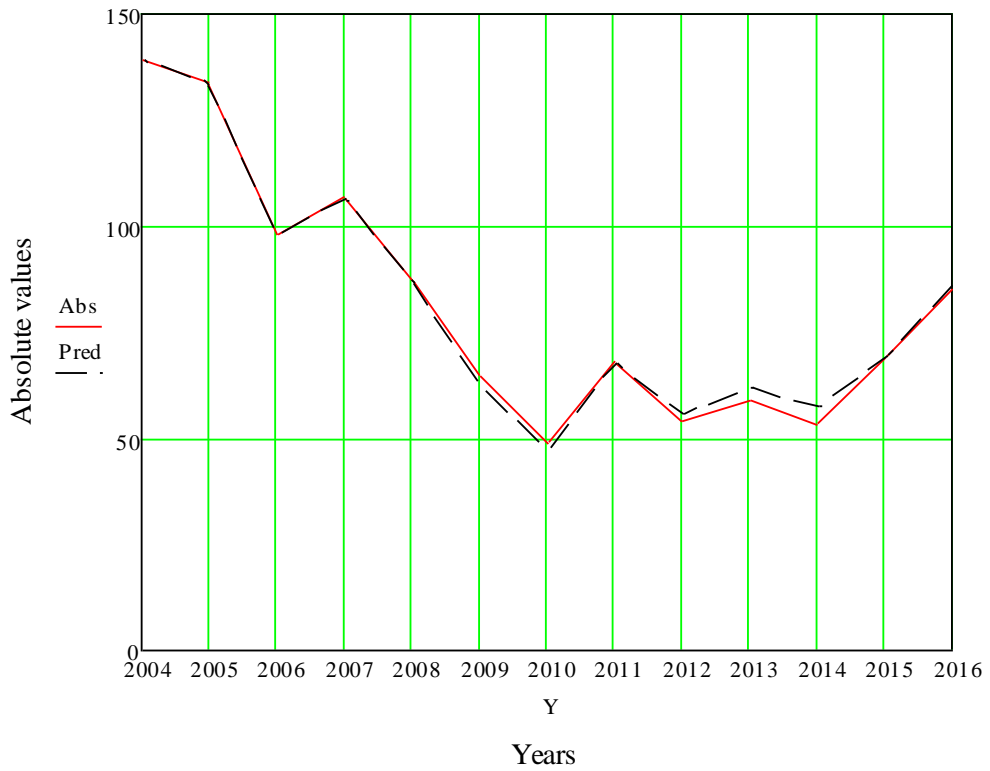


Рисунок 2.10 – Порівняння абсолютних показників щодо захворюваності на вірусний гепатит В в Харківській області та побудованого прогнозу

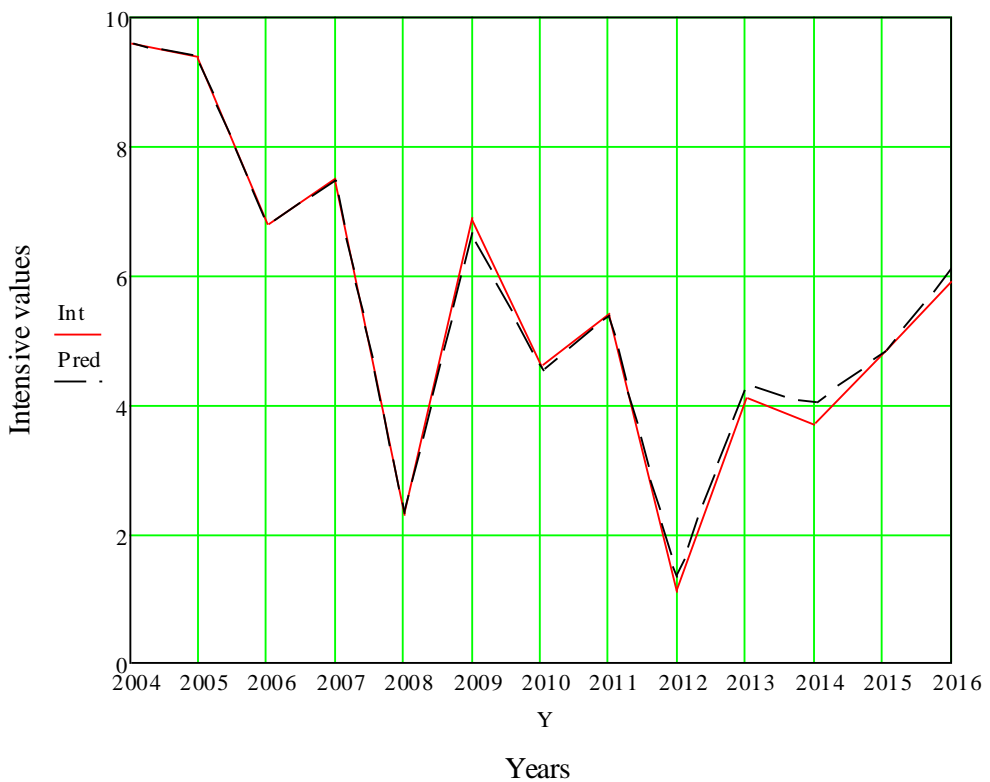


Рисунок 2.11 – Порівняння інтенсивних показників щодо захворюваності на вірусний гепатит В в Харківській області та побудованого прогнозу

Висновки до другого розділу.

1. Вперше 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.

2. Розроблено універсальну інтелектуальну мультиагентну модель динаміки розповсюдження епідемічних процесів систем популяційної динаміки. 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. Перевагою такої побудови моделі, є легкість в удосконаленні та ускладненні структури, що моделюється. Без змін уже визначених патернів моделювання, можна додати нові керуючі параметри, значно ускладнити і розширити область, що досліджується, а також перейти на вищий або нижчий рівні абстракції.

3. Розроблено структуру інтелектуальних раціональних агентів, що функціонують в умовах логічної невизначеності, яка на відміну від існуючих враховує знання агентів в заданих умовах, що дозволяє одержати довгостроковий прогноз динамічної системи. Розроблено політику агентів, їх інтелектуальне прийняття рішень та оптимальні дії в залежності від бази знань.

4. 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. Знайдено Парето оптимальну рівновагу Неша для гри Байеса для інтелектуальних агентів.

5. 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.

6. Проведено експериментальні дослідження універсальної інтелектуальної мультиагентної системи епідемічних процесів. Налаштування моделі показано 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 області. Точність побудованого прогнозу становить 97,06 %.

Основні результати розділу опубліковано в працях [1, 4–6, 9–11, 14–16, 20–21, 23–26].

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОПУЛЯЦІЙНОЇ ДИНАМІКИ МЕТОДОМ НЕЧІТКИХ РЕКУРЕНТНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ

3.1 Дослідження стійкості інтелектуальної моделі популяційної динаміки

Ефективна модель забезпечує точний результат з малими відхиленнями протягом тривалого періоду часу. Дані три параметри повинні бути присутніми в будь-якій системі, що моделює динамічні процеси. Багато моделей забезпечують високі результати, але тільки на короткий проміжок часу. Іншим це вдається лише при наявності дуже обмеженого набору вихідних припущень, що може бути чистим збігом обставин. Модель, яка заслуговує на серйозну увагу, повинна бути стійкою в тому сенсі, що вона забезпечує однаково високі результати при різноманітних умовах і протягом різних періодів часу.

Розглянемо популяцію динамічної системи. Необхідно дізнатися як кількість особин N_{k+1} $(k+1)$ -го року пов'язана з кількістю особин N_k k -го року. В найпростішому випадку можливо припустити

$$N_{k+1} = A \cdot N_k \quad (3.1)$$

де A – деяке число, що залежить від умов навколишнього середовища.

Якщо $A > 1$, то чисельність популяції буде зростати; якщо $A < 1$, чисельність буде зменшуватися.

Розглянемо більш реалістичне обмеження. Зростання населення обмежене. Можемо включити цю граничну особливість, додавши ще одну змінну до моделі, яка буде зневажливо малою при малих значеннях N , але стає більш важливою з ростом N . Один з можливих способів це зробити – ввести член, пропорційний до N^2 , що призведе до

$$N_1 = A \cdot N_0 - B \cdot N_0^2. \quad (3.2)$$

Якщо B значно менше за A , тоді другий доданок в (3.2) не буде мати значення до тих пір, поки N не стане достатньо великим. Знак мінус означає, що другий член має тенденцію до зменшення чисельності населення. На наступному кроці використаємо рівняння (3.2), щоб знайти, як змінюється N в наступні роки

$$\begin{aligned} N_2 &= A \cdot N_1 - B \cdot N_1^2, \\ N_3 &= A \cdot N_2 - B \cdot N_2^2, \\ &\dots \\ N_{k+1} &= A \cdot N_k - B \cdot N_k^2. \end{aligned} \quad (3.3)$$

В цьому випадку максимально можлива кількість популяції становить

$$N^{max} = A/B. \quad (3.4)$$

Введемо поняття частки максимально можливої популяції

$$x_k = N_k / N^{max}. \quad (3.5)$$

Підставивши (3.5) в (3.1), отримаємо

$$x_{n+1} = Ax_n(1 - x_n) = f_A(x_n), \quad (3.6)$$

де x_n – це популяція в n -ому році.

Наступним кроком є перевірка інтелектуальної мультиагентної моделі епідемічних процесів на стійкість. Для цього дослідимо налаштовану в підрозділі 2.6 модель захворюваності на гепатит В. Оскільки модель не є лінійною та не представлена математичними залежностями, а вихідні дані моделі є результатом взаємодії інтелектуальних агентів один з одним та з зовнішнім середовищем, перевірку системи на стійкість природно провести дослідженням залежності зміни вихідних результатів Δy від зміни вхідних параметрів Δx . В результаті проведених експериментів було виявлено незначні відмінності в результаті моделі, а саме

$$f(\Delta x) = \Delta y = 0,57\%. \quad (3.7)$$

Для більш глибокого дослідження системи на хаотичну динаміку пропонується представити систему в формі нечітких лінгвістичних правил та дослідити її на хаотичність в розумінні Лі-Йорке.

3.2 Застосування нечітких правил до опису епідемічних процесів

Дослідники епідемічних динамічних систем стикаються з низкою перешкод при спробі перевірити свої моделі, зокрема, через невизначеності, пов'язані зі змінними, граничними умовами, початковими станами та значеннями параметрів і т.п. В ідеалі вони повинні бути взяті з фактичних даних про динамічну систему й аналізу цих даних експертами, але реально для дослідження доступні тільки дані про зареєстровані процеси, крім того, такі дані демонструють розпливчастість у визначенні таких понять, як фактори ризику, небезпека, сила впливу, контактні шаблони або статус інфікованості [140]. Таким чином, можливим альтернативним підходом може бути комбінація методів нечіткої логіки і нелінійних динамічних систем з метою забезпечення всебічного аналізу і розробки інструментів прогнозування в динамічних системах з епідемічним характером.

Нечіткі динамічні системи є відносно новою сферою досліджень, основна ідея яких полягає в тому, щоб розширити стандартну динамічну систему, змодельовану за допомогою диференціальних рівнянь або іншого підходу до теоретичних рамок нечіткої множини. Ці методи дозволяють враховувати невизначеності, пов'язані зі змінними, параметрами, граничними умовами та початковими станами і моделювати їхню еволюцію, дотримуючись основних правил і закономірностей динаміки системи.

Нечіткі моделі, засновані на правилах, являють собою системи, чий змінні описуються нечіткими множинами, а не чіткими числами. Вони засновані на концепції нечіткого розбиття інформації і можуть бути класифіковані у дві загальні групи залежно від того, як подана інформація: 1) лінгвістичні моделі, у яких найбільш відомим прикладом є модель типу Мамдані, і 2) модель Такагі – Сугено. Обидві моделі засновані на використанні нечітких правил і лінгвістичних змінних. Проте лінгвістичні моделі є якісним описом поведінки системи з використанням природної

мови, а моделі Такагі – Сугено – комбінацією нечітких і стандартних структур.

Успішним застосуванням нечіткої лінгвістичної моделі в моделюванні контролерів показано, що це найбільш прикладна структура. Нечітка лінгвістична модель заснована на наближених міркуваннях, які забезпечують основу для побудови гіпотез з неточною інформацією за допомогою адекватних механізмів логічного виводу [141]. Дана модель може бути визначена як експертна система, тому що вона має у собі базу знань і механізм логічного виводу, обидва з яких ґрунтуються на експертних знаннях людини. Більшість нечітких додатків засновані на нечітких лінгвістичних системах. Вони широко використовуються в розробці нечітких контролерів медичних апаратів, оцінюванні ризику і в діагностичних системах [142 – 145]. У дослідженнях епідемічних процесів також існує кілька нечітких лінгвістичних систем [146, 147].

Нечіткі моделі, засновані на правилах, мають просту структуру і складаються з чотирьох основних компонентів: 1) модуль фаззифікації, який переводить чіткі входи (класичні вимірювання) в нечіткі значення за допомогою лінгвістичних змінних; 2) нечітка база правил If-Then, яка складається з набору умовних нечітких суджень; 3) метод логічного виводу, який застосовує нечіткі механізми для отримання результатів або, іншими словами, спосіб обчислення з нечіткими правилами; 4) модуль дефаззифікації, який переводить нечіткі виходи назад до чітких значень, якщо це необхідно. Схема типової нечіткої моделі, заснованої на правилах, і взаємозв'язок її модулів показані на рис. 3.1.

В роботі [148] була запропонована структура для вирішення систем лінійних диференціальних рівнянь для одного класу нечітких множин, заснована на α -рівні. Проте запропоновані методи складно застосовувати в динамічних системах з епідемічним характером, оскільки такі моделі мають очевидні нелінійності і повинні бути розглянуті інакше. Ці нелінійності зумовлені тим, що перебіг епідемічного процесу динамічної системи

залежить, крім усього іншого, від частки людей, що знаходяться в різних станах, які за своєю природою невизначені і, отже, є ідеальними об'єктами для аналізу за допомогою нечіткої логіки.

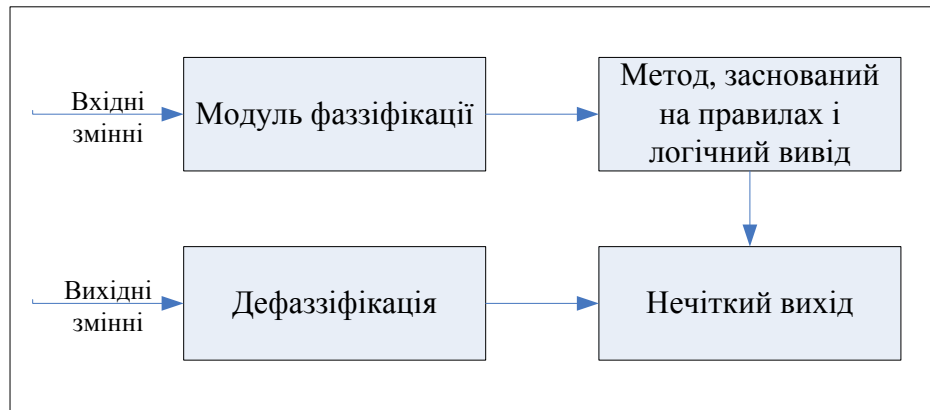


Рисунок 3.1 – Схема типової нечіткої лінгвістичної моделі.

В роботах [149, 150] запропоновано новий підхід до описування динаміки екологічної моделі в диференціальних рівняннях, що відтворює динамічну систему з використанням нечітких параметрів. У цьому випадку рішенням системи рівнянь є так зване нечітке очікуване значення. Застосування цього підходу в епідеміологічних системах не є очевидним тому, що деякі деталі і параметри можуть трактуватися неоднозначно. Незважаючи на це, даний метод є можливим способом змоделювати епідемічну систему більш реалістично.

Обидва підходи мали деякі теоретичні труднощі, у зв'язку з якими, враховуючи особливості математики нечіткої логіки, складно показати ефективні практичні результати. Для того щоб дослідити, наскільки нечітка логіка може описувати динаміку епідеміологічних систем більш реалістичним способом, у даному дисертаційному дослідженні розглянуто лінгвістичну нечітку модель, що застосована до мультиагентної моделі, описаній у 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 таку форму:

$$\begin{aligned}
 & \text{IF } U = B_1 \text{ AND } W_1 = A_{11} \text{ AND } \dots \text{ AND } W_n = A_{1n} \\
 & \text{THEN } \bar{W}_1 = \hat{A}_{11} \text{ AND } \dots \text{ AND } \bar{W}_n = \hat{A}_{1n} \text{ AND } V = D_1 \\
 & \text{IF } U = B_2 \text{ AND } W_1 = A_{21} \text{ AND } \dots \text{ AND } W_n = A_{2n} \\
 & \text{THEN } \bar{W}_1 = \hat{A}_{21} \text{ AND } \dots \text{ AND } \bar{W}_n = \hat{A}_{2n} \text{ AND } V = D_2 \\
 & \dots \\
 & \text{IF } U = B_m \text{ AND } W_1 = A_{m1} \text{ AND } \dots \text{ AND } W_n = A_{mn} \\
 & \text{THEN } \bar{W}_1 = \hat{A}_{m1} \text{ AND } \dots \text{ AND } \bar{W}_n = \hat{A}_{mn} \text{ AND } V = D_m,
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

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.

У зв'язку з цим, вибираючи відповідний метод логічного виводу і, за необхідності метод дефаззифікації, на кожному кроці після запуску моделі розраховується значення змінної стану, яке буде вхідним параметром системи на наступному кроці, і так далі, ітеративно.

Звідси випливає таке:

$$U(l+1) = V(l), \tag{3.9}$$

$$W_i(l+1) = \bar{W}_i(l), \tag{3.10}$$

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 такий вигляд:

$$\text{IF } U(l) = B_m \text{ AND } W_1(l) = A_{m1} \text{ AND } \dots \text{ AND } W_n(l) = A_{mn} \quad (3.11)$$

$$\text{THEN } y(l+1) = f(U(l), W_1(l), \dots, W_n(l));$$

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

Розробка нечітких моделей з експертами в різних галузях вимагає міждисциплінарних відносин [151]. Для правильного застосування знань експертів важливим є побудова ними нечітких множин. У загальному вигляді нечіткі множини епідеміологічних систем, побудовані експертами, не показують правильної поведінки. Вони мають тенденцію до асиметричної і нерегулярної динаміки, що відрізняється від поведінки нечітких множин в інженерних галузях. Крім того, у експертів існують проблеми з розумінням природи системної динаміки, правил поведінки і, як наслідок, моделі в цілому [152]. Крім того, створення слідств із правил поведінки є більш трудомісткою задачею для експерта, ніж аналіз минулої статистики динамічної системи, тому що експерт повинен вивчити питання щодо динаміки системи, враховуючи всі чинники і сформулювавши конкретну залежність, що відповідає функції належності. Крім того, щоб проводити аналіз минулої статистики, яка може впливати на подальшу поведінку динамічної системи, експерту достатньо класифікувати змінні функції належності. Тому в цілому експерт має більше можливостей для розробки передумов до розвитку епідемічного процесу, ніж наслідків.

Враховуючи дані особливості, метод, що дозволяє розробляти апостеріорні лінгвістичні правила, може означати важливий прогрес у моделюванні динамічних систем, які мають високий рівень невизначеності, неточності або неясності у визначенні змінних і параметрів. Крім того, необхідно врахувати, що епідемічні системи – динамічні, неавтономні і відкриті і, отже, мають можливості до вводу–виводу досить великих обсягів даних для побудови гібридних моделей вкрай рідко.

Таким чином, можна формалізувати нечітке рекурентне відображення [153], 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 τ і майбутній t моменти часу:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_N \end{pmatrix}_t = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ r_N \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_N \end{pmatrix}_\tau, \quad (3.12)$$

Набори правил (1) мають вигляд

$$r_i : \left\{ \begin{array}{l} \text{IF } x_1 = A_1^1 \text{ AND } x_2 = A_2^1 \dots \\ \left[\text{AND } x_k = A_k^1 \right] \dots x_N = A_N^1 \quad \Big|_\tau \\ \text{THEN } x_i = B^1 \Big|_t \\ \\ \text{IF } x_1 = A_1^2 \text{ AND } x_2 = A_2^2 \dots \\ \left[\text{AND } x_k = A_k^2 \right] \dots x_N = A_N^2 \quad \Big|_\tau \\ \text{THEN } x_i = B^2 \Big|_t \\ \\ \dots \dots \dots \\ \text{IF } x_1 = A_1^{K_i} \text{ AND } x_2 = A_2^{K_i} \dots \\ \left[\text{AND } x_k = A_k^{K_i} \right] \dots x_N = A_N^{K_i} \quad \Big|_\tau \\ \text{THEN } x_i = B^{K_i} \Big|_t \end{array} \right. , \quad (3.13)$$

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

Нескладно показати, що кількість правил набору знаходиться в діапазоні

$$0 \leq K_i \leq \prod_{i=1}^N \text{card}(S(x_i)), \quad (3.14)$$

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

Аналіз динамічних лінгвістичних систем, що подані в загальній формі (3.12), (3.13), досить скрутний, зважаючи на високі розмірності простору станів і нелінійного імплікативного характеру взаємозв'язку подій, що переводять систему з одного стану в інший. У зв'язку з цим актуальним є

знаходження такої форми опису динаміки процесу, яка дозволяла б вирішувати задачі аналізу і синтезу формальними методами. Зазвичай на практиці застосовують лінгвістичний опис у вигляді правил

$$\text{IF } X_k=(x_1=nb, x_2=pm, \dots, x_n=ze) \text{ AND } U_k=(u_1=pm, u_2=nb, \dots, u_m=nm), \quad (3.15)$$

$$\text{THEN } X_{k+1}=(x_1=pb, x_2=ps, \dots, x_n=pb),$$

що відображають відношення зміни стану системи залежно від вхідних впливів

$$X_{k+1}=X_k \circ U_k, \quad (3.16)$$

де $X_k=(x_1, x_2, \dots, x_n)_k$ – узагальнений вектор стану системи, а $U_k=(u_1, u_2, \dots, u_m)_k$ – узагальнений вектор керуючих впливів, значення яких являють собою лінгвістичні змінні з заданої терм-множини $S=\{nb, nm, \dots, ze, \dots, pm, pb\}$, де *nb* – *negative big*, *nm* – *negative middle*, *ze* – *zero*, *pm* – *positive middle*, *pb* – *positive big* – нечіткі множини з заданими функціями належності [154].

Відношення (3.16) можна представити у вигляді мережі переходів (рис. 3.2) узагальнених лінгвістичних станів (вершин графа) під дією узагальнених лінгвістичних керуючих впливів (ребра графа). Якщо N – розмірність вектора стану X , P – розмірність вектора управління U , M – потужність терм-множини лінгвістичних змінних S , то максимально можлива кількість вершин мережі (станів системи) дорівнює $M \cdot N$, а кількість дуг, що з'єднують ці вершини (керуючих впливів), – $M \cdot N \cdot (MN - 1) / 2 \cdot MP$.

Аналіз подібних систем на основі імітаційного моделювання і синтез оптимальних правил (значення ребер мережі) становлять комбінаторну проблему.

На практиці замість загального вигляду відображення (3.16) використовують його окремі форми, коли вектори X , Y , U є скалярними лінгвістичними змінними. У разі, коли консеквенти правил є лінгвістичними, розглянута модель являє собою модель Мамдані, якщо функціональними, – модель Сугено [155].

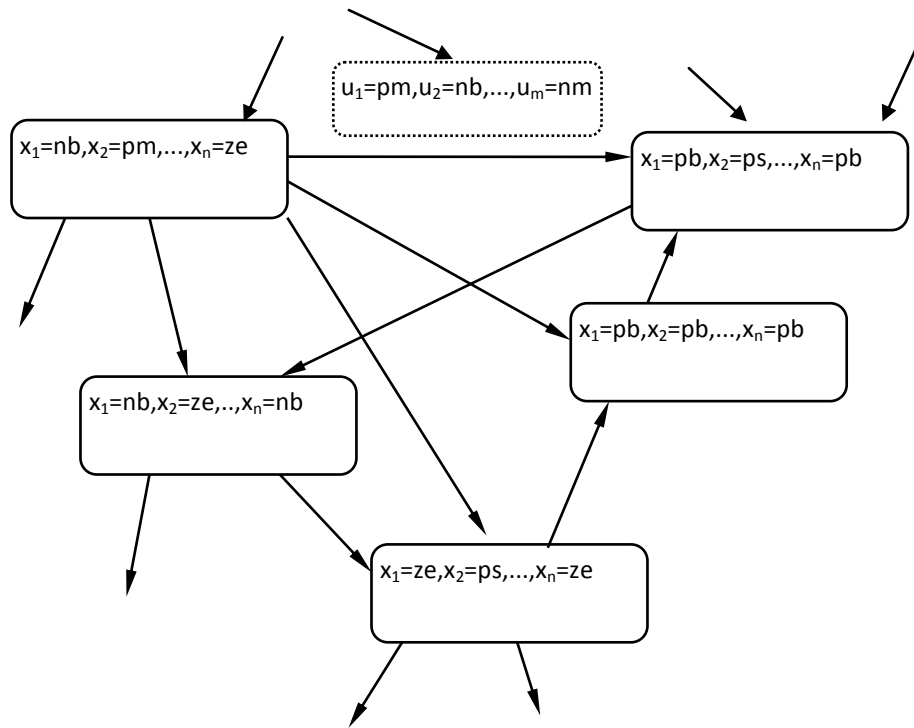


Рисунок 3.2 – Граф переходів рекурентної нечіткої системи.

Як правило, динамічна поведінка таких систем описується у вигляді таблиць лінгвістичних правил, що зв'язують керуючі впливи U і виходи (або стани) об'єкта X . Приклад такого відображення поданий в табл. 3.1.

Основна проблема аналізу моделі (3.16) – відсутність формальних методів у просторі лінгвістичних станів, аналогічних числовим моделям і методам аналізу і синтезу в евклідовому просторі станів, що ускладнює розв'язання задач аналізу стійкості динамічної моделі, синтезу оптимальних систем управління та інших задач. Відомі методи аналізу нечітких динамічних систем засновані або на дослідженні функцій належності нечітких множин, або на аналізі переходів у просторі станів, що розширюється, або на евристичних методах лінгвістичної динаміки [156]. Крім того, суттєвим є розмірність набору лінгвістичних правил, при якому число можливих правил експоненціально збільшується з числом вхідних величин.

Таблиця 3.1 – Таблиця лінгвистичних правил $X_{k+1} = X_k \mathcal{U}_k$

$U_k \backslash X_k$	nb	nm	ze	pm	Pb
nb	nb	nb	nb	nm	Ze
nm	nb	nb	nm	ze	Pm
ze	nb	nb	ze	pb	Pb
pm	nm	ze	pm	pb	Pb
pb	ze	pm	pb	pb	Pb

Складність опису епідемічних процесів динамічних систем, наявність евристичних алгоритмів фаззифікації і дефаззифікації, а також використання нечітких множин і лінгвистичних змінних приводять до необхідності розробки нових методів аналізу подібних систем.

3.3 Оцінка тривалості прогнозу моделі з точки зору хаотичної динаміки

В математиці добре відомі апроксимаційні властивості моделі нечітких рекурентних моделей, зокрема, моделей Такагі-Сугено (ТС). Розглянемо властивості динамічних моделей ТС нульового порядку, що визначають їхню хаотичну поведінку.

Історично Лі і Йорке першими дали визначення хаосу [157]. Вони розглядали відображення $f : I \rightarrow I$ (де I – одиничний інтервал) типу

$$x_{n+1} = f(x_n). \quad (3.17)$$

Визначення 1. (Лі–Йорке) [158]. Відображення $f : I \rightarrow I$ є хаотичним, якщо:

1) існує додатне число K , таке, що ітераційна схема (3.17) має цикл періоду k для будь-якого $k > K$;

2) ітеративна схема (3.17) має таку «нестійку» множину (scrambled set) $S \subset I$, яка є незліченною і не містить циклічних точок у f , а також має властивості:

$$- f(S) \subset S,$$

$$- \text{для кожного } x_0, y_0 \in S \text{ при } x_0 \neq y_0,$$

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} |f^n(x_0) - f^n(y_0)| > 0,$$

$$- \text{для кожного } x_0 \in S \text{ і циклічної точки } y_0 \text{ для } f$$

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} |f^n(x_0) - f^n(y_0)| > 0;$$

3) існує незліченна підмножина $S_0 \subset S$, така, що для всіх $x_0, y_0 \in S_0$,

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} |f^n(x_0) - f^n(y_0)| = 0.$$

Теорема 1. (Лі–Йорке) [157]. Якщо функція $f : I \rightarrow I$ є безперервною на компактній I і існує така точка $a \in I$, для якої виконується $f^3(a) \leq a < f(a) < f^2(a)$ (або $f^3(a) \geq a > f(a) > f^2(a)$), то f має цикл довжиною три і є хаотичним відображенням.

Наступна теорема визначає достатні умови існування хаосу в банаховому просторі.

Теорема 2. (Клоєден) [158]. Нехай $f : I \rightarrow I$ – безперервне відображення банахова простора I в себе і нехай існують непусті компактні підмножини A і B з I , а також цілі числа $n_1, n_2 \geq 1$, такі, що:

1) A гомеоморфне опуклій підмножині з I ,

2) $A \subseteq f(A)$,

3) f є відображенням на A розширюється, тобто існує така константа $\lambda > 1$, що

$$\lambda \|x - y\| \leq \|f(x) - f(y)\|$$

для всіх $x, y \in A$,

4) $B \subset A$,

5) $f^{n_1}(B) \cap A = \emptyset$,

$$6) A \subseteq f^{n_1+n_2}(B),$$

7) $f^{n_1+n_2}$ ін'єктивна на B (один-до-одного).

Тоді відображення f хаотичне в сенсі визначення 1 (за умови, що I – Банаховий простір).

У першу чергу необхідно з'ясувати:

- чи можуть нечіткі рекурентні моделі бути хаотичними;
- як розпізнати хаотичну поведінку за структурою моделі ТС?

Розглянемо рішення цих задач в цьому підрозділі.

Динаміку моделі ТС нульового порядку в скалярному випадку можна представити у вигляді

$$\begin{aligned} R_1: & \text{ If } x_k = L_1 \text{ then } x_{k+1} = A_1, \\ R_2: & \text{ If } x_k = L_2 \text{ then } x_{k+1} = A_2, \\ & \dots \\ R_N: & \text{ If } x_k = L_N \text{ then } x_{k+1} = A_N, \end{aligned} \tag{3.18}$$

де L_i – лінгвістичні змінні (терми), A_i – числові коефіцієнти.

У сучасних дослідженнях моделей ТС превалюють такі найбільш загальні обмеження:

- 1) повна база знань (3.18);
- 2) несуперечливий набір правил;
- 3) однокрокова часова затримка;
- 4) скалярне відображення – SISO.

Функції належності лінгвістичних термів мають, як правило, такі обмеження:

- 1) обмеженість $\mu(x) \in [0,1], x \in X$;
- 2) опуклість $\mu(x)$ зі зростаючою (спадною) гілкою для $x > (<) s^x$ – центри функцій належності;
- 3) розділення $\sum_j \mu_j(x_i) > 0, x_i \in X_i$;
- 4) зворотна відповідність $\mu_i(s_j) = 0, i \neq j$.

Перехідна функція відображення (3.17) може бути записана у вигляді

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i(x) \cdot A_i}{\sum_{i=1}^N \mu_i(x)}$$

або з урахуванням наведених обмежень для повної бази знань

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \mu_i(x) \cdot A_i$$

Тоді можна дослідити орбіти

$$x_{k+n} = f^n(x_k) = f(f(f\dots(x_k))) \quad (3.19)$$

За умови $A_i \in \{L_1, L_2, \dots, L_N\}$ (модель Мамдані) рекурентна нечітка система може розглядатися як лінгвістичний автомат, в якому $L(0), L(1), \dots, L(k), L(k+1), \dots$ – лінгвістична орбіта, де $L(i)$ – лінгвістична змінна нечіткої моделі. Послідовність $s(0), s(1), \dots, s(k), s(k+1)$ центрів відповідних функцій належності можна також розглядати як дефазифіковану орбіту. Справедливе таке твердження [159].

Твердження 1. Якщо одномірна безперервна рекурентна нечітка система має лінгвістичну орбіту $L(0), L(1), \dots, L(n), \dots$, а лінгвістичні значення задовольняють ланцюгову нерівність.

$$L(n) \geq L(0) > L(1) > L(2) \text{ або } L(n) \leq L(0) < L(1) < L(2),$$

то ця рекурентна нечітка система буде хаотичної за Лі – Йорке в околі відповідних орбіт центрів функцій належності $s(0), s(1), \dots, s(k), s(k+1)$.

Однак дана теорема, що базується на класичному визначенні Лі – Йорке, має обмежене застосування лише в області, близькій до центрів відповідних функцій належності.

Проблемою залишається дослідження поведінки рекурентної моделі ТС у довільній точці фазового простору. Ідентифікація хаотичної динаміки для довільних початкових умов у моделі ТС нульового порядку і є однією із задач дослідження в дисертаційній роботі.

У зв'язку з цим актуальними видаються такі питання:

– визначити мінімальну кількість правил, які можуть створювати хаос;
 – визначити залежності між параметрами моделі ТС, що визначають хаотичну поведінку.

Згідно з теоремою 1 у фазовому просторі повинна існувати принаймні одна точка a , для якої відображення (3.19) буде створювати послідовності, що задовольняють умові

$$f^3(a) \leq a < f(a) < f^2(a) \text{ або } f^3(a) \geq a > f(a) > f^2(a). \quad (3.20)$$

Тоді справедливе таке твердження:

Твердження 2. Мінімальна кількість правил моделі ТС нульового порядку для створення хаосу дорівнює трьом.

Доведення. У разі одного правила передавальну функцію $f: x_k \rightarrow x_{k+1}$ моделі (3.18) відповідно до загальних обмежень нормування можна записати у виді

$$f(x) = \mu_1(x) \cdot A_1 \text{ для } \forall x \in X.$$

Оскільки в даному випадку $\mu_1(x) = 1$ для $\forall x \in X$, то $f(x) = A_1$ для $\forall x \in X$ і $x_1 = f(x_0) = x_0$. Отже, умови (3.20) не виконуються.

Для двох правил вірно

$$f(x) = \mu_1(x) \cdot A_1 + \mu_2(x) \cdot A_2 \text{ для } \forall x \in X. \quad (3.21)$$

Якщо припустити, що центри функцій належності задовольняють умовам $0 \leq a_1 < a_2 < a_3 \leq 1$, то

$$\text{для } x \in [0, a_1]: f(x) = A_1;$$

$$\text{для } x \in [a_2, 1]: f(x) = A_2;$$

$$\text{для } x \in [a_1, a_2]: f(x) = \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1} \cdot A_1 + \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} \cdot A_2.$$

Оскільки відображення (3.21) – це монотонна функція, тобто $a \leq f(a) \leq f^2(a) \leq f^3(a)$ або $a \geq f(a) \geq f^2(a) \geq f^3(a)$ (залежно від значень A_1, A_2), отже, умови (3.20) також не задовольняються.

У випадку трьох правил маємо

$$R_1: \text{If } x_k = L_1 \text{ then } x_{k+1} = A_1,$$

$$R_2: \text{If } x_k = L_2 \text{ then } x_{k+1} = A_2, \quad (3.22)$$

$$R_3: \text{If } x_k = L_3 \text{ then } x_{k+1} = A_3.$$

Тоді

$$\text{для } x \in [0, a_1]: \quad f(x) = A_1;$$

$$\text{для } x \in [a_3, 1]: \quad f(x) = A_3;$$

$$\text{для } x \in [a_1, a_2]: \quad f(x) = \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1} \cdot A_1 + \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} \cdot A_2;$$

$$\text{для } x \in [a_2, a_3]: \quad f(x) = \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2} \cdot A_2 + \frac{x - a_2}{a_3 - a_2} \cdot A_3.$$

Тоді відображення $f(x)$ є кусково-лінійною функцією і за умови $A_1 = a_1$, $A_2 = a_3$, $A_1 = a_1$. $a_1 = 0$, $a_2 = 0.5$, $a_3 = 1$, являє собою відоме відображення тенту [158] і, отже, є хаотичним.

Справедливе таке твердження.

Твердження 3. База правил (3.22) з перехідною функцією $f: I \rightarrow I$ хаотична в сенсі Лі – Йорке, якщо задовольняються такі умови:

$$(a) \quad A_1 \in [a_1, a_2],$$

$$(b) \quad A_2 = a_3,$$

$$(c) \quad A_3 \in [a_1, a_2].$$

Доведення. Відповідно до теореми 2 достатньо знайти множини A і B , що підходять. Очевидно, що f відображає інтервал $[a_1; a_3]$ у себе. Нехай $A = [a_2 + \varepsilon_1, a_3 - \varepsilon_2]$, $\varepsilon_1, \varepsilon_2 > 0$, $B = [\xi, \psi] \subset A$.

Визначимо $f(A)$. Відповідно до припущень (2), (3) теореми 2 $\lim_{\varepsilon_1 \rightarrow 0} f(a_2 + \varepsilon_1) = a_3$ і $\lim_{\varepsilon_2 \rightarrow 0} f(a_3 - \varepsilon_2) = A_3 \in [a_1, a_2]$. Отже, $f(A) \subset I$. Більш того, f є опуклим на A . Нескладно побачити, що для кожного $a \in A$ відповідно до $f(x) = \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2} \cdot A_2 + \frac{x - a_2}{a_3 - a_2} \cdot A_3$ існують $c = f(a)$ і $a = f^{-1}(c)$, що задовольняють умовам (2) і (3) теореми Клоедена. Легко також побачити, що $A \subseteq f(A)$. Дійсно,

$$f(A) = [f(a_3 - \varepsilon_2), f(a_2 + \varepsilon_1)] \subset [A_3, a_3],$$

$$\lim_{\substack{\varepsilon_1 \rightarrow 0, \\ \varepsilon_2 \rightarrow 0}} f(A) = [A_3, a_3].$$

Далі необхідно довести, що f є функцією, що розширюється на A , тобто для $\forall x, y \in A = [a_2 + \varepsilon_1, a_3 - \varepsilon_2]$ необхідно знайти константу $\lambda > 1$, при якій вірна нерівність

$$\lambda \|x - y\| \leq \left\| \begin{array}{l} \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2} \cdot A_2 + \\ \frac{x - a_2}{a_3 - a_2} \cdot A_3 - \frac{a_3 - y}{a_3 - a_2} \cdot A_2 - \\ \frac{y - a_2}{a_3 - a_2} \cdot A_3 \end{array} \right\|.$$

Тоді необхідно і достатньо, щоб

$$\left\| \frac{A_3 - A_2}{a_3 - a_2} \right\| > 1.$$

Коли $A_2 = a_3$ (умова (2)), очевидно, що повинно виконуватися $A_3 \in [a_1, a_2)$ (умова (3)).

Оскільки $B = [\xi, \psi] \subset A$, достатньо знайти параметри $\xi > a_2 + \varepsilon_1$, $\psi \leq a_3 - \varepsilon_2$ і n_1 і n_2 , що задовольняють умовам

$$f^{n_1}(B) \cap A = \emptyset,$$

$$A \subseteq f^{n_1+n_2}(B).$$

Для $n_1 = 1$ необхідно, щоб $f(a) \notin A$ для всіх $a \in B$.

Оскільки $\lim_{\varepsilon_2 \rightarrow 0} f(a_3 - \varepsilon_2) = A_3 \in [a_1, a_2)$ і $f(\xi) > f(a_3 - \varepsilon_2)$, то відповідно до умови (2) маємо також $f(\xi) > a_1$. Нехай $\xi = f^{-1}(a_2)$. Отже, $B = [f^{-1}(a_2), \psi]$ і $f(B) = [f(\psi), a_2]$. Тоді очевидно, що $f(B) \cap A = \emptyset$. Для $n_2 = 1$ маємо

$$f(f(B)) = [f(f(\psi)), a_3].$$

Для забезпечення $A \subseteq f^{n_1+n_2}(B)$ необхідно $f(f(\psi)) \leq a_2$. Зважаючи на те, що для

$$x \in [a_1, a_2] \quad f(x) = \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1} \cdot A_1 + \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} \cdot A_2$$

та if $\psi \leq a_3$, $A_3 = a_1$, маємо $A_1 \leq a_2$. Отже, умова (а) здійснима. Очевидно, що $\psi = f^{-2}(a_2)$ є слушним значенням.

I, нарешті, $f(f(B))$ є ін'єктивним на B (один-до-одного). Тому f є хаотичним у сенсі визначення 1.

Для опису багатьох складних процесів часто використовують моделі ТС нульового порядку з довільними часовими затримками. Такі в загальному випадку моделі мають вигляд

$$\begin{aligned}
 R_1 : & \text{if } x_k \text{ is } L_{1j_k} \text{ and } x_{k+1} \text{ is } L_{1j_{k+1}} \text{ and } \dots \\
 & \text{and } x_{k+n} \text{ is } L_{1j_{k+n}} \text{ then } x_{k+n+1} = A_1, \\
 R_2 : & \text{if } x_k \text{ is } L_{2j_k} \text{ and } x_{k+1} \text{ is } L_{2j_{k+1}} \text{ and } \dots \\
 & \text{and } x_{k+n} \text{ is } L_{2j_{k+n}} \text{ then } x_{k+n+1} = A_2, \\
 & \dots \\
 R_M : & \text{if } x_k \text{ is } L_{Mj_k} \text{ and } x_{k+1} \text{ is } L_{Mj_{k+1}} \text{ and } \dots \\
 & \text{and } x_{k+n} \text{ is } L_{Mj_{k+n}} \text{ then } x_{k+n+1} = A_M,
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

де L_{ij_q} – лінгвістичні змінні (терми), а A_i – числові константи.

Перехідна функція таких моделей

$$f(x) = \frac{\sum_{j=1}^M \prod_{k=1}^n \mu_{jk}(x) \cdot A_j}{\sum_{j=1}^M \prod_{k=1}^n \mu_{jk}(x)} \text{ for } \forall x \in X. \tag{3.24}$$

Бази правил (3.23) також можуть демонструвати хаотичну поведінку в сенсі Лі-Йорке.

Розглянемо спочатку випадок з часовою затримкою, рівною 2, а потім з більш високими порядками. Дослідимо відображення $f : x, x, \dots, x \rightarrow x$ на множині $x \in I = [0,1]$.

В даному випадку модель (3.23) можна переписати так:

$$\begin{aligned}
 R_1 : & \text{if } x_k \text{ is } L_{1j_k} \text{ and } x_{k+1} \text{ is } L_{1j_{k+1}} \text{ then } x_{k+2} = A_1, \\
 R_2 : & \text{if } x_k \text{ is } L_{2j_k} \text{ and } x_{k+1} \text{ is } L_{2j_{k+1}} \text{ then } x_{k+2} = A_2, \\
 & \dots \\
 R_M : & \text{if } x_k \text{ is } L_{Mj_k} \text{ and } x_{k+1} \text{ is } L_{Mj_{k+1}} \text{ then } x_{k+2} = A_M.
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

Легко побачити, що в даному випадку достатньо трьох правил, щоб продукувати хаотичні послідовності. Для цього розглянемо таку базу знань:

$$\begin{aligned}
R_1 &: \text{if } x_k \text{ is } L_1 \text{ then } x_{k+2} = A_1, \\
R_2 &: \text{if } x_k \text{ is } L_2 \text{ then } x_{k+2} = A_2, \\
R_3 &: \text{if } x_k \text{ is } L_3 \text{ then } x_{k+2} = A_3.
\end{aligned}
\tag{3.26}$$

Якщо лінгвістичні змінні L_i і консеквенти A_i в (3.26) задовольняють умовам твердження 1 для випадку з затримкою 1, отримаємо хаотичну послідовність $X = \{x_0, x_2, \dots, x_{2n}, \dots\}$.

У найбільш загальному випадку модель (3.26) можна представити як

$$\begin{aligned}
R_1 &: \text{if } x_k \text{ is } L_1 \text{ and } x_{k+1} \text{ is } L_1 \text{ then } x_{k+2} = A_{11}, \\
R_2 &: \text{if } x_k \text{ is } L_1 \text{ and } x_{k+1} \text{ is } L_2 \text{ then } x_{k+2} = A_{12}, \\
R_3 &: \text{if } x_k \text{ is } L_1 \text{ and } x_{k+1} \text{ is } L_3 \text{ then } x_{k+2} = A_{13}, \\
R_4 &: \text{if } x_k \text{ is } L_2 \text{ and } x_{k+1} \text{ is } L_1 \text{ then } x_{k+2} = A_{21}, \\
R_5 &: \text{if } x_k \text{ is } L_2 \text{ and } x_{k+1} \text{ is } L_2 \text{ then } x_{k+2} = A_{22}, \\
R_6 &: \text{if } x_k \text{ is } L_2 \text{ and } x_{k+1} \text{ is } L_3 \text{ then } x_{k+2} = A_{23}, \\
R_7 &: \text{if } x_k \text{ is } L_3 \text{ and } x_{k+1} \text{ is } L_1 \text{ then } x_{k+2} = A_{31}, \\
R_8 &: \text{if } x_k \text{ is } L_3 \text{ and } x_{k+1} \text{ is } L_2 \text{ then } x_{k+2} = A_{32}, \\
R_9 &: \text{if } x_k \text{ is } L_3 \text{ and } x_{k+1} \text{ is } L_3 \text{ then } x_{k+2} = A_{33}.
\end{aligned}
\tag{3.27}$$

Нехай a_1, a_2, a_3 – центри функцій належності відповідних лінгвістичних змінних L_1, L_2, L_3 . Тоді базу правил (3.27) можна розглянути як решітку з координатами a_1, a_2, a_3 по кожній осі. Вузли решітки містять відповідні значення $A_{11}, A_{12}, \dots, A_{33}$.

Скористаємося теоремою 2 для даної моделі (3.27). Для цього узагальнимо теорему для векторного випадку $f : x, x \rightarrow x$. Тоді вірне таке твердження.

Твердження 4. База правил (3.27) з відображенням $f : [a_1, a_3] \times [a_1, a_3] \rightarrow [a_1, a_3]$ хаотична на $x \in [a_1, a_3] \subset I$ в сенсі Лі-Йорке, якщо виконуються наступні умови:

- 1) $A_{22} = a_3$,
- 2) $\min(A_{11}, A_{12}, A_{13}) \in [a_1, a_2]$,
- 3) $\min(A_{31}, A_{32}, A_{33}) \in [a_1, a_2]$.

Доведення. Згідно з теоремою 2 необхідно знайти відповідні множини A і B для перехідної функції $f : [a_1, a_3] \times [a_1, a_3] \rightarrow [a_1, a_3]$. Припустимо, що

$A = [[\xi, \psi] \times [\theta, \psi]]$ і $B = [[\xi, \psi] \times [\theta, a_2]] \subset A$ з ξ, ψ, θ , які необхідно визначити. Нехай також $\theta < a_2, \psi > \xi > a_2$.

Перепишемо загальне відображення $f : x_k, x_{k+1} \rightarrow x_{k+2}$ в просторі станів $X = (x_1, x_2)$, де $x_1 = x_k, x_2 = x_{k+1}$. Тоді можна записати

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}_{k+1} = \begin{pmatrix} x_2 \\ f(x_1, x_2) \end{pmatrix}_k. \quad (3.28)$$

Очевидно, що відповідно до (3.28) отримаємо $X_{k+1} = F(X_k)$, де $F = \begin{pmatrix} x_2 \\ f(x_1, x_2) \end{pmatrix}$. Тоді нехай $A = \begin{pmatrix} [\xi, \psi] \\ [\theta, \psi] \end{pmatrix}$ і $F(A) = \begin{pmatrix} [\theta, \psi] \\ [f(\psi, \circ), f(\xi, a_2)] \end{pmatrix}$.

Тут $f(\xi, a_2)$ являє собою значення функції F на площині $x_1 = \xi$, а $f(\psi, \circ)$ означає деяке значення F на площині $x_1 = \psi$. Нехай $f(\xi, a_2) = \psi$. Тоді, щоб забезпечити умову 2 теореми 2 для векторів $A \subseteq F(A)$, маємо таку нерівність:

$$f(\psi, \circ) \leq \theta < a_2.$$

Оскільки

$$B = \begin{pmatrix} [\xi, \psi] \\ [\theta, a_2] \end{pmatrix},$$

можна визначити

$$F(B) = \begin{pmatrix} [\theta, a_2] \\ [f(\psi, \circ), f(\xi, a_2) = \psi] \end{pmatrix}.$$

Очевидно, що $F(B) \cap A = \emptyset$ (умова 5 теореми 2 для $n_1 = 1$). Знайдемо далі $F^2(B)$. Маємо тут

$$F^2(B) = \begin{pmatrix} [f(\psi, \circ), f(\xi, a_2) = \psi] \\ [f(\theta, \circ), a_3] \end{pmatrix}.$$

Щоб забезпечити умову 6 теореми 2, необхідно вимагати, щоб $f(\theta, \circ) \leq \theta \leq a_2$. Тоді вирази

$$f(\theta, \circ) \leq \theta \leq a_2,$$

$$f(\xi, a_2) = \psi,$$

$$f(\psi, \circ) < a_2$$

визначають умови (1) – (3) твердження 4. Решта умов теореми 2 очевидні.

Для моделі третього порядку маємо таку базу правил:

$$\begin{aligned}
 R_1 : & \text{if } x_k \text{ is } L_1 \text{ and } x_{k+1} \text{ is } L_1 \text{ and } x_{k+2} \text{ is } L_1 \\
 & \text{then } x_{k+3} = A_{11}, \\
 R_2 : & \text{if } x_k \text{ is } L_1 \text{ and } x_{k+1} \text{ is } L_1 \text{ and } x_{k+2} \text{ is } L_2 \\
 & \text{then } x_{k+3} = A_{12}, \\
 & \dots \\
 R_{27} : & \text{if } x_k \text{ is } L_3 \text{ and } x_{k+1} \text{ is } L_3 \text{ and } x_{k+2} \text{ is } L_3 \\
 & \text{then } x_{k+3} = A_{33}.
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

Таким чином, розглядається відображення $f : x_k, x_{k+1}, x_{k+2} \rightarrow x_{k+3}$.

Перш за все, уявімо це відображення у просторі станів $X_{k+1} = F(X_k)$, де $X = (x_1, x_2, x_3)$. Тоді маємо

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}_{k+1} = \begin{pmatrix} x_2 \\ x_3 \\ f(x_1, x_2, x_3) \end{pmatrix}_k. \tag{3.30}$$

Відповідно до запропонованого підходу, вірним є наступне твердження.

Твердження 5. База правил (3.29) з відображенням $f : [a_1, a_3] \times [a_1, a_3] \times [a_1, a_3] \rightarrow [a_1, a_3]$ хаотична на інтервалі $x \in [a_1, a_3] \subset I$ в сенсі Лі-Йорке, якщо задовольняються такі умови:

- 1) $A_{222} = a_3$,
- 2) $\min(A_{111}, A_{112}, \dots, A_{133}) \in [a_1, a_2]$,
- 3) $\min(A_{311}, A_{312}, \dots, A_{333}) \in [a_1, a_2]$.

Доведення. Відповідно до теореми 2 необхідно визначити множини A і B для перехідної функції $f : [a_1, a_3] \times [a_1, a_3] \times [a_1, a_3] \rightarrow [a_1, a_3]$. Нехай $A = [[\xi, \psi] \times [\theta, \psi] \times [\theta, \psi]]$ та $B = [[\xi, \psi] \times [\theta, a_2] \times [\xi, \psi]] \subset A$ з ξ, ψ, θ , які необхідно визначити. Нехай також $\theta < a_2, \psi > \xi > a_2$.

Відповідно до (3.30) можна записати

$$F = \begin{pmatrix} x_2 \\ x_3 \\ f(x_1, x_2, x_3) \end{pmatrix}.$$

$$\text{Нехай } A = \begin{pmatrix} [\xi, \psi] \\ [\theta, \psi] \\ [\theta, \psi] \end{pmatrix}. \text{ Тоді } F(A) = \begin{pmatrix} [\theta, \psi] \\ [\theta, \psi] \\ [f(\psi, \circ, \circ), \psi] \end{pmatrix}.$$

Щоб забезпечити умову 2 теореми 2 у векторному випадку $A \subseteq F(A)$, необхідно задовольнити нерівності

$$f(\psi, \circ, \circ) \leq \theta < a_2.$$

Оскільки

$$B = \begin{pmatrix} [\xi, \psi] \\ [\theta, a_2] \\ [\xi, \psi] \end{pmatrix},$$

можна визначити

$$F(B) = \begin{pmatrix} [\theta, a_2] \\ [\xi, \psi] \\ [f(\psi, \circ, \circ), \psi] \end{pmatrix}.$$

Очевидно, що $F(B) \cap A = \emptyset$ (умова 5 теореми 2 для $n_1 = 1$). Знайдемо далі $F^2(B)$. Маємо

$$F^2(B) = \begin{pmatrix} [\xi, \psi] \\ [f(\psi, \circ, \circ), \psi] \\ [f(\theta, \circ, \circ), a_3] \end{pmatrix}.$$

Щоб забезпечити умову 6 теореми 2, необхідно вимагати, щоб виконувалась умова $f(\theta, \circ, \circ) \leq \theta \leq a_2$. Тоді вирази

$$f(\theta, \circ) \leq \theta \leq a_2,$$

$$f(\xi, a_2, a_2) = \psi,$$

$$f(\psi, \circ, \circ) \leq \theta < a_2$$

визначають умови (1)–(3) твердження 5. Решта умов теореми 2 очевидні.

Таким чином, можливо узагальнити результати у вигляді твердження.

Твердження 6. База правил (3.23) з відображенням $f : [a_1, a_3] \times [a_1, a_3] \times \dots \times [a_1, a_3] \rightarrow [a_1, a_3]$ хаотична на $x \in [a_1, a_3] \subset I$ в сенсі Лі – Йорке, якщо задовольняються наступні умови:

$$1) A_{22\dots 2} = a_3,$$

$$2) \min(A_{11\dots 1}, A_{11\dots 2}, \dots, A_{13\dots 3}) \in [a_1, a_2],$$

$$3) \min(A_{311..1}, A_{31..2}, \dots, A_{33..3}) \in [a_1, a_2).$$

Модель ТС першого порядку має вигляд

$$R_1: \text{If } x_k = L_1 \text{ then } x_{k+1} = A_1 \cdot x_k + B_1,$$

$$R_2: \text{If } x_k = L_2 \text{ then } x_{k+1} = A_2 \cdot x_k + B_2,$$

.....

$$R_N: \text{If } x_k = L_N \text{ then } x_{k+1} = A_N \cdot x_k + B_N,$$

(3.31)

де L_i – лінгвістичні змінні, а A_i, B_i – числові коефіцієнти. Функції належності та їхні центри визначені, як і у попередніх випадках.

Перш за все, необхідно визначити мінімальну кількість правил для продукування хаотичних послідовностей.

Твердження 7. Мінімальна кількість правил у моделі ТС першого порядку для продукування хаосу дорівнює двом.

Доведення. Якщо ми маємо одне правило, то перехідна функція $f: x_k \rightarrow x_{k+1}$ моделі (3.31) відповідно до умов нормалізації має вигляд

$$f(x) = \mu_1(x) \cdot (A_1 \cdot x + B_1) \text{ для } \forall x \in X.$$

Крім того, $\mu_1(x) = 1$ для $\forall x \in I$. Тоді $f(x) = A_1 \cdot x + B_1$ для $\forall x \in I$. Отже, $f(x)$ – монотонна функція. У разі двох правил маємо

$$\text{для } x \in [0, a_1]: f(x) = A_1 \cdot x + B_1;$$

$$\text{для } x \in [a_2, 1]: f(x) = A_2 \cdot x + B_2;$$

$$\text{для } x \in [a_1, a_2]: f(x) = \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1} \cdot (A_1 \cdot x + B_1) + \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} \cdot (A_2 \cdot x + B_2).$$

Отже, $f(x)$ – парабола і для $A_1 = 4, A_2 = 0, B_1 = 0, B_2 = 0, a_1 = 0, a_2 = 1$ є логістичним відображенням з хаотичними властивостями.

Тепер виведемо загальні умови для коефіцієнтів A_i, B_i , щоб забезпечити хаотичність f . Для $N = 2$ база правил має вигляд

$$R_1: \quad \text{If } x_k = L_1 \quad \text{then}$$

$$x_{k+1} = A_1 \cdot x_k + B_1, \quad R_2: \quad \text{If } x_k = L_2$$

(3.32)

$$\text{then } x_{k+1} = A_2 \cdot x_k + B_2.$$

Випадок для $a_1 = 0.25, a_2 = 0.75, A_1 = 2, B_1 = 0, A_2 = -2, B_2 = 2$ показано на рис. 3.3, 3.4

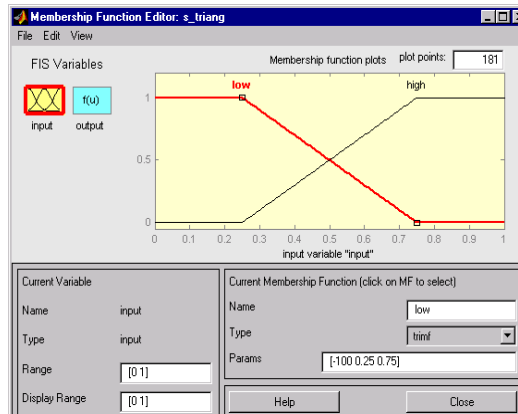


Рисунок 3.3 – Функції належності

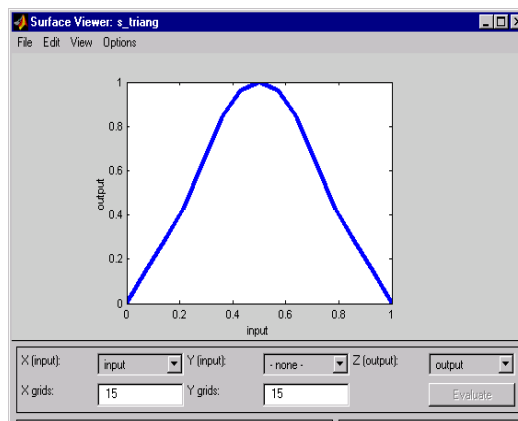


Рисунок 3.4 – Перехідна функція

Як і у випадку з моделлю нульового порядку, можна сформулювати теорему для моделі ТС першого порядку.

Твердження 8. База правил (3.33) хаотична в сенсі Лі–Йорке на інтервалі $[a_1, a_2] \subseteq I$, якщо коефіцієнти A_1, A_2, B_1, B_2 є розв'язанням системи таких рівнянь:

$$\begin{cases} A_1 \cdot a_1 + B_1 = \phi, \\ A_2 \cdot a_2 + B_2 = \phi, \\ A_1 \cdot (a_1 + a_2) + A_2 \cdot (a_1 + a_2) + \\ 2B_1 + 2B_2 = 4a_2 \end{cases} \quad (3.33)$$

з довільним $\phi \in \left[a_1, \frac{a_1 + a_2}{2} \right)$.

Доведення. Відповідно до теореми 2 достатньо знайти відповідні компактні множини A і B в $[a_1, a_2]$ для перехідної функції $f: [a_1, a_2] \rightarrow [a_1, a_2]$.

Нехай $A = [\xi, \psi] \subset \left(\frac{a_1 + a_2}{2}, a_2 \right]$, $B = [\theta, \psi] \subset A$ з ξ, θ, ψ , які необхідно визначити.

Зауважимо, що $\xi > \frac{a_1 + a_2}{2}$, $\psi < a_2$, $\xi < \theta$, ліва гілка параболи - $f_1(x)$, права гілка - $f_2(x)$.

Тоді $f(A) = [f_2(\psi), f_2(\xi)]$. Нехай $f_2(\xi) = \psi$, звідки $f_2(\psi) \leq \frac{a_1 + a_2}{2}$, щоб задовольнити $A \subseteq f(A)$.

Знайдемо $f(B)$. Маємо $f(B) = [f_2(\psi), f_2(\theta)]$. Щоб задовольнити умову $f(B) \cap A = \emptyset$, припустимо, що $f_2(\theta) = \frac{a_1 + a_2}{2}$. Оскільки маємо $\psi > \theta$, то $f_2(\psi) < \frac{a_1 + a_2}{2}$. Саме тому умова $\phi \in \left[a_1, \frac{a_1 + a_2}{2} \right)$ необхідна. Зауважимо, що умова (3.33) забезпечує також властивості:

$$f(a_1) = \phi, \quad f(a_2) = \phi, \quad f\left(\frac{a_1 + a_2}{2}\right) = a_2.$$

Відповідно до наведених припущень можна записати $f^2(B) = [f_1(f_2(\psi)), a_2]$. Тоді, якщо $f_1(f_2(\psi)) = \frac{a_1 + a_2}{2}$, умова $A \subseteq f^2(B)$ задовольняється. Крім того, повинна виконуватися умова $\exists x \in \left[a_1, \frac{a_1 + a_2}{2} \right]$, якщо $f_1(x) = \frac{a_1 + a_2}{2}$.

В результаті можна записати

$$\begin{aligned} \theta &= f_2^{-1}\left(\frac{a_1 + a_2}{2}\right), \\ \psi &= f_2^{-1}\left(f_1^{-1}\left(\frac{a_1 + a_2}{2}\right)\right), \\ \xi &= f_2^{-1}(\psi). \end{aligned}$$

Очевидно, що в цьому випадку умова $\xi < \theta$ виконується. Тоді можна її записати, як $f_2(\xi) > f_2(\theta)$ і, нарешті, маємо $\psi > \frac{a_1 + a_2}{2}$.

Далі потрібно довести, що f є відображенням на A , що розширюється. Це означає, що $|f'(x)| > 1$, for $x \in [\xi, \psi]$.

Очевидно, досить показати розширюваність відображення тільки для точки $x = \xi$.

Знайдемо значення $x^* \in \left[\frac{a_1 + a_2}{2}, a_2 \right]$, таке, що $|f'(x^*)| = 1$. Відповідно до умов (3.33) можна записати похідну перехідної функції після очевидних підстановок як

$$f'(x) = \frac{4(\phi - a_2)}{(a_2 - a_1)^2} (2x - (a_1 + a_2)),$$

для якої отримаємо

$$x^* = \frac{1}{2} \left(a_1 + a_2 - \frac{(a_1 - a_2)^2}{4(\phi - a_2)} \right).$$

Якщо $\xi > x^*$, то наше припущення щодо розширюваності функції f на A вірно. Тоді відповідно до перехідної функції останню нерівність можна переписати як

$$f(f(f(\xi))) < f(f(f(x^*))).$$

Оскільки $f(f(f(\xi))) = \frac{a_1 + a_2}{2}$, нескладно довести, що $f(f(f(x^*))) > \frac{a_1 + a_2}{2}$.

Нарешті, доказ ін'єкції на B тривіальний.

Висновки до третього розділу

1. Формалізовано залежності в динаміці поведінки систем популяційної динаміки, максимально можливу кількість особин популяції залежно від вхідних даних та зв'язок майбутніх і поточних станів системи.

2. Розроблену інтелектуальну мультиагентну систему епідемічних процесів у системах популяційної динаміки перевірено на стійкість на прикладі налаштування моделі для прогнозування захворюваності на вірусний гепатит В, що розглянуто в підрозділі 2.6.

3. Розглянуто низку перешкод при перевірці імітаційних моделей на точність та адекватність, а також при залученні експертів з області, що моделюється. Показано, що ці проблеми можуть бути успішно вирішені за допомогою застосування моделей, заснованих на застосуванні нечітких лінгвістичних правил.

4. Побудовано модель епідемічного процесу, засновану на застосуванні нечітких лінгвістичних правил. Ці методи дозволяють враховувати невизначеності, пов'язані зі змінними, параметрами, граничними умовами та початковими станами і моделювати їхню еволюцію, дотримуючись основних правил і закономірностей динаміки системи.

5. Досліджено на хаотичність в сенсі Лі–Йорке розроблену інтелектуальну модель системи популяційної динаміки. Визначено умови виникнення хаотичної динаміки.

6. Дістало подальшого розвитку 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 системи, що моделюється.

7. Визначено, що мінімальна кількість правил в інтелектуальній моделі системи популяційної динаміки Такагі – Сугено першого порядку для продукування хаосу дорівнює двом.

8. 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, для яких характерна хаотична динаміка в сенсі Лі

– Йорке, на підставі значень коефіцієнтів у консеквентах правил, а не на традиційному підході, що базується на дослідженнях перехідних функцій або часових рядів.

Основні результати розділу опубліковано в працях [1, 3, 18, 19, 22].

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ПРИКЛАДНИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНИХ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ – ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

4.1 Інтелектуальна інформаційно-аналітична система розповсюдження шкідливого програмного забезпечення типу «мережевий хробак» у повнозв'язних гетерогенних мережах

Широке використання і легкий доступ до мережі Інтернет робить її головною мішенню для зловмисної діяльності. Зокрема, Інтернет став потужним механізмом для розповсюдження шкідливого програмного забезпечення. Мережеві хробаки, автономні програми, що поширюються через комп'ютерні мережі за допомогою автоматичного пошуку, атак та зараження віддалених комп'ютерів, розробляються практично 30 років з моменту першого хробака Морріса. За сучасних умов, комп'ютерна інфраструктура більш уразлива, ніж будь-коли раніше, тому що швидкість розвитку технологій набагато вище швидкості розробки їх захисних заходів [160]. Інциденти хробаків Code Red і Nimda 2001 року показали, наскільки вразливі комп'ютерні мережі і як швидко може розповсюджуватись мережевий хробак. Крім того, Вівер подав певні принципи розробки хробаків, використовуючи які вони могли б поширюватися ще швидше [161]. Для того щоб захиститися від атак можливих хробаків у майбутньому, необхідно розуміти різні їх властивості й особливості поведінки: патерни розповсюдження хробаків протягом їх життєвого циклу; розробку патчів; обізнаність і інші людські контрзаходи; топологію мережі і т.д.

Розробка точної моделі Інтернет-хробака дасть уявлення про його поведінку. Це дозволить виявити слабкі місця в динаміці мережевого хробака, а також створити прогноз її розповсюдження з метою оцінити збиток від діяльності хробака. В епідеміологічних дослідженнях існує кілька детермінованих і стохастичних моделей розповсюдження вірусних

захворювань, крім того, деякі моделі існують і для моделювання розповсюдження Інтернет-хробаків.

Кепхарт, Вайт та Чесс з IBM провели серію експериментів моделювання хробаків з 1991 по 1993 рік, ґрунтуючись на епідеміологічних моделях вірусних інфекцій [162]. Усі традиційні епідеміологічні моделі мають гомогенний характер, тобто будь-який інфікований хост може з однаковою ймовірністю заразити будь-який сприйнятливий хост [162]. З огляду на локальні взаємодії вірусів у той час [163] епідеміологічні моделі були застосовані до деяких негомогенних мереж: випадкового графа, двовимірної решітки та ієрархічного графа типу «дерево». Незважаючи на те, що в той час гіпотеза про локальну взаємодію була вірна завдяки спільному використанню носіїв інформації, в сучасному світі для моделювання поведінки хробаків вона не підходить, тому що абсолютна більшість хробаків поширюються через Інтернет та можуть уразити ціль безпосередньо. Крім того, для моделювання була досліджена модель Сприйнятливий-Заражений-Сприйнятливий (SIS), яка передбачає, що вилікуваний комп'ютер може бути інфіковано повторно негайно.

Ванг та його колеги представили результати моделювання розповсюдження простого мережевого хробака в кластерних та деревовидних ієрархічних мережах [164]. Вони показали, що вибіркова імунізація в деяких мережевих топологіях може значно сповільнити поширення вірусу. Однак їхній висновок ґрунтувався на деревовидній ієрархічній топології, яка не підходить для мережі Інтернет.

Епідемія хробака Code Red у липні 2001 року стимулювала активну дослідницьку діяльність моделювання й аналізу хробака в мережі Інтернет. Станіфорд з колегами використовували класичні найпростіші епідемічні рівняння для моделювання розповсюдження хробака Code Red відразу після інциденту 19-го липня [165]. Їхня модель досить точно відповідала реальним даним з обмеженими спостереженнями. Мур надав дані, що спостерігаються, а також аналіз поведінки хробака Code Red [166]. Уівер запропонував деякі

підходи у проектуванні хробаків, які можуть бути використані для розповсюдження шкідливого коду швидше, ніж хробаки Code Red і Nimda [160].

В галузі моделювання епідемічного процесу передбачається, що рівень вірусної інфекції постійний. Описані моделі Інтернет-вірусів і мережових хробаків оцінюють час, необхідний для пошуку мети зараження хоста, як константу, незалежно від того, чи заражений він уже чи ні. Уівер розглядав рівень інфекції як випадкову величину з огляду на невдалі спроби IP-сканування хробака. Однак середнє значення швидкості розповсюдження інфекції, як і раніше, передбачається постійним, що справедливо для моделювання епідемій захворюваності, але не може відповідати дійсності для Інтернет-вірусів і хробаків.

Метою даного розділу дисертаційного дослідження є розробка, аналіз та вдосконалення традиційних епідемічних моделей для моделювання розповсюдження мережових хробаків на прикладі хробака Code Red.

12 липня 2001 року новий хробак почав розповсюдження через Інтернет. Хробак поки не мав назви, але це було перше втілення того, що згодом стало відомим як хробак Code Red. Ця первісна версія хробака зазвичай згадується як CRv1. 19 липня наступна версія хробака, що включала практично весь код першої версії хробака, почала розповсюджуватись ще швидше свого попередника [167]. Повідомляється, що новою версією хробака Code Red були інфіковані понад 250 000 систем всього за дев'ять годин. Цей варіант хробака тепер зазвичай називають CRv2.

Хробак сканував Інтернет, визначав уразливі системи та заражав їх шляхом самоустановлення. Швидкість сканування швидко збільшувалась, тому що кожен знову встановлений хробак приєднувався до інших, уже існуючих. Крім того, результатом установки хробака було знеособлення веб-сторінок на інфікованих системах, його неконтрольоване зростання при скануванні, що призвело до зменшення швидкості передачі даних через Інтернет та викликало атаку типу «Відмова в обслуговуванні» (DoS). Це

призвело до великої кількості відмов серед усіх типів систем, а не тільки Microsoft IIS, системи якого були заражені їм безпосередньо.

4 серпня новий хробак експлуатував ту ж уразливість, що й оригінальний хробак Code Red, у веб-сервері Microsoft IIS. Незважаючи на те, що початковий код нового хробака не мав практично нічого спільного з першими двома версіями оригінального шкідливого програмного забезпечення, він був названий Code Red II, бо в його коді містилося ім'я, а також він використовував ту ж уразливість у службі індексування IIS. Крім оригінального Code Red і хробака Code Red II, існують й інші можливі варіанти хробака. Проте в цьому дослідженні основна увага буде приділена Code Red (CRv2) та хробакові Code Red II.

В результаті безпрецедентно швидкого розповсюдження хробака Code Red через Інтернет як підприємства, так і приватні особи у всьому світі відчували перебої в роботі мережі Інтернет.

Моделювання розповсюдження хробака Code Red дозволить виявити тенденції його розповсюдження (рис. 4.1), знайти чинники, що впливають на розповсюдження Інтернет-хробака. Крім того, побудована модель допомагає визначити ефективні профілактичні і превентивні заходи щодо запобігання епідемії шкідливого програмного забезпечення. Для вирішення завдання зі створення перспективних механізмів захисту від мережевих хробаків проведено дослідження різних підходів до моделювання розповсюдження мережевих хробаків.

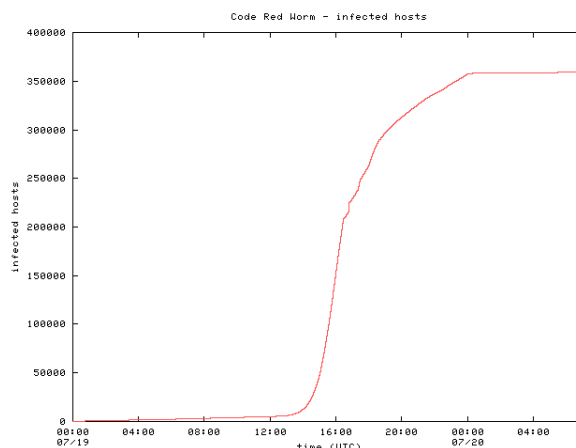


Рисунок 4.1 – Кількість заражених хостів хробака Code Red [168]

На відміну від моделей розповсюдження захворюваності, прогнозування епідемічного процесу шкідливого програмного забезпечення має специфіку [169]. Таким чином, у рамках даного дослідження були розглянуті деякі структури моделей, які доцільно використовувати для прогнозування інфікування шкідливим програмним забезпеченням типу «хробак».

У структурі моделі SEIQR хости можуть приймати один з п'яти станів: Сприйнятливий (S), Інфікований (I), Незахищений (E), Вилікуваний (R), Ізольований (Q) [170] (рис. 4.2). При цьому переходи між станами здійснюються в такий спосіб: з E в R, з E в I, з I в Q, а потім у R, з I в R.

Динаміку поведінки системи можна описати такою системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -\frac{\beta I(t)}{N} S(t), \\ \frac{dE(t)}{dt} = \frac{\beta I(t)}{N} S(t) - (\alpha + k)E(t), \\ \frac{dI(t)}{dt} = \alpha E(t) - (\gamma + \delta)I(t), \\ \frac{dQ(t)}{dt} = \delta I(t) - \gamma Q(t), \\ \frac{dR(t)}{dt} = kE(t) + \gamma(Q(t) + I(t)). \end{cases} \quad (4.1)$$

де β – швидкість розповсюдження мережевого хробака, δ – швидкість ізолювання, k , γ – швидкості лікування, α – швидкість переходу зі стану E в стан I .

Результати моделювання розповсюдження мережевого хробака Code Red на основі SEIQR моделі, показані на рис. 4.3, свідчать про те, що впровадження додаткових видів об'єктів управління, а також можливість ізоляції заражених мережевих вузлів підвищують точність кінцевого результату за умови, що антивірусне програмне забезпечення оновлюється в належний час.

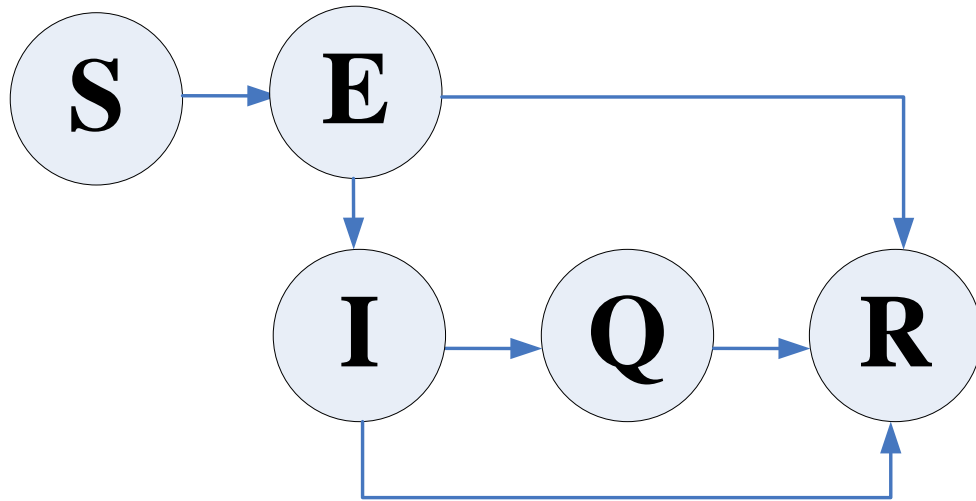


Рисунок 4.2 – Перехід станів у SEIQR моделі

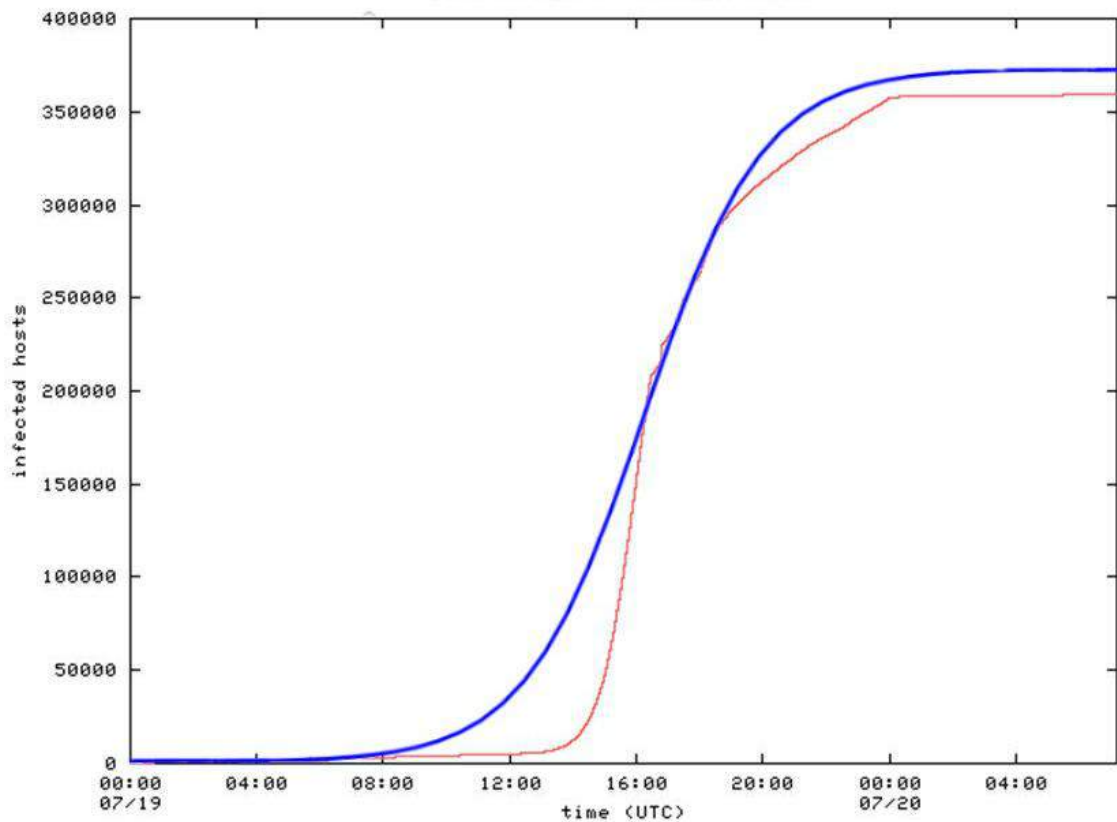


Рисунок 4.3 – SEIQR модель розповсюдження Code Red (синій) та реальні дані розповсюдження хробака Code Red (червоний)

Структура моделі SAIR може бути використана для симулювання наявності антивірусного програмного забезпечення в хостах. У даній моделі існують такі стани: Сприйнятливий (S), Протівірусний (A), Інфікований (I), Вилікуваний (R) [171]. Протівірусний стан показує, що хост має встановлене антивірусне програмне забезпечення, а отже, менш сприйнятливий до зараження мережним хробаком. Переходи між станами в SAIR моделі показано на рис. 4.4.

Динаміка моделі описується такою системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = N - \alpha SA - \beta_{SI} SI - \mu S + \sigma_{IS} I + \sigma_{RS} R, \\ \frac{dI}{dt} = \beta_{SI} SI + \beta_{AI} AI - \sigma_{IS} I - \delta I - \mu I, \\ \frac{dR}{dt} = \delta I - \sigma_{RS} R - \mu R, \\ \frac{dA}{dt} = \alpha SA - \mu A - \beta_{AI} AI. \end{cases}, \quad (4.2)$$

де N – коефіцієнт додавання нових хостів у мережу,

μ – показник смертності хоста з причин, відмінних від зараження мережним хробаком,

β_{SI} – коефіцієнт інфікування сприйнятливих хостів,

β_{AI} – коефіцієнт інфікування хостів з антивірусним програмним забезпеченням, δ – коефіцієнт видалення інфікованих хостів,

σ_{IS} – коефіцієнт одужання інфікованих хостів,

σ_{RS} – коефіцієнт лікування віддалених хостів.

Для спрощення побудованої моделі частота додавання нових хостів розглядається як $N = 0$, при цьому маючи на увазі, що нові хости не повинні додаватися під час епідемії. Також будемо вважати, що $\mu = 0$. Зважаючи на прийняті спрощення, можемо описати систему, що моделюється в такий спосіб:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS}{dt} = \alpha SA - \beta_{SI} SI + \sigma_{IS} I + \sigma_{RS} R, \\ \frac{dI}{dt} = \beta_{SI} SI + \beta_{AI} AI - \sigma_{IS} I - \sigma I, \\ \frac{dR}{dt} = \delta I - \sigma_{RS} R, \\ \frac{dA}{dt} = \alpha SA - \beta_{AI} AI. \end{array} \right. \quad (4.3)$$

Оскільки $\frac{dS}{dt} + \frac{dA}{dt} + \frac{dI}{dt} + \frac{dR}{dt} = 0$, то $S+A+I+R=T=const$ для будь-яких t .

Результати моделювання розповсюдження мережевого хробака Code Red на основі SAIR моделі показано на рис. 4.5.

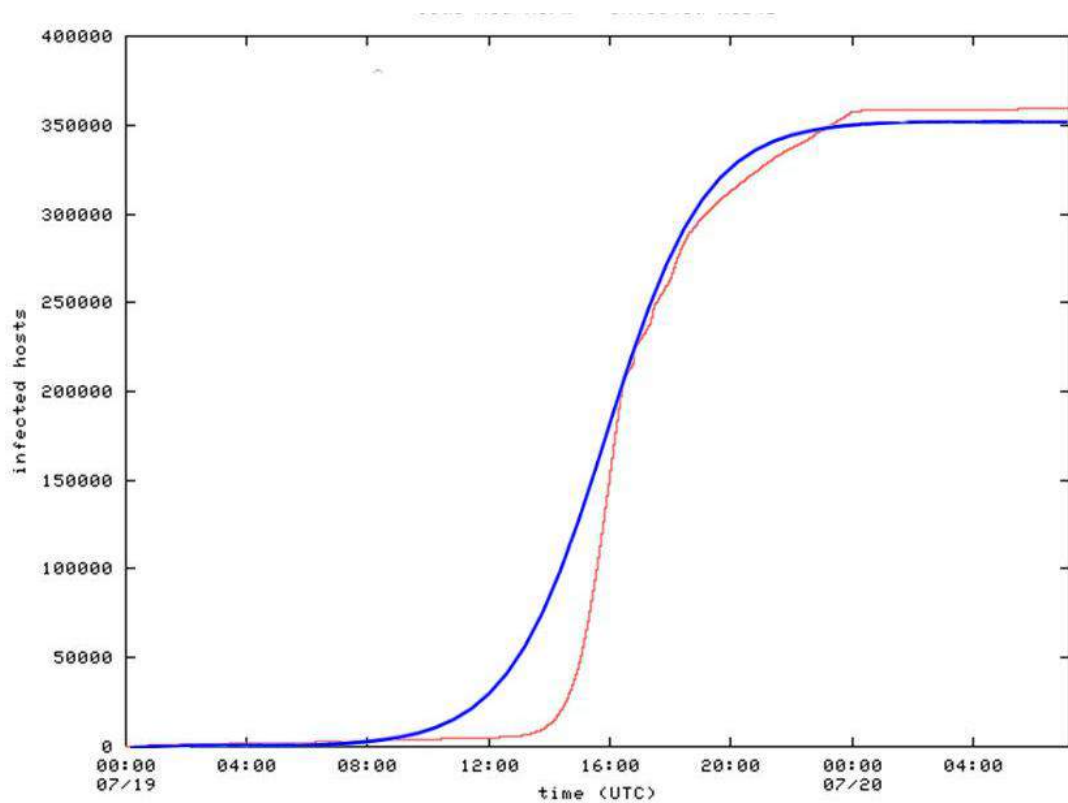


Рисунок 4.5 – SAIR модель розповсюдження хробака Code Red (синій) та реальні дані розповсюдження хробака Code Red (червоний)

Прогресивна SIDR модель, або PSIDR модель дозволяє врахувати два фактори [172] (рис. 4.6):

1. На ранньому етапі розвитку епідемії, чия тривалість становить π , діє класична SI модель.

2. Подальший розвиток епідемії описується шляхом упровадження додаткового стану D (Виявлено), до станів S, I і R класичної SIR моделі. Хост знаходиться в стані D, коли в ньому виявлено наявність мережевого хробака, але активних контрзаходів ще не вжито.

Інфікування і лікування хостів реалізовано способом, аналогічним такому у попередніх моделях, з середньою швидкістю мережевого хробака β і γ та швидкістю переходу зі стану I у проміжний стан D μ хостів в одиницю часу.

На першому етапі, коли $t < \pi$ справедливе таке твердження:

$$S(t) + I(t) = N, \quad (4.4)$$

а система описується системою рівнянь

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\beta SI, \\ \frac{dI}{dt} = \beta SI. \end{cases} \quad (4.5)$$

На другому етапі, коли $t \geq \pi$ справедливе таке твердження:

$$S(t) + I(t) + D(t) + R(t) = N, \quad (4.6)$$

а система описується наступною системою рівнянь

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\beta SI - \mu S, \\ \frac{dI}{dt} = \beta SI - \mu I, \\ \frac{dD}{dt} = \mu I - \delta D, \\ \frac{dR}{dt} = \delta D + \mu S. \end{cases} \quad (4.7)$$

Результати моделювання розповсюдження мережевого хробака Code Red на основі PSIDR моделі показано на рис. 4.7.

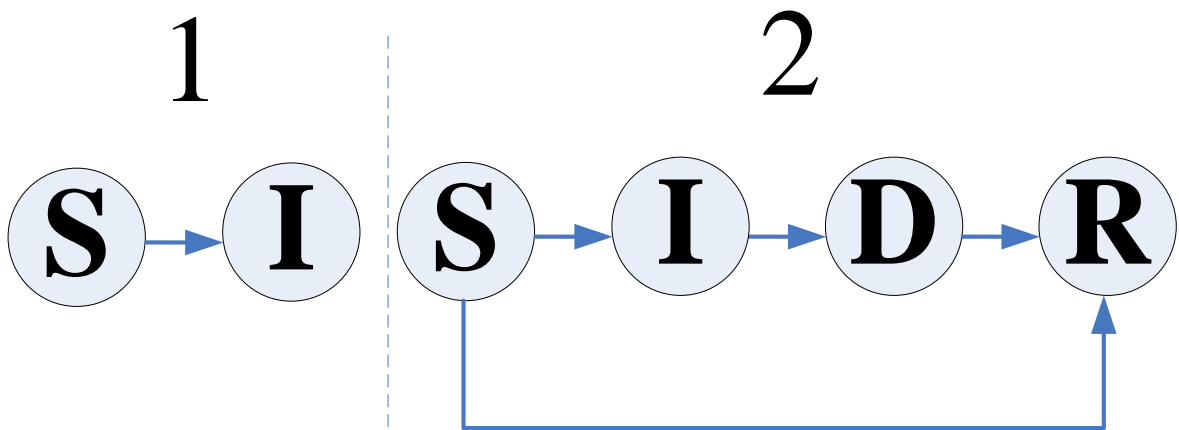


Рисунок 4.6 – Перехід станів у PSIDR моделі

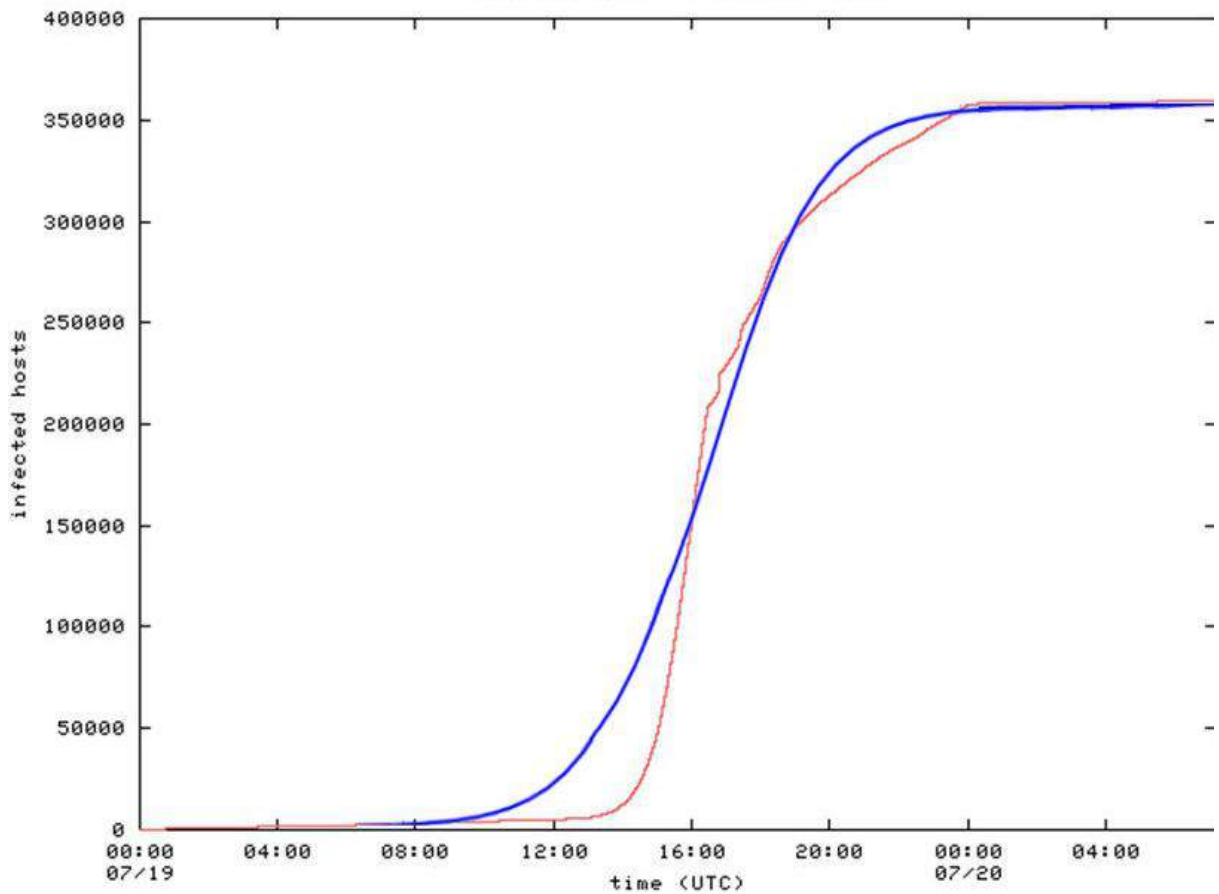


Рисунок 4.7 – PSIDR модель розповсюдження хробака Code Red (синій)
та реальні дані розповсюдження хробака Code Red (червоний)

Для усунення недоліків детермінованих моделей, розглянутих вище було застосовано інтелектуальну мультиагентну модель, описану в розділах 2 і 3, яка дозволила розглядати велику кількість факторів, що впливають на процес розповсюдження вірусного програмного забезпечення [173].

Адекватність імітаційної моделі здебільшого залежить від кількості агентів у системі. Використання великих популяцій і деталізація властивостей агентів приводить до необхідності застосування найбільш сучасних інформаційних засобів і технологій, зокрема, алгоритмів, оптимальних за кількістю виконуваних машинних операцій. При мультиагентному підході процес моделювання ґрунтується на побудові і обробці черги подій, які можна розподілити на два типи:

1. Зміна стану агента з точки зору зовнішнього середовища (фізичне становище агента).

2. Зміна внутрішнього стану агента. Події цього типу виникають у результаті взаємодії агента з іншими агентами, а також із зовнішнім середовищем.

Завданням є пошук і використання такого набору властивостей і методів агентів як об'єктів, який дозволив би найбільшою мірою використовувати переваги мультиагентного підходу.

У програмному комплексі «Мультиагентна система розповсюдження комп'ютерних хробаків у повнозв'язних гетерогенних мережах «MASWorm» [30] пропонується формальний опис побудованої моделі. Агент може бути розглянутий як набір параметрів:

$$a = \langle s, s_t, c, l \rangle, \quad a \in A, s \in S, c \in C, \quad (4.8)$$

де s_t – час перебування агента в стані s ;

A – кількість агентів;

S – кількість можливих станів;

l – тривалість життя;

C – множина комірок робочої області.

Множина станів агента визначена попередньо і є постійною. У розробленій моделі множини станів визначено як:

$$S = \{Susceptible, Antidotal, Infected, Detected, Recovered\}. \quad (4.9)$$

Використання такого набору станів ґрунтується на ідеї поділу всієї популяції на підмножини виходячи з їх станів за епідемічними ознаками. Запропонований набір характеризує модель як аналог розширеної моделі типу SAIR.

Переходи між станами показано на рис. 4.8:

– *Susceptible* – агент здоровий. Це стан агентів, які сприйнятливі до зараження певним хробаком.

– *Antidotal* – агент здоровий. Агенти в цьому стані мають встановлене антивірусне програмне забезпечення, тому не можуть бути заражені.

– *Infected* – агент інфікований і може бути переносником вірусу на інші хости.

– *Detected* – зараження агента виявлено антивірусним програмним забезпеченням, і хост ізольовано з мережі.

– *Recovered* – агентвилікуваний і більш не сприйнятливий до даного типу хробака.

Мережа описана як множина осередків. Декомпозиція робочої області призводить до виникнення множини осередків як умовних абстрактних об'єктів, що складаються з множини агентів і одного інфікованого агента. Тому комірка може бути визначена як

$$c = \langle z, \tilde{A}, i \rangle, z \in Z, \tilde{A} \subset A, i \in I, \quad (4.10)$$

де I – множина всіх заражених агентів;

Z – множина всіх зон.

Метод агентів, що функціонують у вирішальній мережі, включає три підфункції: сприйняття, рішення та трансформування.

Підфункція сприйняття

$$Per : CE \rightarrow F_{in} \quad (4.11)$$

забезпечує відбір інформації з середовища і присвоєння значень вхідним атрибутам.

Підфункція рішення

$$Dec : F_{in} \rightarrow F_{out} \quad (4.12)$$

визначає значення вихідних змінних за значеннями вхідних.

Підфункція трансформування

$$Tran : F_{out} \rightarrow CE' \quad (4.13)$$

змінює стан середовища, виконуючи операції переказу елементів множин з одного в інше відповідно до правил, наведених нижче, а також видалення елементів множин.

Загальна структура побудованої інтелектуальної мультиагентної системи може бути виражена комплексом

$$ABS = \{Ind, Prp, Atr, Inp, Out, Str\}, \quad (4.14)$$

де: *Ind* – найменування системи;

Prp – цілі системи;

Atr – загальносистемні характеристики;

Inp – вхід системи;

Out – вихід системи;

Str – структура системи. $Str = \{CE, R\}$, де *CE* – компоненти системи, *R* – зв'язки компонентів.

Мультиагентна модель розповсюдження хробака Code Red була реалізована за допомогою мультиагентного програмного пакета NetLogo (рис. 4.9). Перевагою використання даної моделі є простий інтерфейс. Однак реалізація запропонованої моделі з великою кількістю агентів у NetLogo вимагає дуже великої обчислювальної потужності [174]. Це не дозволяє змодельовувати реальні процеси, що відбуваються в мережі з великою кількістю хабів. Для вирішення даної проблеми модель була реалізована на мові програмування Python. Результати моделювання показують поведінку, аналогічну реальній згідно зі статистичними даними (рис. 4.10).

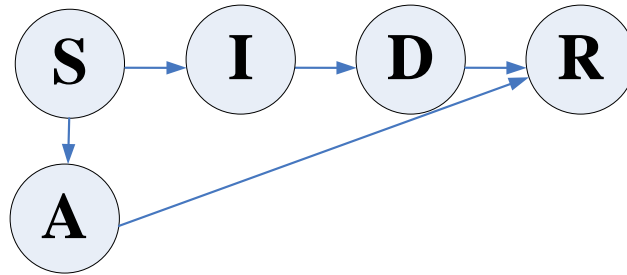


Рисунок 4.8 – Перехід станів інтелектуальної мультиагентної системи

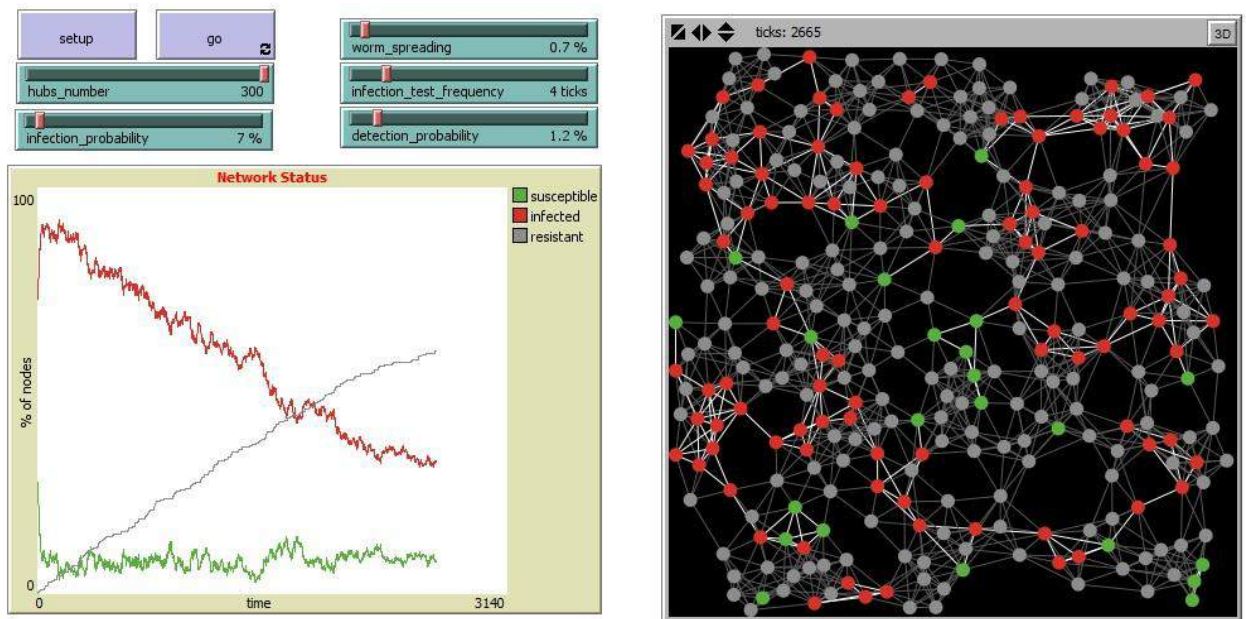


Рисунок 4.9 – Реалізація моделі в NetLogo

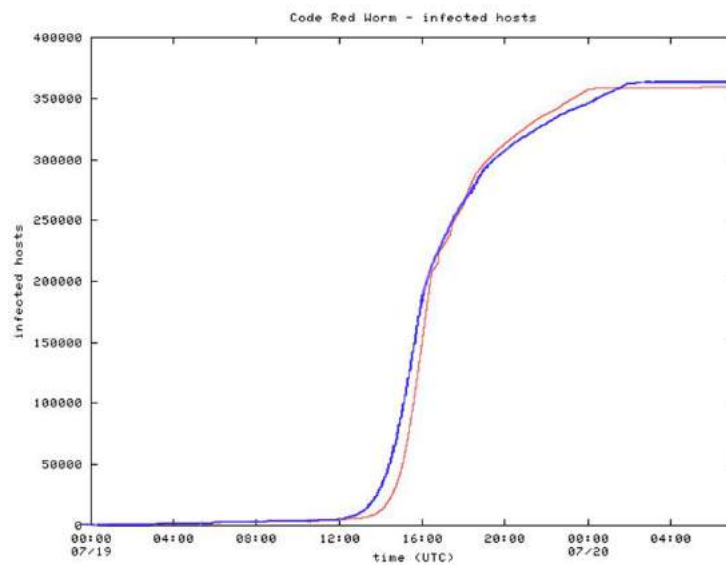


Рисунок 4.10 – Мультиагентна модель розповсюдження хробака Code Red (синій) і реальні дані розповсюдження хробака Code Red (червоний)

Результати даного дослідження дозволяють висунути гіпотезу про те, що для невникнення епідемії часовий ряд, який відповідає кількості заражених хабів, не повинен перевищувати деяке порогове значення [175]. Тобто динамічна система, яка описує мультиагентну модель, повинна бути відображенням кінцевої множини I в себе, $ABS:I \rightarrow I$, що для нелінійних відображень є ознакою хаотичної динаміки. Таким чином, актуальним є формування умов у відносинах підфункцій (4.11) – (4.13), за якими можна зробити висновок про стійкість динаміки мультиагентної системи.

4.2. Структура інтелектуальної інформаційно-аналітичної системи підтримки-прийняття рішень лікаря-епідеміолога

Для автоматизації роботи лікаря-епідеміолога пропонується впровадження інтелектуальної інформаційно-аналітичної системи підтримки-прийняття рішень зі структурою, запропонованою на рис. 4.11 – 4.12.

Система підтримки прийняття рішень лікаря епідеміолога містить модулі відповідно до механізмів передачі та конкретних захворювань. Моделі та методи, які використані в запропонованій системі, розроблені в рамках дисертаційного дослідження і наведені в роботі, а саме: інтелектуальні мультиагентні моделі динаміки захворюваності на дифтерійну інфекцію (розділ 4.5), грип та гострі респіраторні вірусні захворювання (розділ 4.3), сифіліс (розділ 4.6), ВІЛ-інфекцію (розділ 4.4), вірусний гепатит В (розділ 2.6), метод оперативного аналізу та побудови прогнозу захворюваності на грип та гострі респіраторні вірусні інфекції (додаток Д), спосіб епідеміологічної діагностики вірусного гепатиту В у лікувально-профілактичному закладі (додаток Е), модель динаміки захворюваності на іксодові кліщові бореліози (додаток Є), експертна система диференційованої діагностики інфекцій сечовидних шляхів (додаток Ж), програмний продукт типу «Reminder» для контролю тривалості застосування сечових катетерів (додаток З), спосіб епідеміологічної діагностики катетер-асоційованої

інфекції сечовивідних шляхів (додаток И), програмний продукт для автоматизованого аналізу рівня знань медичного персоналу щодо профілактики інфекцій, пов'язаних з наданням медичної допомоги (додаток І).

Впровадження інтелектуальної інформаційно-аналітичної системи підтримки-прийняття рішень лікаря-епідеміолога в систему охорони здоров'я України дозволить вжити своєчасних профілактичних та превентивних протиепідемічних заходів зі зниження захворюваності на інфекційні хвороби та уникнення епідемій на всіх рівнях.



Рисунок 4.11 – Структура інтелектуальної інформаційно-аналітичної системи підтримки-прийняття рішень лікаря-епідеміолога (Частина 1)

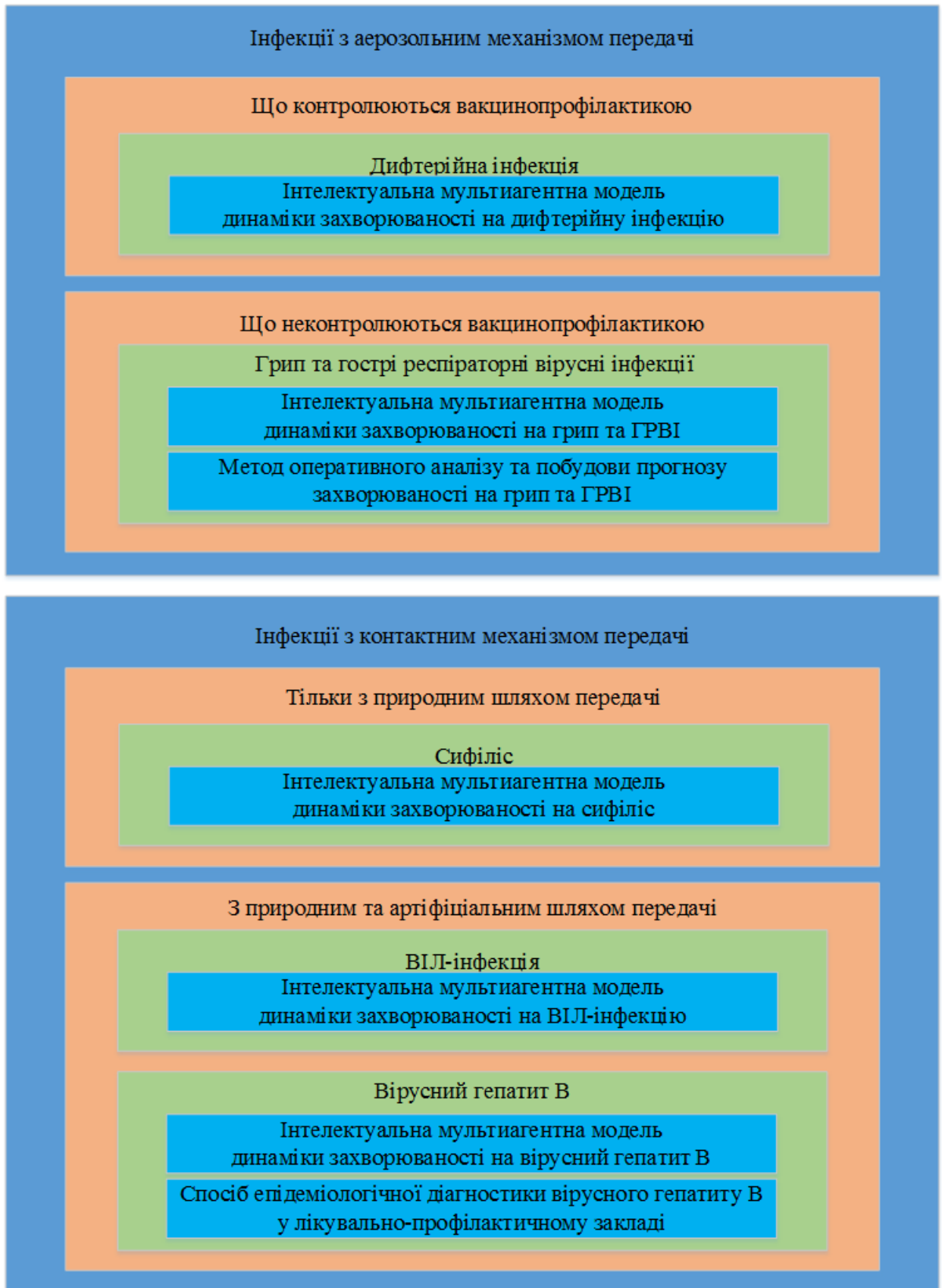


Рисунок 4.12 – Структура інтелектуальної інформаційно-аналітичної системи підтримки-прийняття рішень лікаря-епідеміолога (Частина 2).

4.3 Інформаційно-аналітична система динаміки моделі типу SEIR

На даний момент збільшення захворюваності на грип і гострі респіраторні вірусні інфекції (ГРВІ) є важливою проблемою. Одним з основних завдань є проведення профілактичних і протиепідемічних заходів. Своєчасне попередження несприятливої епідемічної ситуації не тільки врятує десятки тисяч людей від захворювання, а й допоможе уникнути незапланованих витрат у бюджеті [176].

4.3.1 Проблема захворюваності на грип і ГРВІ

Грип та інші ГРВІ – найбільш масові захворювання, що зустрічаються протягом усього року, але найчастіше – восени і взимку. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, ГРВІ займають перше місце в структурі інфекційних захворювань і становлять 80–90 % всієї інфекційної патології [177].

Грип – гостре інфекційне захворювання вірусної етіології, яке супроводжується ураженням верхніх дихальних шляхів. Грип знижує захисні сили організму, тому можуть виникати різні захворювання верхніх і нижніх відділів дихальних шляхів, центральної нервової системи, серця, нирок та інших органів. З урахуванням здатності грипу викликати щорічні епідемії і пандемії в масштабах всієї земної кулі, можна говорити, що грип – проблема світового значення. У період епідемії хворіє від 5 % до 20 % населення [178]. При пандемії, коли відбувається різка зміна властивостей вірусу, захворює кожна друга людина. Як правило, нові штами грипу вперше з'являються в Китаї та Південно-Східній Азії, а потім швидко поширюються по всьому світу.

Економічні збитки від грипу величезні, причому це збиток як для людини (втрачені робочі дні, витрати на ліки), так і для суспільства. Сезонні спалахи грипу приносять прямі і непрямі збитки на мільярди доларів [179].

Крім безпосередньої шкоди здоров'ю людини, грип здатний загострювати перебіг інших захворювань, що становить особливу небезпеку для людей з хронічними патологіями й ослабленою імунною системою – літніх, новонароджених, пацієнтів серцево-судинних клінік і т.п. Інші гострі респіраторні захворювання викликаються парагрипозними, респіраторно-синцитіальним, адено-, корона-, ентеро-, ріновірусами і іншими збудниками.

Надійно захиститися від цих захворювань можна, використовуючи специфічні (протигрипозні вакцини) і неспецифічні засоби захисту. Сучасні лікарські препарати дозволяють значно підвищити захисні сили організму і створити бар'єр на шляху проникнення респіраторних вірусів, у тому числі і грипу. Таким чином, на сьогоднішній день практика охорони здоров'я має в своєму розпорядженні достатньо широкий набір препаратів різного спектра активності і механізму дії, які можуть бути використані для лікування і профілактики ГРВІ. Їх правильне і своєчасне застосування може істотно знизити показники захворюваності на дані інфекції.

4.3.2 Налаштування інтелектуальної мультиагентної моделі

Розроблена модель розповсюдження захворюваності на грип і ГРВІ ґрунтується на традиційній моделі SIR з її розширенням шляхом додавання стану Exposed (E) – люди, що знаходяться в інкубаційному періоді [180]. Для грипу і ГРВІ агенти знаходяться в інкубаційному періоді від 1 до 14 днів. Схему переходів між станами моделі показано на рис. 4.13.

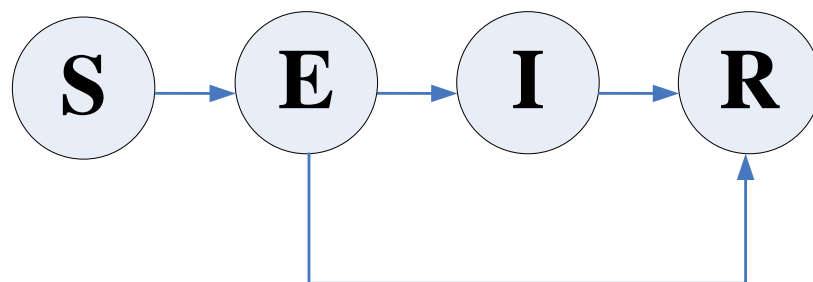


Рисунок 4.13 – Схема зміни станів у моделі розповсюдження грипу і ГРВІ.

Динаміка моделі може бути описана такою схемою диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS}{dt} = -\beta \frac{I}{N} S(t), \\ \frac{dE}{dt} = \beta \frac{I}{N} S(t) - (\alpha + k)E(t), \\ \frac{dI}{dt} = \alpha E(t) - \gamma I(t), \\ \frac{dR}{dt} = kE(t) + \gamma I(t). \end{array} \right. , \quad (4.15)$$

де N – кількість всіх агентів мережі;

$S(t)$ – кількість сприйнятливих агентів в момент часу t ;

$E(t)$ – кількість агентів, що знаходяться в інкубаційному періоді в момент часу t ;

$I(t)$ – кількість інфікованих агентів в момент часу t ;

β – швидкість інфікування; α – швидкість переходу агента зі стану інкубаційного періоду;

k і γ – швидкості лікування.

Також пропоновану структуру мультиагентної моделі можна розширити шляхом додавання стану Dead (D) – агенти, які померли внаслідок захворювання. Однак, оскільки відсоток смертності від грипу і ГРВІ досить низький у порівнянні з показником смертності від інших хвороб, даним уточненням моделі можна знехтувати [181].

В даному налаштуванні моделі визначено два типи агентів:

- агент – людина: кожен агент моделює поведінку однієї людини;
- агент – локація: локація є навколишнім середовищем для агента і моделює місцезнаходження, в якому розповсюджується інфекція.

Крім того, агенти–люди розрізняються за віком. За даною властивістю, згідно з інформацією, що збирається статистикою та даними, прийнятими щодо захворюваності на грип і ГРВІ, в моделі виділено п'ять вікових груп:

- від 0 до 4 років;
- від 5 до 14 років;

- від 15 до 24 років;
- від 25 до 54 років;
- 55 років і старші.

Вікові групи визначають імовірність контакту з іншими агентами. Такі висновки пов'язані з гіпотезою про те, що діти і люди похилого віку контактують з меншою кількістю людей, ніж молодь. Частка розподілу агентів за віковими категоріями визначається демографічними даними і залежить від території, що моделюється.

Динаміка моделі описується сукупними діями агентів, а також подіями, що породжуються ними. Правила взаємодії агентів описані системою (4.15). Події переходів генеруються агентами. Параметри тривалості станів агентів узгоджуються з характеристиками хвороби. Ймовірності переходів і взаємодій між агентами підлаштовані під розроблену модель на основі результатів проведених експериментів.

Перебуваючи в одній локації, агенти контактують між собою. Результатом контакту між хворим і здоровим агентом може бути інфікування здорового агента. Територія, що моделюється, розбита на окремі комірочки. Для зниження обчислювальної складності моделі, контактом між агентами вважається належність їх одній комірці.

Процеси розробленої моделі налаштовуються параметрично в ході налаштування і калібрування процесу моделювання. У разі якщо в початковий момент часу всі агенти будуть перебувати у стані «Susceptible», тобто будуть здорові, то хворі агенти не з'являться і моделювання захворюваності не відбудеться. Тому в початковий момент модельного часу необхідно, щоб у моделі були присутні і хворі агенти, тобто у станах «Exposed» та «Infected».

Результатом роботи моделі динаміки захворюваності на грип і ГРВІ є рівень захворюваності: відсоток сприйнятливих, хворих і агентів, що видужали в кожен момент модельного часу.

4.3.3 Програмна реалізація інтелектуальної мультиагентної моделі

Прототип інтелектуальної мультиагентної моделі динаміки захворюваності на грип і ГРВІ розроблено на мові NetLogo (рис. 4.14) [182]. NetLogo – це кросплатформна середовище моделювання, заснована на мові Logo. Але незважаючи на це NetLogo дозволяє використання сторонніх процедур, написаних на інших мовах програмування, наприклад, Java. Мова Logo створювалась з метою навчати дітей за допомогою комп'ютера. Так і NetLogo залишається середовищем моделювання, орієнтованим на навчання, тому придатна для побудови переважно нескладних моделей, хоча і дозволяє проводити їх повноцінний аналіз за допомогою сторонніх засобів.

Через неможливість роботи моделі в NetLogo з великою кількістю агентів кількісні дані і прогноз не відповідають фактичним. Незважаючи на це динаміка поведінки моделі збігається з реальною динамікою (рис. 4.15).

Для збільшення точності й отримання адекватних кількісних даних модель розповсюдження на грип і ГРВІ була реалізована на мові C# та має інтерфейс, що легко сприймається (рис. 4.16).

Крім моделювання і розрахунку прогнозу захворюваності в модель також включена можливість розрахунку епідемічних порогів захворюваності на грип і ГРВІ для зручної роботи й аналізу програмного продукту лікарями-епідеміологами. Методологічне забезпечення програмного комплексу прогнозування динаміки захворюваності на грип і ГРВІ [8] розглянута в додатку Д.

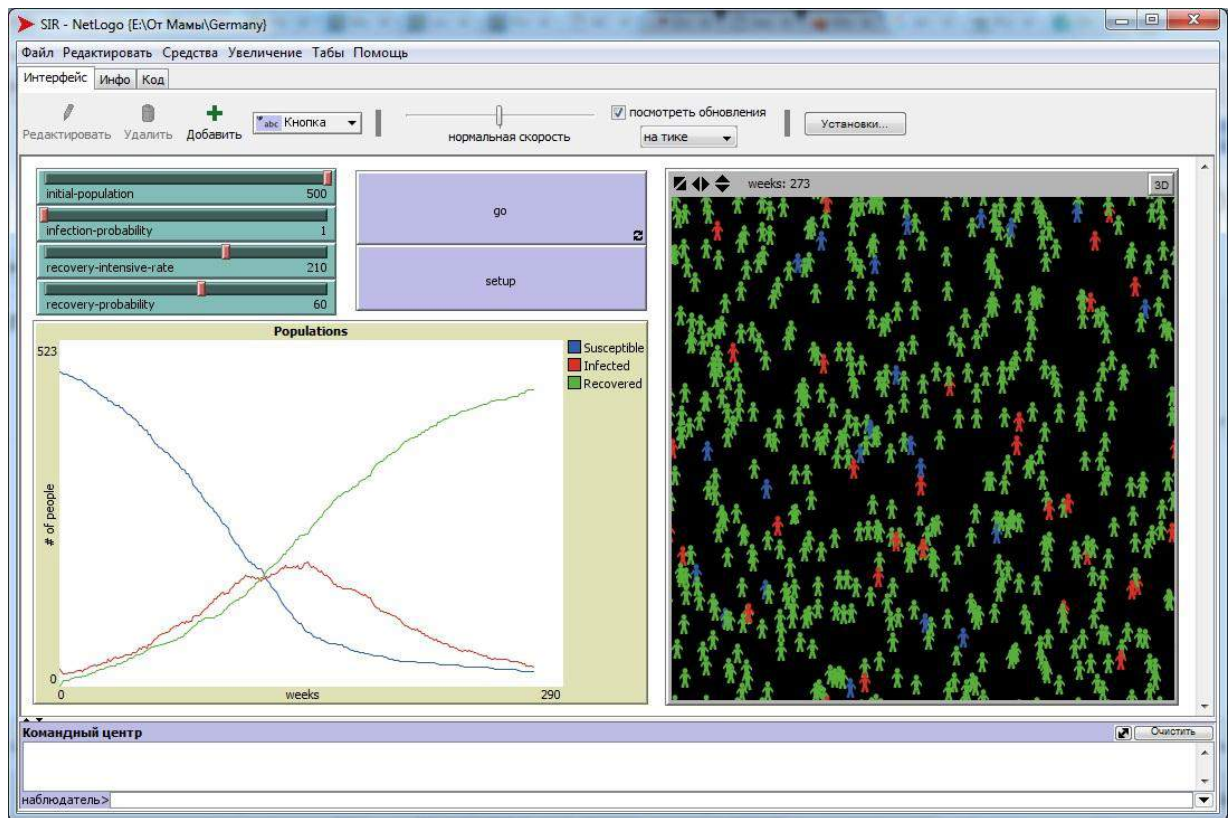


Рисунок 4.14 – Інтерфейс моделі розповсюдження захворюваності на грип і ГРВІ в NetLogo.

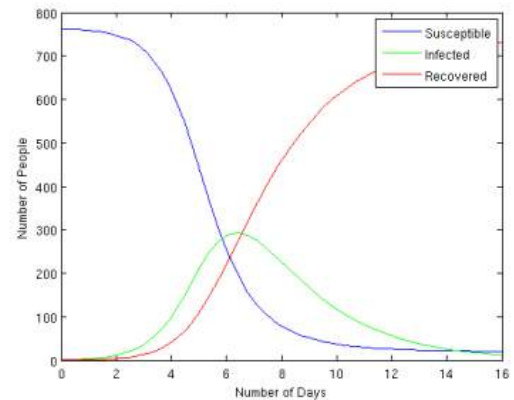
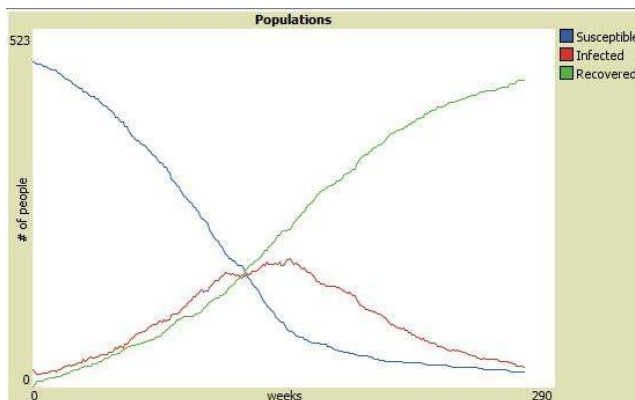


Рисунок 4.15 – Графік динаміки захворюваності на грип і ГРВІ в моделі NetLogo (зліва), динаміка захворюваності класичної моделі SIR, застосованої до грипу і ГРВІ (праворуч)

У продукті реалізовано такі функції:

- збір щоденних даних щодо захворюваності на грип і ГРВІ;
- розрахунок епідеміологічних порогів захворюваності на грип і ГРВІ у вигляді верхніх толерантних меж показників неепідемічної захворюваності;
- передача даних з районів у місто / область;
- формування звітів.

Користувач програмного продукту може бути двох рівнів: рівня району та рівня міста. Користувач рівня району щодня вносить статистичні дані щодо захворюваності на грип та ГРВІ по кожній з лікарень району та за допомогою FTP-сервера відправляє їх у міську установу, яка здійснює епідеміологічний нагляд. Таким чином, інформація збирається та систематизується в режимі реального часу, що дозволяє лікарям-епідеміологам вчасно провести адекватні заходи щодо попередження розвитку епідемії. Крім того, щодня оновлюється інформація про населення, закріплене за кожною лікарнею міста. Це дозволяє максимально коректно розрахувати епідемічні пороги захворюваності на грип і ГРВІ. Для адекватного визначення толерантних меж лікар-епідеміолог може відмітити епідемічні дані та програма автоматично (рис. 4.17) виключить їх з розрахунків [183].

Для запобігання втраті даних про захворюваність населення та толерантні межі в даний програмний комплекс була впроваджена можливість архівації баз даних (рис. 4.18).

Запропонований програмний комплекс вирішує поставлені задачі прогнозування динаміки захворюваності і розвитку епідемії грипу і ГРВІ, що значною мірою полегшує роботу лікарів-епідеміологів щодо профілактики та попередження епідемії даних захворювань.

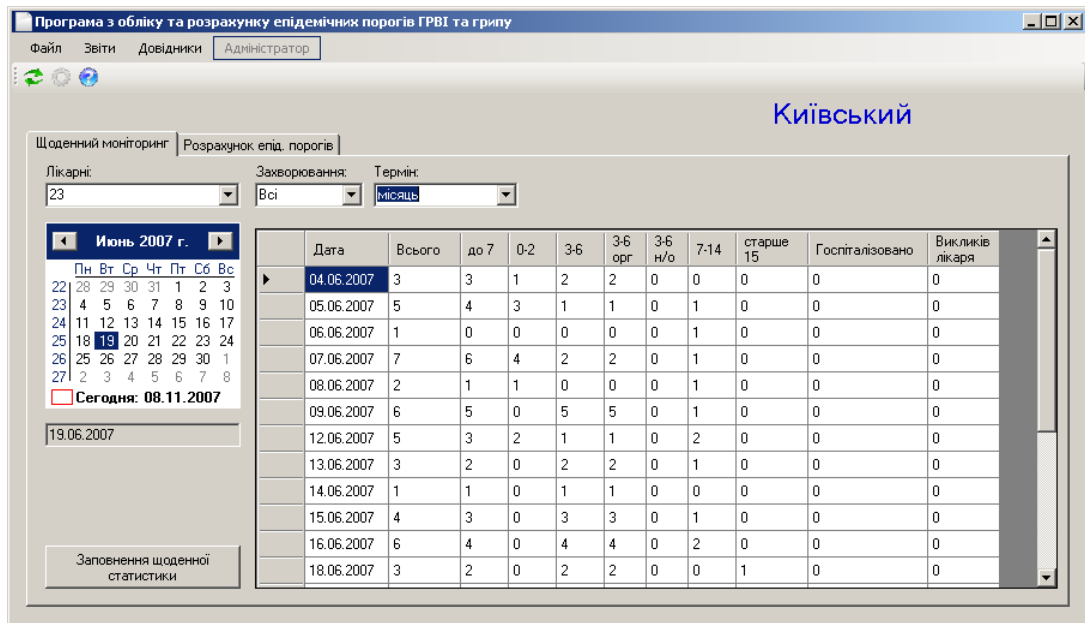


Рисунок 4.16 – Приклад інтерфейсу. Головне вікно роботи з програмою

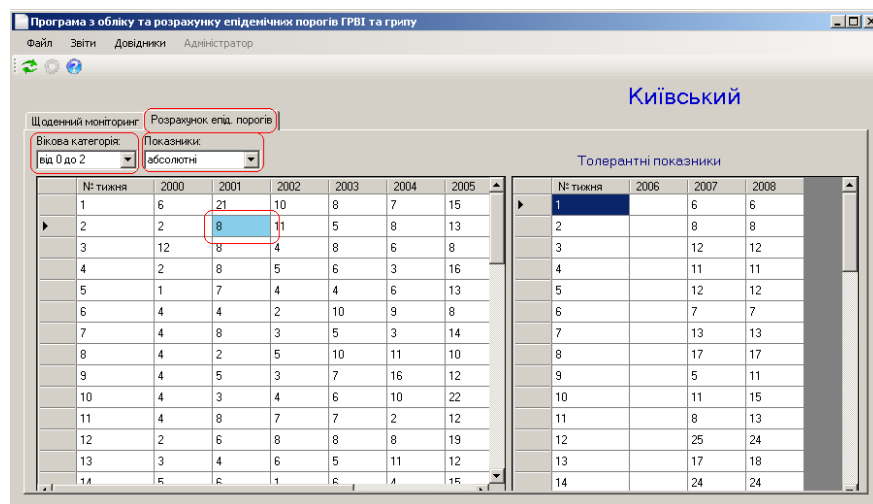


Рисунок 4.17 – Вікно розрахунку епідемічних порогів

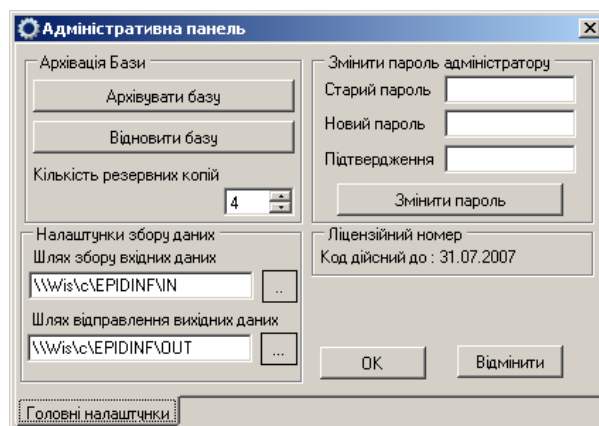


Рисунок 4.18 – Адміністративна панель архівування баз даних

Адекватність отриманих результатів перевірена на статистичних даних щодо захворюваності на грип і ГРВІ в м. Харків, Україна (рис. 4.19).

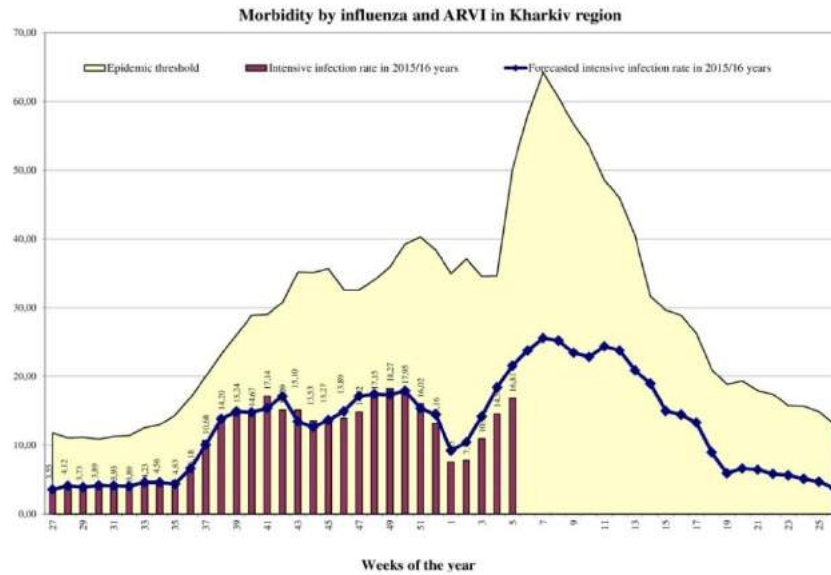


Рисунок 4.19 – Графік захворюваності на грип та ГРВІ на 10 000 населення (красна гістограма – реальний, синя крива – що моделюється)

Програмний комплекс впроваджено в міській та районних установах, які здійснюють епідеміологічний нагляд, м. Харкова з 2007 року, що дозволило провести своєчасні профілактичні заходи та попередити епідемічні підйоми захворюваності в м. Харкові.

4.4 Інформаційно-аналітична система динаміки моделі типу SICRD

4.4.1 Проблема захворюваності на ВІЛ-інфекцію

Починаючи з 1981 р., коли у світі було діагностовано перший випадок ВІЛ-інфекції, вже інфіковано 34 млн. людей. За даними Об'єднаної Програми ООН з ВІЛ / СНІДу (ЮНЕЙДС), в даний час пандемія ВІЛ-інфекції стабілізувалася, але на дуже високому рівні [184]. За десять місяців 2016 р. в Україні за даними Українського центру контролю за соціально небезпечними захворюваннями МОЗ України [185], був зареєстрований 13 381 новий випадок ВІЛ-інфекції (з них 2 349 дітей до 14 років). Усього з 1987 року в

Україні офіційно зареєстровано 293 739 нових випадків ВІЛ-інфекції, за цей час від СНІДу померло 40 816 людей. Найбільш уражені ВІЛ-інфекцією регіони – це Дніпровська, Донецька, Київська, Миколаївська та Одеська області, а також м. Київ.

Відсутність ефективних засобів лікування, вакцинації в даний час не дозволяє органам і установам охорони здоров'я України адекватним чином здійснювати епідеміологічний нагляд, проводити в повному обсязі комплекс заходів з протидії епідемії ВІЛ-інфекції. Сучасний напрямок стратегії боротьби з ВІЛ-інфекцією визначається науково-обґрунтованою системою оцінювання епідеміологічної ситуації щодо ВІЛ-інфекції за допомогою математичних моделей, які з великою вірогідністю можуть виявити закономірності епідеміологічного процесу, прогнозувати очікуваний рівень захворюваності. В даний час Всесвітня організація охорони здоров'я використовує три математичні моделі для отримання оціночних даних: «Програмний пакет для оцінки і прогнозування (ПОП)», «Робочий журнал», програму «Спектрум» [186]. Дані моделі дозволяють якоюсь мірою отримувати орієнтовні оцінки, що стосуються зміни показника розповсюдження ВІЛ-інфекції в часі, кількість людей, що живуть з ВІЛ, нових випадків інфекцій і смертей унаслідок СНІДу, дітей, осиротілих у результаті СНІДу, потреб у лікуванні. Однак параметри, що становлять основу даних моделей, істотно потребують корекції з урахуванням епідеміологічних і соціологічних досліджень на конкретних територіях. Вирішити ці недоліки дозволяє розроблена в рамках даного дослідження інтелектуальна мультиагентна модель динаміки захворюваності на ВІЛ-інфекцію.

4.4.2 Налаштування інтелектуальної мультиагентної моделі

На основі універсальної інтелектуальної мультиагентної моделі, яку розглянуто в розділі 4.2, розроблено імітаційну модель розповсюдження ВІЛ

інфекції та визначено правила взаємодії агентів. У моделі прийняті такі основні допущення: існує ймовірність взаємодії будь-якого агента з будь-яким іншим з системи; одиницею часу є одна ітерація, відлік часу починається з нуля ітерацій, крок часу дорівнює одиниці; всі агенти розбиваються на типи, для кожного типу об'єктів визначається система правил. Схему переходів між станами моделі показано на рис. 4.20.

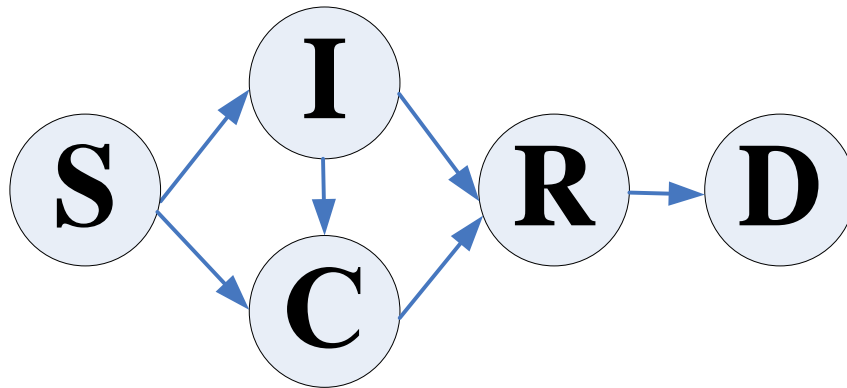


Рисунок 4.20 – Схема зміни станів у моделі розповсюдження ВІЛ-інфекції

Властивості агента:

- тип агента (розсудливий і нерозсудливий);
- час найближчої події: t ;
- вік агента: t_{old} ;
- локація, в якій знаходиться агент: $current_location$;
- тип найближчої події (смерть, перехід у заражену зону, перехід у безпечну зону або народження);
- позиція агента в локації;
- статус агента щодо хвороби (0 – здоровий, 1 – хворий).

Агенти в системі – об'єкти із загальним набором властивостей, але індивідуальними числовими значеннями. Вони відрізняються за типом, кожен з яких має свою лінію поведінки. Правила поведінки задаються початковими ймовірностями, які залишаються незмінними до закінчення роботи програми.

Локації являють собою одномірні динамічні масиви, розмір кожної задається і максимально може дорівнювати загальній кількості агентів у

системі. Зони містять кількість агентів, які перебувають у них у даний період часу, їхні номери, комірки (індекси масиву) з зараженими полями, а також ідентифікатор «зайнятості» комірки. В одному місці локації може перебувати не більше одного агента.

Система являє собою динамічний масив агентів. У ній задаються всі числові характеристики локацій, такі як геометричні розміри (довжина масиву), також відбувається створення кожного з агентів зі своїми унікальними наборами властивостей.

Властивості системи:

- середній вік агента: $MaxAge$;
- кількість агентів, що обробляється за одну ітерацію;
- ймовірності (різні для кожного типу агентів):
- глобальний час системи.

Вхідні дані розподіляються на два типи: початкові дані для управління системою і дані, що описують індивідуальні властивості агентів.

Параметри для роботи системи: загальна кількість агентів у системі, кількість агентів, що обробляється за одну ітерацію, кількість заражених зон, максимальний вік агента.

В даному випадку на унікальні властивості агентів впливають ймовірності переходу з однієї локації в іншу відповідно до типу [187]:

- $HealthyInRisk$ – будучи здоровим перейти в зону ризику;
- $SickInRisk$ – будучи хворим перейти в зону ризику;
- $SickInHosp$ – згода на госпіталізацію;
- $HealthOnHosp$ – успішний результат лікування.

Запропонована система належить до категорії біоморфних мультиагентних систем і являє собою набори агентів з архітектурою

$$Ag_i = (shmP_i, M_i), \quad (4.16)$$

де $shm P_i$ – схема агента, що визначає його внутрішню структуру;

M_i – метод агента, який визначає його поведінку.

Початкове положення агента *current_location* дорівнює 0, тобто всі агенти знаходяться в безпечній зоні. При старті роботи системи відбувається випадкове надання типу найближчої події кожному агенту згідно з початковими ймовірностями, і його часу у відрізок від 0 до *MaxAge* (в ітераціях). Основною ідеєю, що реалізовує мультиагентний підхід, є апарат подієвого моделювання. Це досягається за рахунок реалізації турнірного алгоритму, або алгоритму побудови хіпа (імпліцитної купи). У ньому знаходяться номери (індекси масиву) агентів – *ind_treat*. Після рандомізації часу і типу найближчого події ведеться початкова побудова купи. Хіп може бути побудований тільки для 2^m об'єктів. У разі, якщо ж загальна кількість агентів не становить ніякого степеня двійки, масив (хіп) доповнюється фіктивними елементами, час яких свідомо великий. Подієва структура в даному випадку служить лише для стеження за скоординованим часом. На вершині хіпа виявляється агент з мінімальним (тобто з найближчим) часом події. Далі здійснюється обробка даної події для агента *ind_treat*, тобто перехід з поточної локації в ту, яка передбачена даною подією. У свою чергу, поточної локацією (*current_location*) стає локація, в яку перейшов агент. Даному агенту присвоюється новий тип найближчої події і новий, випадковий час. Потім хіп перебудовується заново. Зазначена обробка здійснюється за допомогою блоку *switch()* і умовних операторів. Ймовірності реалізовані застосуванням генерації випадкових чисел *Random*. Оскільки рандомізація має рівномірний розподіл, то необхідна ймовірність досягається шляхом генерації випадкового числа в межах від 0 до $1/P_i$, де P_i – конкретна задана ймовірність.

Дані переходи можуть спричинити зміну статусу агента. Наприклад, якщо агент перейшов у небезпечну зону на комірку, що заражена, то його статус зміниться з 0 на 1, звичайно, якщо він не був хворим до цього.

Алгоритм реалізує можливість взаємодії агентів між собою. Кожен раз, коли агент *ind_treat* потрапляє в нову *current_location*, йому буде присвоєно випадково обраний індекс у межах розмірності масиву, що представляє

локацію. Якщо ж індекс масиву виявився вільним, то туди вставляється номер поточного агента. В іншому випадку відбувається взаємодія агента *ind_treat* з агентом, що знаходиться за отриманим індексом в *current_location*, назвемо його *find_agent*. Приклади взаємодій двох агентів в залежності від їх статусу подано в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Приклад взаємодії двох агентів

Статус агентів			
до взаємодії		після взаємодії	
ind_treat	find_agent	ind_treat	find_agent
1	0	1	1
1	2	1	2
0	2	0	2
1	1	1	1
0	0	0	0

Після взаємодії агентів, агент *ind_treat* отримує новий індекс для переміщення й обробка переходу в зазначену локацію починається заново.

Програма моделює взаємодії агентів між собою і зовнішнім середовищем до тих пір, поки не буде подана зовнішня команда, що означає зупинку процесу.

4.4.3 Інтерполяція результатів моделювання

Для застосування отриманих при моделюванні результатів на практиці були використані інтерполяційні методи. У цьому виникає необхідність, оскільки для дослідження динаміки розповсюдження ВІЛ-інфекції необхідно і дуже важливо знати кількість заражених у будь-який довільний період часу. Отже, потрібно оперувати значеннями функції, що імітує кількість заражених

особин, у проміжних точках (не вузлових), іншими словами в моменти часу, в яких не проводилося моделювання, оскільки модель використовує дискретне уявлення часу. Це є визначенням операції інтерполяції цільової функції, в даному випадку функції кількості заражених (здорових або ж померлих людей). Для даного випадку необхідно було застосувати інтерполяційні поліноми для функції двох змінних. Відповідно до моделі захворюваності на ВІЛ-інфекцію були взяті два інтерполяційних поліноми: Ньютона і Лагранжа.

Формула Ньютона для функцій двох змінних, інакше інтерполяційний поліном Ньютона, являє собою клас методів, заснованих на наближенні функцій многочлена n -го степеня. Дана формула, так само як і в разі білінійної інтерполяції, може бути отримана безпосередньо з полінома Ньютона для одновимірного випадку [188].

Для функції, заданої подвійною таблицею (матрицею) $\{z\}$, можна визначити часткові кінцеві різниці:

$$\Delta_x z_{ij} = z_{i+1,j} - z_{ij} \text{ та } \Delta_y z_{ij} = z_{i,j+1} - z_{ij}. \quad (4.17)$$

Повторно застосовуючи ці операції, отримаємо подвійні різниці вищих порядків: $\Delta^{m+n} z_{ij} = \Delta_{x^m y^n}^{m+n} z_{ij} = \Delta_{x^m}^m (\Delta_{y^n}^n z_{ij}) = \Delta_{y^n}^n (\Delta_{x^m}^m z_{ij})$, де $\Delta^{0+0} z_{ij} = z_{ij}$.

Використовуючи різниці функції двох змінних $z = f(x,y)$, можна побудувати інтерполяційний поліном, аналогічний інтерполяційному поліному Ньютона. Для зручності обчислень зазвичай вводять змінні:

$$\frac{x - x_0}{h} = p \text{ та } \frac{y - y_0}{k} = q \quad (4.18)$$

Звідси формула Ньютона приймає вигляд:

$$z \approx z_0 + (p \Delta^{1+0} z_{00} + q \Delta^{0+1} z_{00}) + \frac{1}{2!} \left[p(p-1) \Delta^{2+0} z_{00} + 2pq \Delta^{1+1} z_{00} + \right. \\ \left. + q(q-1) \Delta^{0+2} z_{00} \right] + \dots \quad (4.19)$$

де $x = x_0 + ph$, $y = y_0 + qk$.

При реальних задачах матриця значень цільової функції може досягати розмірності в кілька сотень, а то і тисяч, і точне обчислення факторіала таких чисел не видається можливим. Для цього використовують наближені формули підрахунку факторіала, наприклад, формулу Стірлінга, але це спричиняє збільшення похибки.

Ще одним широко поширеним методом для інтерполяції функцій двох змінних є інтерполяційний поліном Лагранжа [188]. В ній решітка утворена перетином прямих $x = x_n$, $n = 0, \dots, N$; $y = y_m$, $m = 0, 1, \dots, M$; $f_{nm} = f(x_n, y_m)$ – значення функції у вузлі $\{x_n, y_m\}$. Скористаємося, наприклад, апаратом кусково-багаточленної інтерполяції. Для цього спочатку реалізуємо кусково-багаточленну інтерполяцію заданого степеня по x на кожній прямій y . Потім при кожному значенні x реалізується кусково-лінійна інтерполяція по y з урахуванням значень функції, отриманих на першому кроці. Так, у разі інтерполяції по обох змінних, цей метод приводить до інтерполяційного многочлена такого вигляду:

$$F(x, y) = f_{nm} \frac{(x - x_{n+1})(y - y_{m+1})}{(x_n - x_{n+1})(y_m - y_{m+1})} + f_{n+1,m} \frac{(x - x_n)(y - y_{m+1})}{(x_{n+1} - x_n)(y_m - y_{m+1})} +$$

$$+ f_{n+1,m+1} \frac{(x - x_n)(y - y_m)}{(x_{n+1} - x_n)(y_{m+1} - y_m)} + f_{nm+1} \frac{(x - x_{n+1})(y - y_m)}{(x_n - x_{n+1})(y_{m+1} - y_m)} \quad (4.20)$$

Подібним чином можна провести послідовну інтерполяцію за Лагранжем, але при кожному фіксованому значенні n з урахуванням першого кроку інтерполяції

$$L_{NM}(x, y) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M f_{nm} \prod_{\substack{i=0, \\ i \neq n}}^N \prod_{\substack{j=0, \\ j \neq m}}^M \frac{(x - x_i)(y - y_j)}{(x_n - x_i)(y_m - y_j)} \quad (4.21)$$

На відміну від інтерполяційного полінома Ньютона, формула Лагранжа не має обмежень щодо кількості вузлів інтерполяції, а точніше, збільшення кількості вузлів не тягне за собою істотного збільшення обчислень, оскільки не потрібно розраховувати факторіал.

4.4.4 Програмна реалізація інтелектуальної мультиагентної моделі

Програмна реалізація моделі виконана в середовищі розробки Visual Studio 2013 на мові програмування C#.

При запуску програми буде відкрито вікно введення початкових даних. На верхній панелі розташовано меню навігації по програмі, яке має три вкладки: «Початкові дані», «Робота системи» та «Графік». Користувач може самостійно в будь-який час переходити з однієї вкладки меню на іншу, але працювати з системою стане можливим тільки після коректного введення початкових параметрів. При неправильному введенні даних з'явиться відповідна піктограма, при наведенні курсору на яку можна дізнатися причину і тип помилки. Деякі елементи управління можуть бути недоступні в той чи інший момент – це означає, що користувач не справив необхідних підготовчих дій, про вид яких буде повідомлено в полі виведення числової статистики роботи системи, у вкладці «Робота системи». Кожен елемент програмного інтерфейсу має підпис, що позначає призначення конкретного компонента управління. Вкладка меню навігації «Початкові дані» містить поля для введення числових значень початкових параметрів. «Робота системи» – вкладка для відображення в реальному часі перебігу захворювання. Крім того, там розміщені компоненти ручного управління процесом моделювання. Нарешті в останній опції меню розташовано поле виведення результату моделювання у вигляді графіка функції кількості агентів щодо їх стану, залежної від часу.

Вікна даного програмного продукту та інтерфейс з детальними поясненнями до основних елементів показано на рис. 4.21–4.23.

Блоки введення 3 і 4 на рис. 4.21 задають відповідні числові параметри для роботи моделі, згідно з уведеним користувачем даним. Елемент управління 1 – зберігає всі попередньо введені параметри, якщо ж у будь-якому полі була допущена помилка, то поруч з'явиться піктограма, що попереджає про помилку. Елемент управління 2 задає параметри за

замовчуванням, після натискання можна відразу ж побачити їх значення у відповідних полях. Значення числових параметрів за замовчуванням, не можна редагувати. Ці дані були спеціально підібрані для найбільш швидкого і наочного демонстрування роботи програми.

Щоб уникнути помилок при роботі програми, були введені обмеження на деякі елементи управління. Точніше за все кнопки в той чи інший момент часу можуть бути недоступні для використання. Це пов'язано з тим, що користувач міг некоректно або взагалі не ввести початкові дані. Також це може бути пов'язано з тим, що при початку нового моделювання не було зупинене поточне. Детальніше інформацію про причини виникнення даної ситуації можна знайти в полі 1 (рис. 4.22).

Вікно виведення остаточного результату роботи модельованої системи у вигляді графіка проілюстровано на рис. 4.23.

Рисунок 4.21 – Вікно введення початкових даних: 1 – кнопка збереження введених початкових даних; 2 – кнопка «задати всі початкові дані за замовчуванням»; 3 – поля для введення параметрів системи; 4 – поля для введення керуючих даних агентів

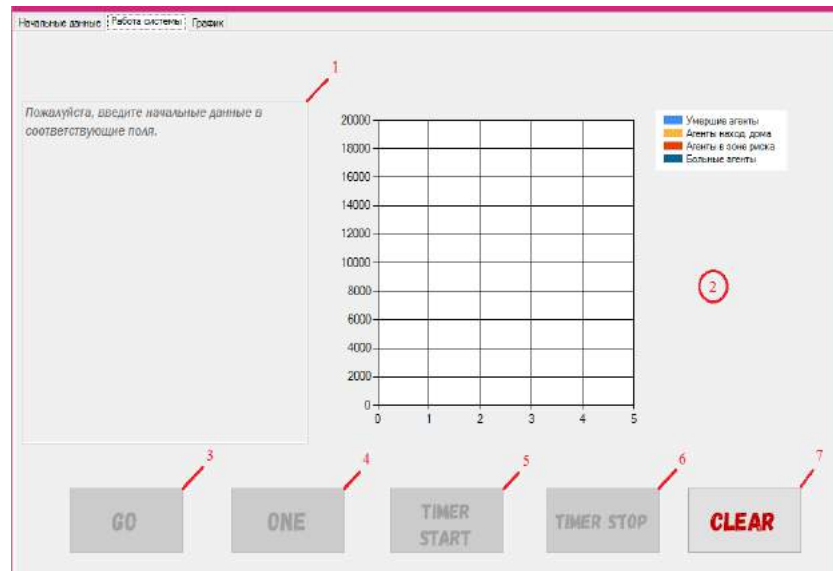


Рисунок 4.22 – Вікно роботи мультиагентної системи: 1 – поле виведення всієї інформації про кількість агентів у кожній локації; 2 – діаграма, що показує в реальному часі числові результати роботи програми; 3 – кнопка старту моделювання (не активна до введення початкових даних, як і 4, 5, 6); 4 – кнопка ручного управління моделюванням (одне натискання відповідає одній ітерації); 5 – кнопка запуску таймера (автоматичне керування моделюванням); 6 – кнопка зупинки таймера; 7 – кнопка очищення системи для введення нових керуючих параметрів

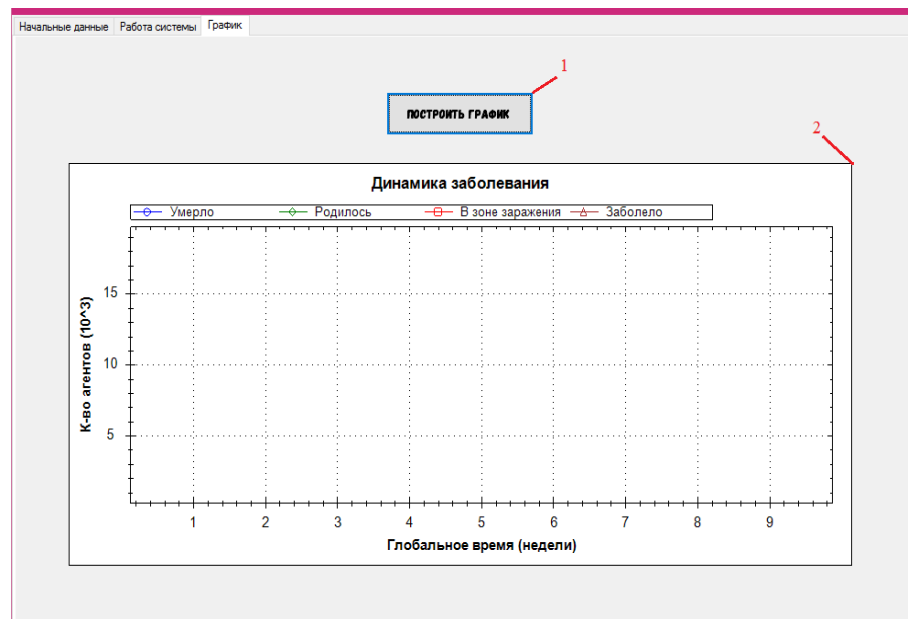


Рисунок 4.23 – Вікно подання результату: 1 – елемент управління, за допомогою якого ведеться побудування графіка за результатами моделювання; 2 – поле виведення графіка

За допомогою даного програмного продукту користувач може змоделювати і в реальному часі побачити динаміку розповсюдження епідемічного процесу ВІЛ-інфекції відповідно до початкових параметрів, що задані вручну.

Для тестування даного програмного продукту були перевірені кілька варіантів вхідних даних. При кожному наборі параметрів програма демонструвала хороші часові показники. Було відмічено, що на швидкість роботи впливають два фактори: загальна кількість агентів у системі і кількість агентів, що обробляється за одну ітерацію. Максимальне значення цих двох параметрів при тестуванні досягало 1 000 000.

Початкові ймовірності з переміщення агентів наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Числові значення керуючих параметрів

Ймовірності	Типи агентів	
	I = 0	I = 1
HealthyInRisk	0.1	0.9
SickInRisk	0.1	0.3
SickInHosp	0.9	0.4
HealthOnHosp	0.5	

Основні результати, отримані в процесі моделювання, демонструє рисунок 4.24.

Модель демонструє динаміку захворюваності на ВІЛ-інфекцію. Модель побудована на основі реальних статистичних даних щодо захворюваності на ВІЛ-інфекцію на території України. На рис. 4.24 видно «сплески» кількості захворілих агентів, після чого деяка частина з них померла. Ці хвилі мають тенденцію до повторення через приблизно рівні проміжки часу, що виявляється і в реальному житті. Якщо продовжити моделювання на більш довгий термін, то, незважаючи на зростаючу похибку, можна спостерігати тенденцію до зменшення кількості хворих у кожен епідемічний період.

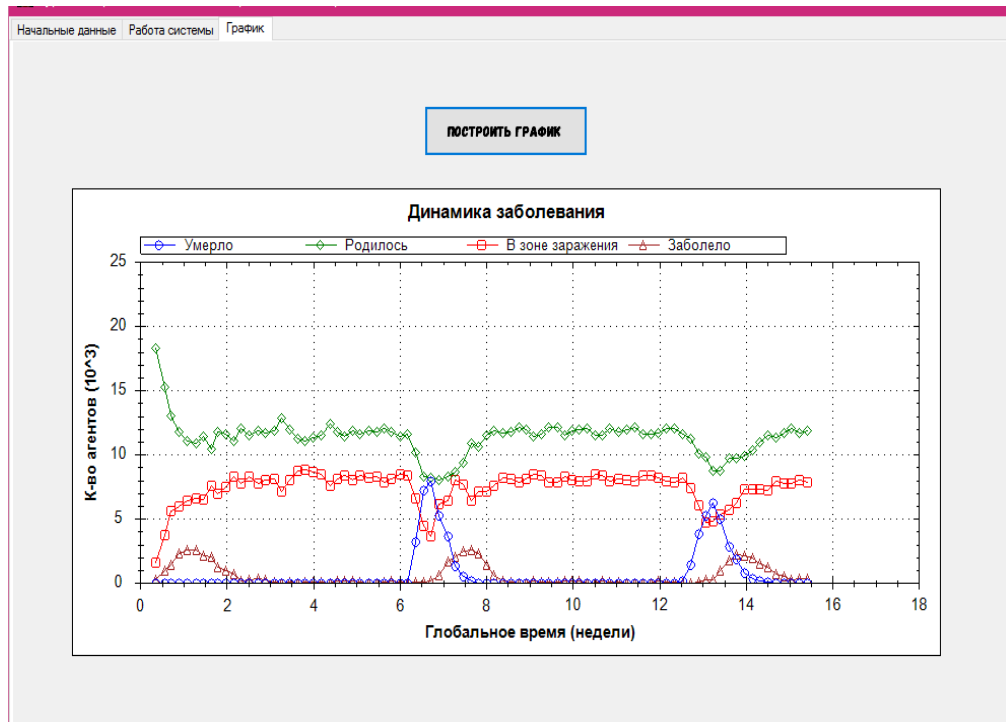


Рисунок 4.24 – Результат роботи інтелектуальної мультиагентної моделі захворюваності на ВІЛ-інфекцію

4.5 Інформаційно-аналітична система динаміки моделі типу SEICR

4.5.1 Проблема захворюваності на дифтерійну інфекцію

Дифтерія – інфекційне захворювання, що передається повітряно-крапельним шляхом. Характеризується запаленням найчастіше слизових оболонок рото- і носоглотки, а також явищами загальної інтоксикації, ураженням серцево-судинної, нервової та видільної систем. Супроводжується високою летальністю та тяжкими ускладненнями, що закінчуються інвалідністю [189].

На початку ХХ століття рівень захворюваності на дифтерію в Україні становив близько 1 000 на 100 тис. населення. Завдяки масовій імунізації з 1932 р., відзначено різке зниження захворюваності, найнижчий показник зареєстрований у 1976 р. – 0,02 на 100 тис. Однак відмови батьків від вакцинації дітей, необґрунтоване розширення протипоказань до проведення

планової імунізації, використання імунопрепаратів зі зниженим антигенним навантаженням призвели до поступового зниження напруженості колективного імунітету проти дифтерії, що, в поєднанні з триваючою циркуляцією збудника (носійство), сприяло розвитку епідемії в країнах Східної Європи, в тому числі і в Україні, починаючи з 1991 р.

4.5.2 Налаштування інтелектуальної мультиагентної моделі

Основними задачами даної мультиагентної системи є визначення відсотка населення, що підлягає обов'язковій імунізації для уникнення епідемії дифтерії, прогнозування розвитку захворювання, дослідження значущості впливу різних чинників, як медичних, так і соціальних, на зменшення кількості хворих, управління епідемічним процесом дифтерійної інфекції, а також оптимізація отриманих результатів та досягнення їх максимальної відповідності реальній ситуації.

Для моделювання розповсюдження захворюваності на дифтерію застосовувалася структура доповненої моделі типу SIR (рис. 4.25). У моделі використовувалися такі стани агентів: S (Susceptible) – здорові агенти, схильні до інфікування, E (Exposed) – агенти, що знаходяться в інкубаційному періоді, I (Infected) – інфіковані агенти, C (Chronic) – інфіковані агенти, стан яких перейшов у хронічне захворювання, R (Recovered) – агенти, що видужали та більш не піддаються захворюванню.

Для розв'язання поставлених задач використовувалася мультиагентна середа NetLogo (рис. 4.26), в якій була задана подана нижче структура моделі. Вхідними даними є: розмір популяції, кількість носіїв та кількість хворих з дифтерійною інфекцією, а також контагіозність (як даний параметр використовувалася середня швидкість населення в день).

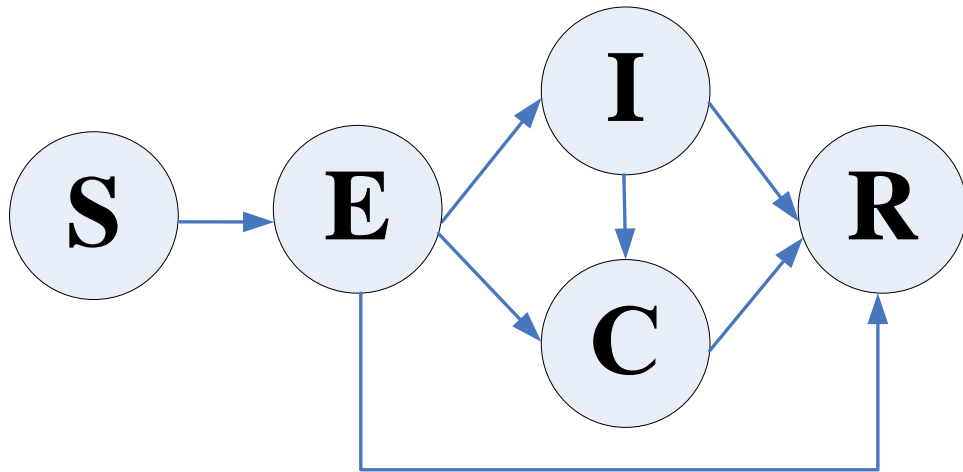


Рисунок 4.25 – Структура моделі розповсюдження захворюваності на дифтерійну інфекцію

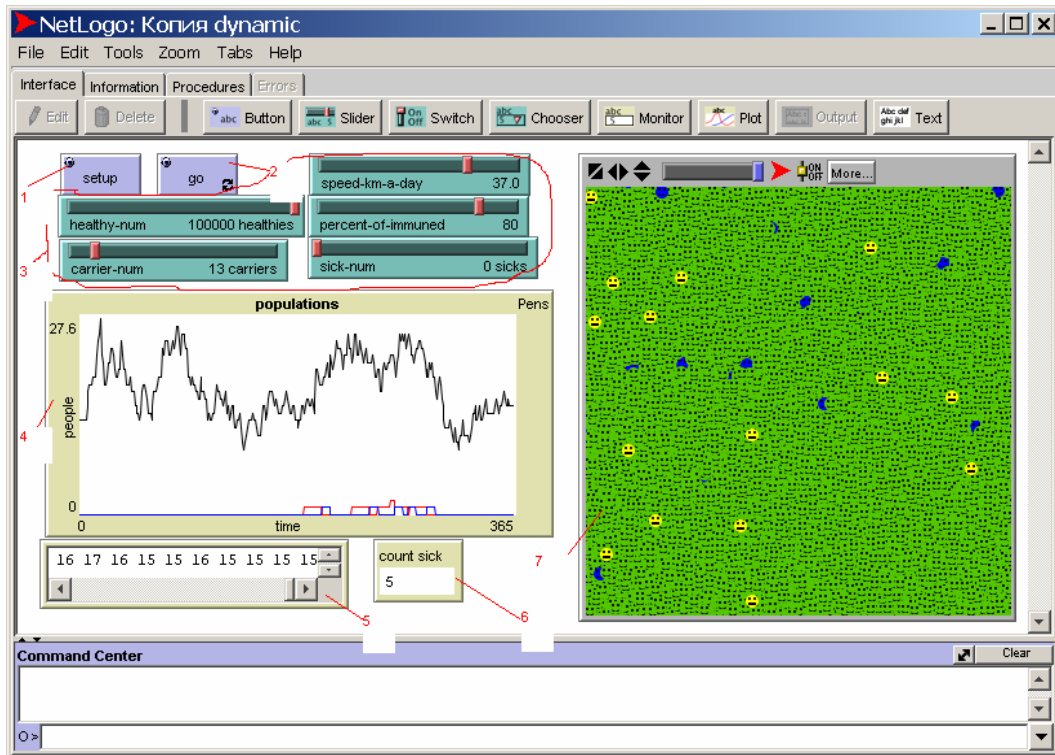


Рисунок 4.26 – Інтерфейс мультиагентної моделі прогнозування захворюваності на дифтерію:

1 – перезавантаження вхідних даних; 2 – запуск; 3 – регулювання вхідних даних; 4 – графік; 5 – кількість носіїв на кожен день; 6 – кількість хворих за весь період часу; 7 – екран

Розроблена інтелектуальна мультиагентна система являє собою набори агентів з архітектурою

$$Ag_i = \langle shmP_i, M_i \rangle, \quad (4.22)$$

де $shm P_i$ – схема агента, що визначає його внутрішню структуру;

M_i – метод агента, який визначає його поведінку.

У даній галузі пропонується виділити три множини (breeds) агентів (turtles): [healthy] – здорові, [carrier] – бактеріоносії і [sick] – хворі на дифтерію.

Нижче наведено опис відповідних схем.

breeds [healthy carrier sick]

turtles-own [age]

carrier-own [days]

healthy-own [immuned]

sick-own [days isolated],

де [age] – вік; [days] – час від моменту зараження, [immuned] – показник імунного захисту; [isolated] – показник ступеня ізольованості хворого

Метод агентів, що функціонують у вирішальній мережі, включає три підфункції: сприйняття, рішення та трансформування.

Підфункція сприйняття

$$Per : E \rightarrow A_{in} \quad (4.23)$$

забезпечує відбір інформації з середовища і присвоєння значень вхідним атрибутам – [age], [days], [immuned].

Підфункція рішення

$$Dec : A_{in} \rightarrow A_{out} \quad (4.24)$$

визначає значення вихідних змінних (isolated) за значеннями вхідних.

Підфункція трансформування

$$Tran : A_{out} \rightarrow E' \quad (4.25)$$

змінює стан середовища, виконуючи операції переказу елементів множин з одного в інше відповідно до правил, наведених нижче, а також видалення елементів множин.

Загальна структура системи може бути виражена шістькою

$$MAC = \{Ind, Prp, Atr, Inp, Out, Str\}, \quad (4.26)$$

де Ind – найменування системи; Prp – цілі системи; Atr – загальносистемні характеристики; Inp – вхід системи; Out – вихід системи; Str – структура системи. $Str = \{E, R\}$, де E – компоненти системи; R – зв'язки компонентів.

Найбільш прогресивною технологією реалізації методу є використання продукційних баз знань у вигляді нечітких моделей.

Нижче наведені нечіткі відносини, що визначають реалізацію функції (4.25) як найбільш значущої з точки зору взаємодії агентів:

$$\text{carrier: healthy} \rightarrow \text{sick}, \quad (4.27)$$

$$\text{carrier: healthy} \rightarrow \text{carrier}, \quad (4.28)$$

Наприклад, можна подати такі правила, які реалізують відносини (4.27), (4.28):

If carrier catches healthy with immuned is Low then healthy became carrier,

If carrier catches healthy with immuned is High then healthy became sick,

де Low та High – лінгвістичні змінні.

Результатом моделювання є дослідження часових рядів для мультиагентної системи з такими параметрами: розмір популяції – 100 000 осіб, носіїв дифтерійної інфекції – 1, хворих – 4, швидкість переміщення населення – 10 км/день. На графіках (рис. 4.27) наведено динаміку зміни загальної кількості хворих, а також кількості хворих, ізольованих у перші тридцять днів залежно від кількості імунозахищених. Вісь X – час у днях, вісь Y – кількість хворих, синій графік – кількість хворих, червоний – кількість ізольованих хворих.

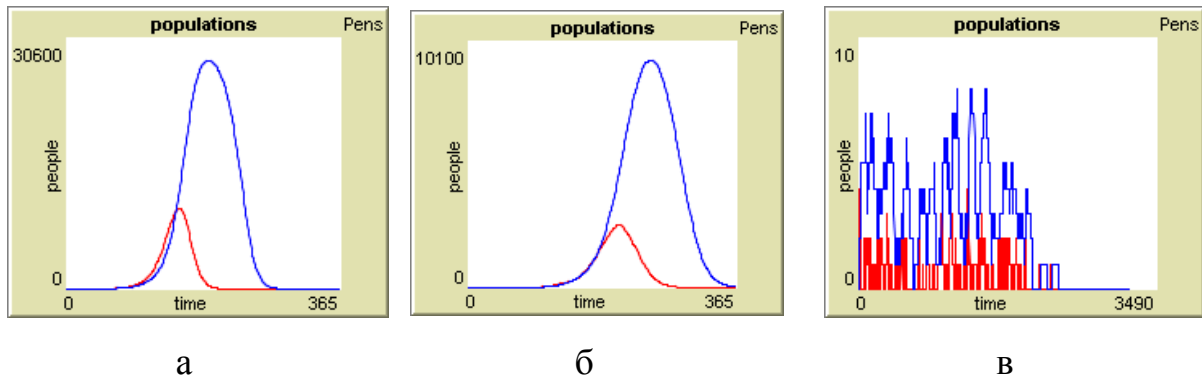


Рисунок 4.27 – Імітаційне моделювання системи 0 % імунозахисених (а); 50 % імунозахисених (б); 93 % імунозахисених (в)

Адекватність запропонованої моделі прогнозування динаміки розвитку захворюваності на дифтерію перевірена на реальній епідемічній ситуації по дифтерійній інфекції, яка склалася в Харківській області за останні шість років. Результати моделювання дозволяють визначити відсоток населення, що підлягає обов'язковій імунізації для запобігання епідемії.

4.6 Інформаційно-аналітична система динаміки моделі типу $SI_p I_s I_L I_T R$

4.6.1 Проблема захворюваності на сифіліс

Проблема прогнозування розвитку шкірно-венеричних захворювань є однією з найбільш актуальних у сучасному суспільстві через високу соціальну небезпеку захворювань такого роду. Ефективність застосування заходів, таких як профілактика здорового способу життя та ізоляція хворих, повинна оцінюватися як з гуманітарної, так і з економічної точки зору.

Для моделювання розповсюдження шкірно-венеричних захворювань був обраний сифіліс. Це системне венеричне інфекційне захворювання з ураженням шкіри, слизових оболонок, внутрішніх органів, кісток, нервової системи з послідовною зміною стадій хвороби. В Україні ситуація з захворюваністю на сифіліс після розпаду СРСР стала значно погіршуватися.

У 1991 році на 100 тис. осіб припадало 7,1 хворого, в 1998 році було вже 27,2 хворого на 100 тис. чоловік. У 2009 році даний показник дорівнював 52,2 особи на 100 тис. населення, тобто в порівнянні з початковим рівнем епідеміологічна ситуація погіршилася в 7,2 разу [7].

4.6.2 Налаштування інтелектуальної мультиагентної моделі

Для даного типу захворювання була налаштована універсальна інтелектуальна мультиагентна модель епідемічного процесу, розглянутого в розділі 2.2, але структура агентів була трохи доповнена, враховуючи специфіку шляхів передачі захворювання. Структура моделі подана на рис. 4.28. Тут S (Susceptible) – здорові агенти, сприйнятливі до захворювання; I_p (Infected Primary) – інфіковані агенти, що знаходяться в первинній стадії захворювання, I_s (Infected Secondary) – інфіковані агенти, які перебувають у вторинній стадії захворювання, I_L (Infected Latent) – інфіковані агенти, що знаходяться в латентній стадії захворювання, I_T (Infected Tertiary) – інфіковані агенти, що знаходяться в третинній стадії захворювання, R (Recovered) – агенти, що одужали.

Так, у даній моделі агенти мають такі характеристики:

infected?	якщо ТАК, агент хворий.
known?	якщо ТАК, агент знає, що хворий.
infection-length	як довго агент хворіє.
coupled?	якщо ТАК, агент має сексуального партнера.
couple-length	як довго агент має сексуального партнера.
commitment	як довго агент знаходиться в сексуальних відносинах з одним партнером.
coupling-tendency	кількість сексуальних партнерів агента.
condom-use	ймовірність використання засобів контрацепції.
test-frequency	кількість перевірок на захворювання за рік.
partner	агент, що є сексуальним партнером даного.

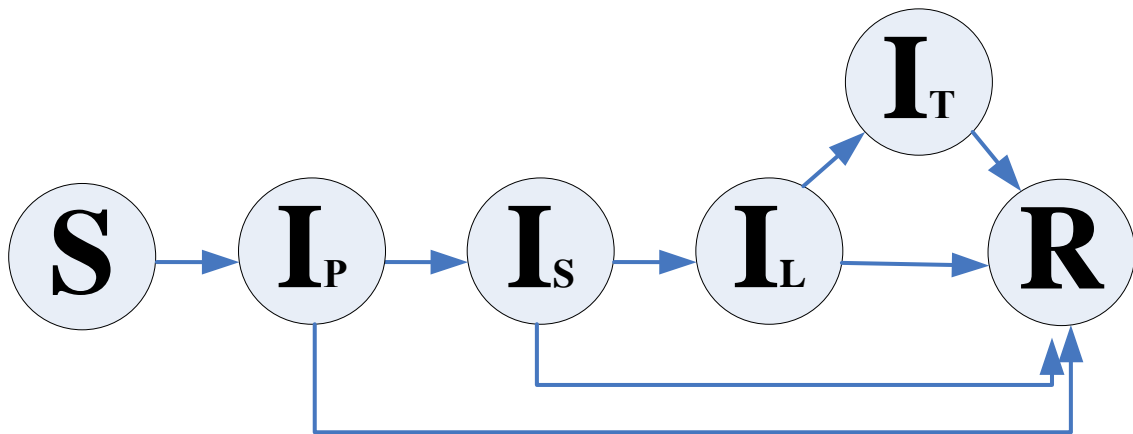


Рисунок 4.28 – Структура моделі розповсюдження захворюваності на сифіліс

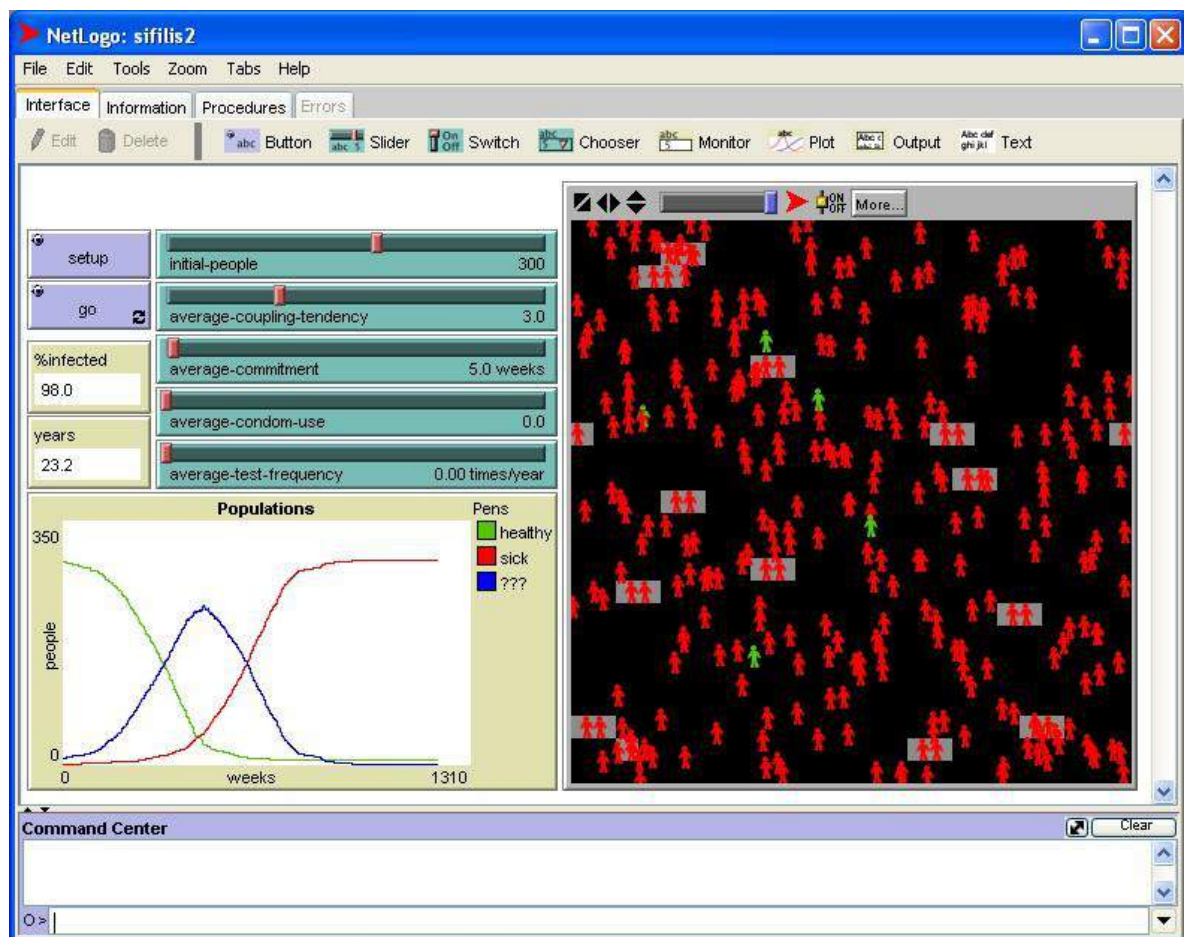


Рисунок 4.29 – Імітаційна модель розповсюдження захворюваності на сифіліс

Для представлення розвитку захворювання на сифіліс використане середовище моделювання NetLogo, що дозволяє створювати та досліджувати різні фактори, що впливають на розповсюдження захворювання. Імітаційну модель системи та результати моделювання з мінімальними значеннями керуючих змінних наведено на рис. 4.29.

У першу чергу, дана модель протестована на реальних даних по Харківській області. Наступний крок – визначення найбільш значущих чинників для прийняття рішень щодо методів профілактики захворювання. З цією метою незалежно один від одного проводилися експерименти з кожною керуючою змінною (від мінімального значення до максимального). Результати експериментів наведено на рис. 4.30. По осі x відкладено умовні значення факторів (від мінімального – 0 до максимального – 1), по вісі y – відсоток хворих. Синя крива – частота перевірок на захворювання, чорна – ізоляція хворих, червона – постійність сексуального партнера, зелена – використання засобів контрацепції, жовта – кількість змінюваних партнерів.

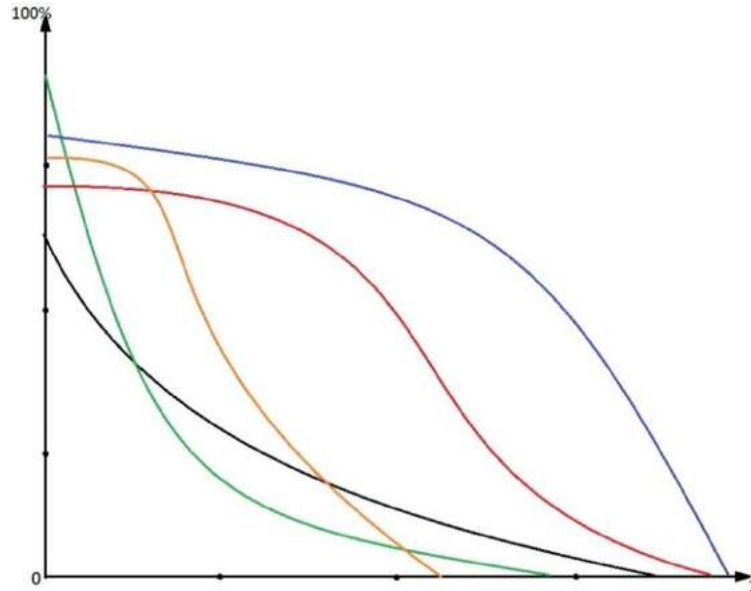


Рисунок 4.30 – Вплив різних факторів на зменшення захворюваності

Як видно з графіка, фактором, що найбільшим чином впливає на зменшення відсотка хворих, є частота перевірок на захворювання та ізоляція хворих, другим за значущістю фактором є постійність сексуального партнера, третім – використання засобів контрацепції та, нарешті, четвертим

– кількість змінюваних партнерів. Результати моделювання дозволяють визначити напрямки профілактики лікування сифілісу та головні чинники у зменшенні захворюваності. Як видно з результатів моделювання, соціальні чинники превалюють над медичними, що дає підстави для проведення роз'яснювальної політики в галузі охорони здоров'я серед населення, особливо молоді.

Висновки до четвертого розділу

1. Розроблено інтелектуальну мультиагентну модель розповсюдження шкідливого програмного забезпечення типу «комп'ютерний хробак» на прикладі вірусу Code Red. Реалізовано та досліджено моделі зі структурами SEIQR, SAIR, PSIDR та SAIDR. Результати дослідження побудованих моделей дозволяють висунути гіпотезу про те, що для невникнення епідемії шкідливого програмного забезпечення часовий ряд, що відповідає кількості заражених хабів, не повинен перевищувати деяке порогове значення.

2. Розроблено інтелектуальну інформаційно-аналітичну СППР лікаря-епідеміолога. Впровадження СППР у систему охорони здоров'я України дозволить вжити своєчасних профілактичних та превентивних протиепідемічних заходів зі зниження захворюваності на інфекційні хвороби та уникнення епідемій на всіх рівнях.

3. Розроблено інтелектуальну мультиагентну модель епідемічного процесу грипу та гострих респіраторних вірусних інфекцій. На засадах моделі реалізовано програмний комплекс, що включає збір щоденних даних щодо захворюваності на грип і ГРВІ, розрахунок епідеміологічних порогів захворюваності на грип і ГРВІ, передачу даних з районів у місто/область, та формування звітів. Запропонований комплекс вирішує задачі прогнозування динаміки захворюваності на грип і ГРВІ, що значною мірою полегшує роботу лікарів-епідеміологів щодо попередження епідемії даних захворювань.

4. Розроблено інтелектуальну мультиагентну модель епідемічного процесу ВІЛ-інфекції. Модель побудована на основі реальних статистичних даних щодо захворюваності на ВІЛ-інфекцію на території України. Результати імітаційного моделювання показують «сплески» кількості захворілих агентів. Ці хвилі мають тенденцію до повторення через приблизно рівні проміжки часу, що проявляється і в реальному житті. Спостерігається тенденція до зменшення кількості хворих у кожен епідемічний період.

5. Розроблено інтелектуальну мультиагентну модель епідемічного процесу дифтерійної інфекції. Модель побудована на основі реальних статистичних даних щодо захворюваності на дифтерію в Харківській області. Результати моделювання дозволяють визначити відсоток населення, що підлягає обов'язковій імунізації для запобігання епідемії.

6. Розроблено інтелектуальну мультиагентну модель епідемічного процесу сифілісу. Модель протестована на реальних даних по Харківській області. Результатами експериментів над побудованою моделлю є виявлення факторів, що впливають на зниження захворюваності на шкірно-венеричні захворювання, які дозволяють визначити напрямки профілактики лікування сифілісу та головні чинники у зменшенні захворюваності. Як видно з результатів моделювання, соціальні чинники превалюють над медичними, що дає підстави для проведення роз'яснювальної політики в галузі охорони здоров'я серед населення, особливо молоді.

7. На підставі розроблених інтелектуальних моделей і методів вирішено низку актуальних практичних задач інтелектуального моделювання епідемічних процесів систем популяційної динаміки. Результати побудованих моделей впроваджені в роботу ДУ «Харківський обласний лабораторний центр Міністерства охорони здоров'я України», КЗОЗ «Обласна дитяча клінічна лікарня», ТОВ «Протектмастер Солюшнс», КЗОЗ «Обласний спеціалізований будинок дитини «Зелений Гай».

Основні результати розділу опубліковано у працях [2, 7, 8, 12, 17, 27–30].

ВИСНОВКИ

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

1. Проведено аналіз існуючих підходів і методів моделювання процесів популяційної динаміки; розглянуто основні принципи інтелектуального імітаційного моделювання і його класифікацію, існуючі методи інтелектуального імітаційного моделювання систем популяційної динаміки. На основі проведеного аналізу сформовано мету і завдання дисертаційного дослідження.

2. Формалізовано клас епідемічних процесів популяційної динаміки, заснований на факторах і 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 за умов 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 та 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 над з методами, що існують. Вирішено актуальні практичні задачі інтелектуального моделювання епідемічних процесів систем популяційної динаміки. Результати дослідження впроваджені в роботу ДУ «Харківський обласний лабораторний центр Міністерства охорони здоров'я України», КЗОЗ «Обласна дитяча 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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. Тимофєєва, І. В. Чумаченка. – Харків : ФОП Панов А. М., 2016. – С. 368–379.
2. Chumachenko, D. Investigation of agent-based simulation of malicious software [Text] / D. Chumachenko, S. Yakovlev // ECONTechMOD : An International Quarterly Journal, Vol. 5, № 4. – 2016. – P. 61–67.
3. Чумаченко, Д. И. О нечетких рекуррентных отображениях при мультиагентном моделировании популяционной динамики [Текст] / Д. И. Чумаченко, С. В. Яковлев // Бионика интеллекта : Научно-технический журнал. – 2016. – №2 (87). – 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). – 2016. – Vol. 3, issue 5. – P. 20–24.
5. Чернышев, Ю. К. Оптимизация структуры событий для агентного моделирования эпидемического процесса [Текст] / Ю. К. Чернышев, А. В. Товстик, Д. И. Чумаченко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. – Харьков : Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского “Харьковский авиационный институт”, 2013. – Вып. 59. – С. 295–303.
6. Інформаційна технологія імітаційної системи епідемічного процесу [Текст] / Д. І. Чумаченко, Т. А. Чумаченко, Ю. К. Чернышев, А. В. Товстик // Клиническая информатика и телемедицина. Научно-методический журнал – 2012. – Т. 8, вып. 9. – С. 129 – 132.

7. Моделирование распространения дерматовенерологических заболеваний на основе мультиагентных технологий [Текст] / П. П. Рыжко, А. Ю. Соколов, Л. В. Рощенюк, Е. К. Чмыхун, Д. И. Чумаченко, А. А. Соколов // Клиническая информатика и телемедицина. Научно-методический журнал. – 2008. – Т. 4, Вып. 5. – С. 56–59.

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. Моделювання епідемічного процесу вірусного гепатиту В [Текст] / Т. О. Чумаченко, О. С. Коваленко, Д. І. Чумаченко [та ін.] // Медицина сьогодні і завтра. Науково-практичний журнал – 2011. – № 4 (53). – С. 145 – 149.

10. Найпростіша модель розповсюдження інфекційної хвороби з множинними шляхами передачі на основі ситуаційного моделювання [Текст] / Д. І. Чумаченко, Т. О. Чумаченко, В. І. Макарова [та ін.] // Проблеми військової охорони здоров'я : Збірник наукових праць Української військово-медичної академії.– К., 2012. – Вип. 35. – 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 : Міжнар. наук.-практ. конф. м. Київ, 24 – 25 грудня 2016 року : матеріали конф., частина II – К. : 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

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. – 2015. – Vol 7, № 1 – P.188. – ISSN 1947-2579, USA.– 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. – Institut für Prozesstechnik Prozessautomatisierung und Messtechnik, 2013. – P. 161–168.

15. Chumachenko, T. Multiagent Simulation of the Hepatitis B Epidemic Process [Text] / T. Chumachenko, D. Chumachenko, O. Sokolov // Online Journal of Public Health Informatics . – 2013. – Vol 5, № 1. – ISSN 1947-2579, USA. – P.178. – Access mode :

<http://ojphi.org/ojs/index.php/ojphi/article/view/4585/5021>.

16. 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. – Institut für Prozesstechnik Prozessautomatisierung und Messtechnik, 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 ASTMH Annual Meeting, November 3–7, 2010, Atlanta, Georgia, USA. – 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. – Institut für Prozesstechnik Prozessautomatisierung und Messtechnik, 2006. – P. 55–60.

19. Chumachenko, D. I. Application of fuzzy linguistic systems in epidemic process simulation [Текст] / D. I. Chumachenko // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2016. Всеукраїнська науково-технічна конференція : зб. матеріалів конференції. – Харків : Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2016. – С. 197.

20. Чумаченко, Д. І. Математичне моделювання соціально-економічних систем з використанням раціональних агентів [Текст] / Д. І. Чумаченко // Математическое моделирование процессов в экономике и управлении проектами и программами (ММП–2016). Международная научно-практическая конференция : труды конференции : – Харьков–Николаев, 2016. – С. 189–190.

21. Чумаченко, Д. И. Мультиагентное моделирование эпидемических заболеваний на примере гепатита В [Текст] / Д. И. Чумаченко // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ–2014 : Всеукраїнська науково-технічна конференція : тези доповідей. – Харків : Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2014. – Т. 2. – С. 6.

22. Чумаченко, Д. И. Применение алгоритма Takagi – Sugeno в решении задач математического моделирования [Текст] / Д. И. Чумаченко // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ–2007 : Всеукраїнська науково-технічна конференція : тези доповідей. – Харків : Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2007. – С. 167–168.

23. Спосіб прогнозування захворюваності на гепатит В за допомогою мультиагентного моделювання: інформаційний лист № 3-2014 ; Харківський національний медичний університет МОЗ України, Національний

аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут”, Укрмедпатентінформ МОЗ України. – К. : [Б.в.], 2014. – 4 с.

24. Патент № 90971 Україна, МПК (2014.01) А61В 10/00. Спосіб епідеміологічної діагностики вірусного гепатиту В у лікувально-профілактичному закладі / Чумаченко Т. О., Макарова В. І., Чумаченко Д. І. ; заявник і патентовласник Харківський національний медичний університет – № u201401729 ; Заявл. 24.02.14 ; опубл. 10.06.14 , Бюл. № 11.

25. А. с. 55118. 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. – Зареєстр. 02.06.14 ; опубл. 01.09.14, Бюл. №34.

26. А. с. 56462. 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. – Зареєстр. 11.09.14 ; опубл. 30.01.15, Бюл. №35.

27. А. с. 68480. Комп’ютерна програма «Мультиагентная модель динамики заболеваемости гриппом и ОРВИ «InfluenzaSim» / Чумаченко Д. І. – Зареєстр. 07.11.16.

28. А. с. 68481. Комп’ютерна програма «Мультиагентная модель динамики заболеваемости на сифилис «SyphilisSim» / Чумаченко Д. І. – Зареєстр. 07.11.16.

29. А. с. №68482. Комп’ютерна програма «Мультиагентная модель динамики заболеваемости на дифтерию «DiphtheriaSim»» / Чумаченко Д. І. – Зареєстр. 07.11.16.

30. А. с. 68849. Комп’ютерна програма «Мультиагентна система розповсюдження комп’ютерних хробаків у повнозв’язних гетерогенних мережах «MASWorm»» / Чумаченко Д. І., Чумаченко К. І. – Зареєстр. 29.11.16.

31. Сучасні методи та інформаційні технології математичного моделювання, аналізу і оптимізації складних систем [Текст] / [Ф. Г. Гаращенко, М. Ф. Кириченко, Ю. В. Крак та ін.]. – К. : ВПЦ «Київський університет», 2006. – 200 с.
32. Советов, Б. Я. Моделирование систем [Текст]: учеб. для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев — [3-е изд., перераб. и доп.] — М.: Высшая школа, 2001. – 343 с.
33. Doran, J. E. Simulating societies: an introduction [Text] / J. E. Doran // Simulating Societies: The Computer Simulation of Social Phenomena / N. Gilbert, J. E. Doran. – London : UCL Press, 1994. – P. 1–18.
34. Weisbuch, G. Market organization [Text] / G. Weisbuch, A. Kirman, D. Herreiner // Simulating Social Phenomena. – Berlin : Springer-Verlag, 1997. – P. 221–240.
35. Tschumatschenko, D. I. Die Computermodellierung der Logistischen Systeme [Текст] / D. I. Tschumatschenko // Сучасні проблеми ракетно-космічної техніки і технології : IV Науково-технічна конференція молоді та студентства : Харків, 15.05.07 : тези доповідей. – Харків : Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», 2007. – С. 94.
36. Борщев, А. От системной динамики и традиционного ИМ – к практическим агентным моделям: причины, технология, инструменты [Электронный ресурс] / А. Борщев – 2004. – Режим доступа : <http://gpss.ru/paper/borshevarc.pdf>. – 19.03.17.
37. Чумаченко, Д. И. Экономико-математическая модель спроса при наличии дефицита [Текст] / Д. И. Чумаченко // Интегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ–2009 : Міжнародна науково-технічна конференція : тези доповідей. – Т. 2. – Харків : Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2009. – С. 123.
38. Gilbert, N. Analyzing Tabular Data: Loglinear and Logistic Models for Social Researchers [Text] / N. Gilbert. – London : UCL Press, 1993. – P. 10-14.

39. Chumachenko, D. I. Imitation simulation of economic systems by the example of the model of demand with deficits [Text] / D. I. Chumachenko // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ – 2010 : Всеукраїнська науково-технічна конференція : тези доповідей. – Харків : Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2010. – Т. 2 – С.127.

40. Forrester, J. W. Industrial Dynamics: A Major Breakthrough for Decision Makers [Text] / J. W. Forrester // Harvard Business Review. –1958. – Vol. 36 (4). – P. 37–66.

41. Chumachenko, D. I. Dynamic Modeling of Socio-Economic System «Investigation of demand in terms of deficit» [Text] / D. I. Chumachenko, O. Y. Sokolov // Системи обробки інформації. Проблеми і перспективи розвитку ІТ-індустрії. – Х. 2010. – № 7 (88). – С. 237–238.

42. Чумаченко, Д. И. Моделирование социально-экономических процессов и систем при помощи структурных моделей на примере модели спроса при наличии дефицита [Текст] / Д. И. Чумаченко // Сучасна інформаційна Україна: інформатика, економіка, філософія : матеріали доповідей конференції, 13 – 14 травня 2010 : у 2 т. – Донецьк, 2010. – Т. 2. – С. 31–32.

43. Gordon, G. Preliminary Manual for GPSS – A General Purpose Systems Simulator (Technical Memorandum 17-048) [Text] / G. Gordon. – N.Y. : IBM, White Plains, October 6, 1961. – P. 87–104.

44. Schieritz, N. Modeling the Forest or Modeling the Trees – A Comparison of System Dynamics and Agent-Based Simulation [Text] / N. Schieritz, P. Milling // The 21st International Conference of the System Dynamics Society. – N. Y., USA, 2003.

45. Huhns, M. N. Agents and Multiagent Systems: Themes, Approaches, and Challenges [Text] / M. N. Huhns, M. P. Singh // Readings in Agents. – San Francisco, CA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2008 – P. 1 – 24.

46. Maes, P. Agents That Reduce Work and Information Overload [Text] / P. Maes // Communications of the ACM. – London : ACM Press, 1994. – Vol. 37. – P. 31–40.

47. Chaib-draa, B. Trends in Agent Communication Language [Text] / B. Chaib-draa, F. Dignum // Computational Intelligence. – 2002 – Vol. 18 (2). – P. 89–101.

48. Conte, R. Simulating Social Phenomena [Text] / R. Conte, R. Hegselmann, P. Terna // Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems.– Berlin : Springer-Verlag, 1997. – Vol. 456. – 536 p.

49. Towards anytime coalition structure generation in multi-agent systems with positive or negative externalities [Text] / T. Rahwan, T. Michalak, M. Wooldridge, N. R. Jennings // Artificial Intelligence. – 2012. – Vol. 186. – P. 95–122.

50. Shoham, Y. Multiagent Systems – Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations [Text] / Y. Shoham, K. Leyton-Brown. – Cambridge University Press, 2009. – 483 p.

51. Чумаченко, Д. И. Моделирование логистических систем с использованием мультиагентных технологий [Текст] / Д. И. Чумаченко // Современные информационные технологии в экономике и управлении предприятиями, программами и проектами : V Международная научно-практическая конференция : тезисы докладов. – Харьков : Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», 2007. – С. 173.

52. Gilbert, N. Simulation for the social scientist [Text] / N. Gilbert, K. G. Troitzsch. – [2nd ed.]. – USA, NY : Open University Press, 2005. – P. 172–199.

53. Чумаченко, Д. И. Логистическое моделирование товарных запасов средств мобильной связи с использованием мультиагентных технологий [Текст] / Д. И. Чумаченко, А. Ю. Соколов, Д. Н. Бугас // Актуальные проблемы управления бизнесом, предприятиями и проектами : VI

Международная научно-практическая конференция : тезисы докладов. – Харьков : Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», 2008. – С. 258–259.

54. Чумаченко, Д. И. Применение мультиагентного моделирования в машиностроении [Текст] / Д. И. Чумаченко // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ–2006 : Міжнародна науково-технічна конференція : тези доповідей. – Харків : Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», 2006. – С. 185.

55. Steels, L. The Artificial Life Roots of Artificial Intelligence [Text] / L. Steels // Artificial Life: an overview – MIT Press, 2000. – P. 75–111.

56. Brooks, R. A. The Relationship Between Matter and Life [Text] / R. A. Brooks // Nature. – 2001. – Vol. 409. – P. 409–411.

57. Jagga, A. Review of comparative study of KQML and FIPA ACL [Text] / A. Jagga, Honey // International Journal of Networking & Parallel Computing. – 2013. – Vol. 3, № 1. – P. 51 – 55.

58. Hurford, J. R. Approaches to the Evolution of Language [Text] / J. R. Hurford, M. Studdert-Kennedy, C. Knight. – Cambridge : Cambridge University Press, 1998. – P. 30 – 44.

59. Cangelosi, A. Simulating the Evolution of Language [Text] / A. Cangelosi, D. Parisi. – London : Springer Verlag, 2001. – 355 p.

60. Алексеев, А. А. Лингвистическая онтология – тезаурус РуТез [Текст] / А. А. Алексеев, Б. В. Добров, Н. В. Лукашевич // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. – Минск : БГУИР, 2013. – С. 153–158.

61. Hollan, J. Distributed cognition: toward a new foundation for human-computer interaction research [Text] / J. Hollan, E. Hutchins, D. Kirsh // ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI).– 2000. – Vol. 7 (2). – P. 174-196.

62. Lin, J. Computational Models of Emotion and Cognition [Text] / J. Lin, M. Spraragen, M. Zyda // *Advances in Cognitive Systems*. – 2012. – Vol. 2. – P. 59–76.

63. Brosch, T. Comment: On the Role of Appraisal Processes in the Construction of Emotion [Text] / T. Brosch // *Emotion review*. – 2013. – Vol.5, № 4. – P. 369–373.

64. Wright, I. Reinforcement learning and animat emotions. Technical Report CSRP-96-4 [Electronic resource] / I. Wright. – University of Birmingham School of Computer Science, 1996. – Access mode :

<ftp://ftp.cs.bham.ac.uk/pub/tech-reports/1996/CSRP-96-04.ps.gz>.

65. Hochschild, A. *The Managed Heart: The Commercialisation of Human Feeling* [Text] / A. Hochschild. – CA, Berkeley : University of California Press, 2012. – P. 89–137.

66. Newell, A. Computer science as empirical enquiry [Text] / A. Newell, H. A. Simon // *Communications of the ACM*. – N.Y. : ACM, 1976. – Vol. 19, issue 3. – P. 113–126.

67. Agent-Based Simulation of Pedestrian Behaviour in Closed Spaces: A Museum Case Study [Electronic resource] / A. Pluchino, C. Garofalo, G. Inturri [et al.] // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2014. – Vol. 17, issue 1. – Access mode :

<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/17/1/16.html>.

68. Clarke, D. *Aliasing in Object-Oriented Programming: Types, Analysis and Verification* [Text] / D. Clarke, J. Noble, T. Wrigstad. – N.Y. : Springer-Verlag, 2013. – 524 p.

69. Self-Organizing Pedestrian Movement [Text] / D. Helbing, P. Molnar, I. J. Farcas, K. Bolay // *Environment and Planning B: Planning and Design*. – 2001. – Vol 28, issue 3. – P. 361 – 383.

70. Stroustrup, B. *The C++ Programming Language*. [Text] / B. Stroustrup. – [4th ed.]. – London : Addison-Wesley, 2014. – 1368 p.

71. Larkin, D. Object Oriented Programming and the Objective C Language [Text] / D. Larkin, G. Wilson. – USA, CA : NeXT Software, 1995. – 172 p.
72. Graham, P. ANSI Common Lisp [Text] / P. Graham. – N.J., Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1996. – 432 p.
73. Goldberg, A. Smalltalk-80: The Language [Text] / A. Goldberg, D. Robson. – London : Addison-Wesley, 1989. – 719 p.
74. Arnold, K. The Java Programming Language. [Text] / K. Arnold, J. Gosling. – [4th ed.]. – MA, Reading : Addison-Wesley, 2005. – 928 p.
75. The C# Programming Language [Text] / A. Hejlsberg, M. Torgersen, S. Wiltamuth, P. Golde. – [4th ed.]. – London : Addison-Wesley, 2011. – 864 p.
76. Fisher, M. A logical approach to simulating societies [Electronic resource] / M. Fisher, M. Wooldridge // Artificial Societies: The Computer Simulation of Social Life. – London : UCL Press, 1995. – Access mode : http://www.agent.ai/doc/upload/200402/fish95_1.pdf.
77. Epidemic processes in complex networks [Text] / R. Pastor-Satorras, C. Castellano, P. Van Mieghem, A. Vespignani // Reviews of Modern Physics. – 2005. – Vol. 87, issue 925. – P. 925 – 979.
78. Andersson, H. Epidemic models and social networks [Text] / H. Anderson // Math. Scientist. – 1999. – Vol. 94. – P. 128–147.
79. Ajelli, M., Cigno R. L., Montresor A. Modeling botnets and epidemic malware [Text] / M. Ajelli, R. L. Cigno, A. Montresor // Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on. – IEEE, 2010. – P. 1–5.
80. Garetto, M. Modeling malware spreading dynamics [Text] / M. Garetto, W. Gong, D. Towsley // INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies. – IEEE, 2003. – Vol. 3. – P. 1869–1879.
81. Roberts, M. G. The asymptotic behavior of a logistic epidemic model with stochastic disease transmission [Text] / M. G. Roberts, A. K. Saha // Applied Mathematics Letters. – 1999. – Vol 12, issue 1. – P. 37 – 41.

82. Чумаченко, Д. И. Математические модели и методы компьютерно – интегрированной технологии прогнозирования динамики заболеваемости инфекционными болезнями в Украине [Электронный ресурс] / Д. И. Чумаченко. – 2008. – Режим доступа :

<http://old.pinchukfund.org/storage/students/works/2008/488.doc>.

83. Чумаченко, Д. И. Применение мультиагентных технологий в здравоохранении [Текст] / Д. И. Чумаченко, А. А. Соколов // Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии Автоматизация–2006 : Студенческая научно-практическая конференция с международным участием : сб. материалов. – Харьков : ХНАДУ, 2006. – С. 26.

84. Боев, Б. В. Прогнозно-аналитические модели эпидемий [Электронный ресурс] / Б. В. Боев. – М., 2005. – Режим доступа :

<http://www.armscontrol.ru/course/lectures05a/bvb050324.pdf>.

85. Reid, P. P. Building a Better Delivery System: A New Engineering/Health Care Partnership [Text] / P. P. Reid – Washington D.C. : The National Academies Press, 2005. – 276 p.

86. Потапов, Д. К. Математическое моделирование эпидемических процессов в условиях системной модернизации [Текст] / Д. К. Потапов, В. В. Естафьева // Проблемы системной модернизации экономики России: социально-политический, финансово-экономический и экологический аспекты : сборник научных статей. – Вып. 9. – СПб.: НОУ ВПО Институт бизнеса и права, 2010. – С. 461 – 465.

87. Про створення Єдиного інформаційного поля системи охорони здоров'я України [Електронний ресурс]: наказ Міністерства охорони здоров'я України від 21.05.98 № 127. – К., 1998. – Режим доступу :

<http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=351>.

88. Бейли, Н. Математика в биологии и медицине [Текст] / Н. Бейли. – М. : Мир, 1970. – 327 с.

89. Gani, J. Mathematical models of epidemics [Text] / J. Gani // The Mathematical Intelligencer. – 1980. – Vol. 3, № 1. – P. 35–47.

90. Leading personalities in statistical sciences: from 17th century to the present [Text] / ed by N. J. Johnson, S. Kotz. – Canada, 1997. – P. 284.

91. Авилов, К. К. Математическое моделирование заболеваемости туберкулезом органов дыхания на территории России и оценка эффективности противотуберкулезных мероприятий [Текст] : дис. на соискание ученой степени канд. физ.-матем. наук : спец. 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» / К. К. Авилов. – М., 2007. – 154 с.

92. Iacus, S. M. Simulation and Inference for Stochastic Differential Equations [Text] / S. M. Iacus. – Milan : Springer, 2008. – P. 14-18.

93. Brauer, F. Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology [Text] / F. Brauer, C. Castillo-Chavez. – N. Y. : Springer-Verlag New York, 2001. – 448 p.

94. Vynnycky, E. An Introduction to Infectious Disease Modelling [Text] / E. Vynnycky, R. G. White. – N. Y. : Oxford University Press, 2010. – P. 41-62.

95. Bondareva, D. G. Multi-agent's technologies in models of spreading infectious diseases development [Text] / D. G. Bondareva, A. A. Sokolov, D. I. Chumachenko // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ – 2007 : Міжнародна науково-технічна конференція : тези доповідей. – Харків : Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2007. – С. 298.

96. Kaufman, J. Infectious disease modeling: creating a community to respond to biological threats [Electronic resource] / J. Kaufman, S. Edlund, J. Douglas // Statistical Communications in Infectious Diseases. – The Berkeley Electronic Press, 2009. – Vol. 1, issue 1. – Access mode :

<http://www.degruyter.com/view/j/scid.2009.1.1/scid.2009.1.1.1001/scid.2009.1.1.1001.xml>

97. Статистическая модель эпидемического процесса [Текст] / А. И. Бородулин, Б. М. Десятков, А. Н. Шабанов, А. А. Ярыгин // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2007. – Т. 10, № 2. – С. 23 – 30.

98. Боев, Б. В. Новые возможности для анализа и прогноза процессов эпидемического распространения наркомании [Электронный ресурс] / Б. В. Боев // Нарконет. – 2001. – № 2–3. – Режим доступа :

http://www.gamaleya.ru/content/lib/scientific_pop/0004/0004.htm.

99. Соколов, А. А. Управление эпидемическим процессом с использованием мультиагентного моделирования [Текст] / А. А. Соколов, Д. И. Чумаченко // Вестник РГМУ : периодический медицинский журнал. – М. : ГОУ ВПО РГМУ Росздрава, 2006. – № 2 (49). – С. 327.

100. Chumachenko, D. I. Simulation model of infectious disease epidemic process [Text] / D. I. Chumachenko // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ–2012 : Всеукраїнська науково-технічна конференція : тези доповідей. – Харків : Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2012. – С. 137.

101. The influenza pandemic preparedness planning tool InflaSim [Electronic resource] / M. Eichner, M. Schwehm, H. P. Duerr, S. O. Brockmann // BMC Infect Diseases. – 2007. – Vol. 7(1). – P.17. – Access mode :

<http://www.biomedcentral.com/1471-2334/7/17>.

102. Chumachenko, D. I. Applying of multiagent approach to epidemic process simulation [Text] / D. I. Chumachenko, O. Y. Sokolov // Епідеміологічні дослідження в клінічній медицині: досягнення та перспективи : матеріали міжнародної науково-практичної конференції (3–4 жовтня, 2013 р., Харків, Україна) / під ред. Т. О. Чумаченко – Харків : Цифрова друкарня №1, 2013. – С. 276–277.

103. Чумаченко, Т. А. Совершенствование эпидемиологической диагностики на основе информационных технологий [Текст] / Т. А. Чумаченко, В. И. Макарова, Д. И. Чумаченко // Актуальные вопросы эпидемиологии : научно-практическая конф. с международным участием : материалы : – Ереван, 2013. – С. 262–264.

104. Гоффоли, Т. Машины клеточных автоматов [Текст] / Т. Гоффоли, Н. Марголус. – М. : Мир, 1991. – 280 с.

105. Чумаченко, Д. І. Мультиагентне моделювання як інструмент запобігання спалахів лихоманки Ебола [Текст] / Д. І. Чумаченко, Т. О. Чумаченко // Інфекційні хвороби сучасності. Біологічна безпека та біозахист : матеріали науково-практичної конференції, присвяченої щорічним «Читанням» пам'яті академіка Л. В. Громашевського та 120-річчю ДУ «Інститут епідеміології та інфекційних хвороб ім. Л. В. Громашевського Національної академії медичних наук України» (Київ, 12–13 жовтня 2016 р.). – К., 2016. – С. 151–152.

106. Containing Pandemic Influenza with Antiviral Agents [Text] / I. M. Longini, M. E. Halloran, A. Nizam, Y. Yang // American Journal of Epidemiology. – 2004. – Vol. 159, № 7. – P. 623–633.

107. FluTE, a Publicly Available Stochastic Influenza Epidemic Simulation Model [Electronic resource] / D. L. Chao, M. E. Halloran, V. J. Obenchain, I. M. Longini // PLoS Computational Biology. – 2010. – Vol. 6, № 1. – Access mode:

<http://www.ploscompbiol.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pcbi.1000656>.

108. Simulation as Decision Support in Pandemic Influenza Preparedness and Response [Text] / J. Jenvald, M. Morin, T. Timpka, H. Eriksson // Proceedings of ISCRAM 2007. – Delft, 2007. – P. 295–304.

109. Chumachenko, D. I. Applying the multiagent approach to epidemic process simulation [Text] / D. I. Chumachenko, V. I. Makarova, Y. V. Akopyan // 7th International Scientific Interdisciplinary Conference for medical students and young doctors : Conference proceedings. – Kharkiv : Kharkiv National Medical University, 2014. – P. 247.

110. Chumachenko, T. A. Forecasting of the infectious disease spreading [Text] / T. A. Chumachenko, D. I. Chumachenko, V. I. Makarova // Актуальні питання боротьби з інфекційними захворюваннями : науково-практична конференція за участю міжнародних спеціалістів : матеріали конф. – Харків, 2015. – С. 110.

111. The Model Repository of the Models of Infectious Disease Agent Study [Text] / P. C. Cooley, D. Roberts, V.D. Bakalov [et al.] // IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine. – 2008. – Vol. 12, №4. – P. 513–522.

112. Agent Based Epidemiological Simulation for Pandemic Protection of Emerging and Re-emerging Infectious Diseases [Electronic resource] / H. Deguchi, Y. Kanatani, T. Kaneda [et al.] // Proceedengs of the 51st Annual Meeting of the ISSS. – Tokyo, 2007. – p.1286–1290. – Access mode :

<http://journals.issss.org/index.php/proceedings51st/article/viewFile/789/312>.

113. Tanuma, H. SOARS: Spot Oriented Agent Role Simulator – Design and Implementation [Text] / H. Tanuma, H. Deguchi, T. Shimizu // Agent-Based Social Systems. – Springer, 2005. – P. 1–15.

114. Okhusa, Y Simulation model of pandemic influenza in the whole of Japan [Text] / Y. Okhusa, T. Sugawara // Japanese journal of Infectious Diseases. – 2009. – Vol.62. – P. 98–106.

115. Das, T. A large-scale simulation model of pandemic influenza outbreaks for development of dynamic mitigation strategies [Text] / T. Das, A. Savachkin, Y. Zhu. – USA : FL, 2008. – P. 893–905.

116. Brauer, F. Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology [Text] / F. Brauer, C. Castillo-Chavez // Texts in Applied Mathematics. – Vol. 40. – N.Y. : Springer-Verlag New York, 2012. – 508 p.

117. Galvani, A. P. Epidemiology: dimensions of superspreading [Text] / A. P. Galvani, R. M. May // Nature. –2005. – Vol. 438, №. 7066. – P. 293-295.

118. Чумаченко, Д. И. Новый методологический поход к моделированию распространения инфекционного заболевания [Текст] / Д. И. Чумаченко, Т. А. Чумаченко, В. И. Макарова // Клиническая информатика и телемедицина : научно-методический журнал. – 2012. – Т. 8. вып. 9. – С. 195–196.

119. Громашевский, Л. В. Общая эпидемиология [Текст] : рук. для врачей и студ. / Л. В. Громашевский. – [4-е изд., значит. переработ.]. – М. : Медицина, 1965. – 290 с.

120. Чумаченко, Д. И. Использование информационных технологий при прогнозировании эпидемий гриппа [Текст] / Д. И. Чумаченко, Д. Г. Бондарева, А. А. Соколов // Вестник РГМУ : периодический медицинский журнал. – 2008. – № 2 (61). – С. 254–255.

121. D'ebarre, F. SIR models of epidemics [Electronic resource] / F. D'ebarre // Level 1 module in «Modelling course in population and evolutionary biology». – Zurich : Institute of Integrative Biology, 2010. – Access mode :

<http://www.tb.ethz.ch/education/model/SIR/sir.pdf>.

122. Global Dynamics of an SEIRS Epidemic Model with Constant Immigration and Immunity [Text] / Li Juan Zhang, Yingqiu Li, Qingqing Ren, Zhenxiang Huo // WSEAS transactions on mathematics. – 2013. – Volume 12, Issue 5. — P. 630–640.

123. Чернышев, Ю. К. Событийное программирование. Применение к решению некоторых задач физики : учеб. пособие [Текст] / Ю. К. Чернышев. – Харьков : Национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт», 2008. – 68 с.

124. Chopra, A. K. Agent Communication [Text] / A. K. Chopra, P. S. Munindar // Multiagent systems. – MIT Press, 2011. – P. 9–33.

125. Russel, S. J. Artificial Intelligence. A Modern Approach [Text] / S. J. Russel, P. Norwig. – New Jersey : Prentice-Hall, 2003. – 946 p.

126. Vlassis, N. A. Concise Introduction to Multiagent Systems and Distributed Artificial Intelligence [Text] / N. A. Vlassis. – Greece : Morgan & Playpool Publishers, 2007. – 71 p.

127. Bellman, R. E. Adaptive Control Processes: A Guided Tour [Text] / R. E. Bellman. – Princeton Legacy Library, 1961. – 276 p.

128. Bertsekas, D. P. Network Optimization: Continuous and Discrete Models [Text] / D. P. Bertsekas. – Belmont : Athena Scientific, 2001. – 585 p.

129. Goksel-Canbek, N. On the track of Artificial Intelligence: Learning with Intelligent Personal Assistants [Text] / N. Goksel-Canbek, M. E. Mutlu // International Journal of Human Sciences. – 2016. – Vol. 13, № 1. – P. 592–601.

130. Sutton, R. S. Reinforcement Learning: An Introduction (Adaptive Computation and Machine Learning) [Text] / R. S. Sutton, A. G. Barto. – [2nd ed.]. Massachusetts, Cambridge : The MIT Press, 2017. – 322 p.

131. Papadimitriou, C. H. The Complexity of Markov Decision Processes [Text] / C. H. Papadimitriou, J. N. Tsitsiklis // Mathematics of Operations Research. – 1987. – Volume 12, issue 3. – P. 441–450.

132. Chumachenko D. I. Information technology of multiagent simulation of epidemic disease // Математическое моделирование процессов в экономике и управлении инновационными проектами (ММП-2013) : международная научно-практическая конференция : Алушта, 9–15 сентября 2013 г. : тезисы докладов. – Харьков : ХНУРЭ, 2013. – С. 264.

133. Чумаченко, Д. И. Использование имитационного моделирования распространения инфекционных заболеваний на примере гепатита В [Текст] / Д. И. Чумаченко, В. И. Макарова, О. С. Коваленко // Современные информационные технологии в экономике и управлении предприятиями, программами и проектами : X Международная научно-практическая конференция, Алушта, 10–16 сентября 2012 г. – Харьков: 2012. – С. 255.

134. Bernstein, R. S. Multi-level simulation analysis: A methodology for planning and evaluation in public health [Text] / R. S. Bernstein // The many faces of multi-level issues (Research in Multi Level Issues). – Vol. 1 – Emerald Group Publishing Limited, 2002. – P. 381–386.

135. Соколов, А. Ю. Принятие решений в мультиагентной среде в условиях неопределенности [Текст] / А. Ю. Соколов, О. С. Радивоненко, А. В. Товстик // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2011. – № 4. – С. 77–81.

136. Osborne, M. J. A Course in Game Theory [Text] / M. J. Osborne, A. Rubinstein. – Massachusetts, Cambridge : The MIT Press, 2014. – 352 p.

137. Шахгильдян, И. В. Парентеральные вирусные гепатиты (эпидемиология, диагностика, профилактика) [Текст] / И. В. Шахгильдян, М. И. Михайлов, Г. Г. Онищенко. – М. : ГОУ ВУНМЦ МЗ РФ, 2003. – 384 с.

138. Kovalenko, O. Simulation of Hepatitis B virus spreading using event-driven approach [Text] / O. Kovalenko, D. Chumachenko, V. Makarova // 5th International Scientific Interdisciplinary Conference for medical students and young doctors : Conference proceedings. – Kharkiv : Kharkiv National Medical University, 2012. – P. 212.

139. Чумаченко, Т. О. Результати віртуальних експериментів з імітаційною моделлю епідемічного процесу вірусного гепатиту В [Текст] / Т. О. Чумаченко, В. І. Макарова, Д. І. Чумаченко // Інфекційні хвороби: невирішені проблеми (діагностика, етіопатогенетичні особливості, лікування, профілактика) : матеріали науково-практичної конференції – К., 2013 – С. 116–118.

140. Fuzzy Dynamical Model of Epidemic Spreading Taking into Account the Uncertainties in Individual Infectivity [Text] / F. S. Santos, N. R. S. Ortega, D. M. T. Zanetta, E. Massad // Advances in Technological Applications of Logical and Intelligent Systems. – IOS Press, 2009. – P. 180–193.

141. Fuzzy Logic in Action: Applications in Epidemiology and Beyond [Text] / E. Massad, N. R. S. Ortega, L. C. de Barros, C. J. Struchiner. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – P. 181–206.

142. Yager, R. R. Essentials of fuzzy modeling and control [Text] / R. R. Yager, D. P. Filev. – N. Y. : Wiley, 1994. – 408 p.

143. Mahfouf, M. Physiological Modelling and Fuzzy Control of Anaesthesia via Vaporisation of Isoflurane by Liquid Infusion [Text] / M. Mahfouf, A. J. Asbury, D. A. Linkens // International Journal of Simulation Systems, Science and Technology. – 2001. – Vol. 2 (1). – P. 55–66.

144. Nascimento, L. F. C. Fuzzy linguistic model for evaluating the risk of neonatal death [Text] / L. F. C. Nascimento, N. R. S. Ortega // Revista de Saúde Pública. – Vol. 36, № 6. – 2002. – P. 686–692.

145. Castanho, M. A. R. B. Membrane-active Peptides: Methods and Results on Structure and Function [Text] / M. A. R. B. Castanho. – International University Line, 2010. – 635 p.

146. Duarte, A. P. Cellulose acetate reverse osmosis membranes: Optimization of preparation parameters [Text] / A. P. Duarte, J. C. Bordado, M. T. Cidade // Journal of Applied Polymer Science. – 2006. – Vol. 103, issue 1. – P. 134–139.

147. Fuzzy modeling of electrical impedance tomography images of the lungs [Text] / H. Tanaka, N. R. S. Ortega, M. S. Galizia, J. B. Borges, M. B. P. Amato // Clinics.– 2008. – Vol. 63, issue 3. – P. 363–370.

148. Fuzzy modeling in symptomatic HIV virus infected population [Text] / R. M. Jafelice, L. C. de Barros, R. C. Bassanezi, F. Gomide // Bulletin of Mathematical Biology.– 2004. – Vol. 66, issue 6. – P. 1597–1620.

149. Barros, L. C. A First Course in Fuzzy Logic, Fuzzy Dynamical Systems, and Biomathematics [Text] / L. C. Barros, R. C. Bassanezi, W. A. Lodwick. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017. – 297 p.

150. Barros, L. C. The SI epidemiological models with a fuzzy transmission parameter [Text] / L. C. Barros, M. B. F. Leite, R. C. Bassanezi // International Journal of Computational Mathematical Applications. – 2003. – Vol. 45.– P. 1619–1628.

151. Ortega, N. Fuzzy gradual rules in epidemiology [Text] / N. Ortega, L. C. Barros, E. Massad // Kybernetes. – 2015. – Vol. 32., issue 3. – P. 460–477.

152. Ortega, N. R. S. Fuzzy dynamical systems in epidemic modeling [Text] / N. R. S. Ortega, P. C. Sallum, E. Massad // Kybernetes. – 2000. Vol. 29. issue 2. – P. 201–218.

153. Соколов, А. Ю. Анализ хаотической динамики в нечетких рекуррентных моделях [Текст] / А. Ю. Соколов, М. Вагенкнехт // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 5.– С. 54–65.

154. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств [Текст] / А. Кофман. – М. : Радио и связь, 1982. – 432 с.

155. Chumachenko, D. I. Using of soft computing in social processes simulation on the example of Takagi–Sugeno algorithm [Text] / D. I. Chumachenko // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні

ІКТМ-2011 : Всеукраїнська науково-технічна конференція : тези доповідей. – Харків : Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2011. – Т. 2 – С. 129–130.

156. Поспелов, Д. А. Ситуационное управление. Теория и практика [Текст] / Д. А. Поспелов. – М. : Наука, 1986. – 288 с.

157. Li, T.–Y. Period three implies chaos [Text] / T.–Y. Li, J. A. Yorke // Amer. Math. Monthly. – 1975. – Vol.82, № 10. – P. 985–992.

158. Kloeden, P. E. Chaotic iterations of fuzzy sets [Text] / P. E. Kloeden // Fuzzy Sets and Systems. – 1991. – Vol. 42. – P. 37–42.

159. Kempf, R. Regularity and chaos in recurrent fuzzy systems [Text] / R. Kempf, J. Adamy // Fuzzy Sets and Systems. – 2003. – Vol. 140 (2). – P. 259–284.

160. Nachenberg, C. The Evolving Virus Threat [Text] / C. Nachenberg // 23rd NISSC Proceedings. – Baltimore, Maryland, 2000.

161. Weaver, N. Warhol Worms: The Potential for Very Fast Internet Plagues [Electronic resource]. / N. Weaver. – Access mode :

<http://www.cs.berkeley.edu/~nweaver/warhol.html>

162. Kephart, J. O. Computers and Epidemiology [Text] / J. O. Kephart, D. M. Chess, S. R. White // IEEE Spectrum. – 1993. – P. 20–26.

163. Kephart, J. O. Measuring and Modeling Computer Virus Prevalence [Text] / J. O. Kephart, S. R. White // Proceedings of the IEEE Symposium on Security and Privacy. – 1993. – P. 2–15.

164. Wang, C. On Viral Propagation and the Effect of Immunization [Text] / C. Wang, J. C. Knight, M. C. Elder // Proceedings of 16th ACM Annual Computer Applications Conference. – New Orleans, LA, 2000. – P. 11–16.

165. Staniford, S. How to Own the Internet in Your Spare Time [Text] / S. Staniford, V. Paxson, N. Weaver // 11th Usenix Security Symposium. – San Francisco, August, 2002. – 20 p.

166. Moore, D. The Spread of the Code-Red Worm [Electronic resource] / D. Moore. Access mode :

http://www.caida.org/analysis/security/codered/coderedv2_analysis.xml

167. Dolak, J. C. The Code Red Worm [Electronic resource] / J. C. Dolak // The SANS Institute InfoSec Reading Room, 2001. Access mode :

<http://www.sans.org>.

168. Moore, D. Code-Red: a case study on the spread and victims of an Internet worm [Text] / D. Moore, C. Shannon, J. Brown // Internet Measurement Workshop (IMW). – 2002. – P. 273–284.

169. Chumachenko, K. I. Current trends in malware detection using machine learning [Text] / K. I. Chumachenko, D. I. Chumachenko // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ–2016 : Всеукраїнська науково-технічна конференція : збірник матеріалів конференції. – Харків : Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2016. – С. 198–199.

170. Gerberry, D. J. An SEIQR model for childhood diseases [Text] / D. J. Gerberry, F. A. Milner // Journal of Mathematical Biology. – 2009. – Vol. 50, № 4. – P. 535–561.

171. Piqueira, J. R. C. Epidemiological models applied to viruses in computer networks [Text] / J. R. C. Piqueira, B. F. Navarro, L. H. Monteiro // Journal of Computer Science. – 2005. – Vol. 1, № 1. – P. 31–34.

172. Williamson, M. An epidemiological model of virus spread and cleanup [Text] / M. Williamson, J. Leveille. – HP Labs Bristol, 2003. – 10 p.

173. Чумаченко, Д. И. Моделирование распространения вредоносного программного обеспечения на примере червя Code Red как инструмент повышения кибербезопасности в условиях военного конфликта [Текст] / Д. И. Чумаченко, Е. И. Чумаченко // Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи : Матеріали третьої Всеукраїнської науково-практичної конференції (22–23 вересня 2016 року, м. Одеса). – Одеса, 2016. – С. 221–222.

174. Chumachenko, K. Agent-based simulation of malicious software spreading as an effective instrument of information and cyber security provision

[Text] / К. Chumachenko, D. Chumachenko // Національна безпека України: актуальні проблеми та шляхи їх вирішення : матеріали Другої Всеукраїнської курсантсько-студентської науково-практичної конференції (24 листопада 2016 року, м. Одеса). – Одеса, 2016. – С. 113–114.

175. Чумаченко, Д. И. О моделировании распространения вредоносного программного обеспечения типа «сетевой червь» [Текст] / Д. И. Чумаченко, С. В. Яковлев // Системный анализ, компьютерное моделирование, информационные технологии : материалы 1-го Международ. науч.-техн. семинара, Харьков, 19–23 декабря 2016 г. : тезисы докладов. – Харьков : ДРУКАРНЯ МАДРИД, 2017. – С. 93–94.

176. Леонкин, В. Энциклопедия клинических инфекционных болезней [Текст] / В. Леонкин. – Litres, 2015. – 495 с.

177. WHO Informal consultation on surveillance of respiratory syncytial virus on the WHO Global Influenza Surveillance and Response System (GISRS) platform [Electronic resource] / Weekly epidemiological report. – 2016. – № 1. – P. 1-12. – Access mode:

<http://www.who.int/entity/wer/2016/wer9101.pdf?ua=1>

178. Influenza Activity – United States, 2014-15 Season and Composition of the 2015-16 Influenza Vaccine [Electronic resource] / CDC Morbidity and Mortality Weekly Report. – 2015. – Vol. 64, № 21. – P. 583–590. – Access mode:

<https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/mm6421a5.htm>

179. Trends in Pneumonia and Influenza Morbidity and Mortality [Text] / American Lung Association. – 2015. – 16 p.

180. Математические модели прогнозирования динамики заболеваемости ОРВИ и гриппом на территории Украины [Текст] / Д. И. Чумаченко, А. А. Соколов, Д. Г. Бондарева, А. Ю. Соколов // Применение лазеров в медицине и биологии : материалы XXIX Международной научно-практической конференции «». – Харьков, 2008. – С. 309–310.

181. Чумаченко, Д. И. Математическое моделирование распространения заболеваемости гриппом в условиях вакцинации групп риска [Текст] / Д. И. Чумаченко // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ–2008 : міжнародна науково-технічна конференція : тези доповідей. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2008. – Т. 2. – С. 127 – 128.

182. Sklar, E. Software Review : NetLogo, a multi-agent simulation environment [Text] / E. Sklar // Artificial life. – 2007. – Vol. 13, №2. – P. 303–311.

183. Чумаченко, Д. И. Разработка и оптимизация математических моделей и методов прогнозирования динамики развития заболеваемости дифтерией, гриппом и ОРВИ в Украине [Электронный ресурс] / Д. И. Чумаченко. – 2009. – Режим доступа :

<http://old.pinchukfund.org/storage/students/works/2009/488.doc>.

184. Доклад ЮНЭЙДС о Глобальной эпидемии СПИДа (2012). – ЮНЭЙДС, 2012. – 96 с.

185. Оперативна інформація про офіційно зареєстровані випадки ВІЛ-інфекції, СНІДу та кількість смертей, зумовлених СНІДом за листопад 2016 року : статистична довідка ВІЛ / СНІД [Електронний ресурс] // Державна установа «Центр громадського здоров'я Міністерства охорони здоров'я України». – Режим доступу :

<http://phc.org.ua/uploads/documents/83da57/a411e47821b8573fde25b62ea559e99a.pdf>

186. Доклад ЮНЭЙДС о Глобальной эпидемии СПИДа (2008) / (пер. с англ). – ЮНЭЙДС, 2008. – 357 с.

187. Chumachenko, K. I. Information-processing method of imitation of HIV infection distribution [Text] / K. I. Chumachenko, D. I. Chumachenko // Епідеміологічні дослідження в клінічній та профілактичній медицині: досягнення та перспективи : матеріали науково-практичної конференції з міжнародною участю (12–13 березня 2015 р. Харків, Україна), присвяченої

210-й річниці Харківського національного медичного університету та 85-річчю кафедри епідеміології. – Харків : Щедра садиба плюс, 2015. – С. 270–272.

188. Yarovaya, O. V. Programming and numerical methods. Part 2: Numerical methods using MatLab and Mathcad: guidance manual for laboratory works [Text] / O. V. Yarovaya, D. I. Chumachenko. – Kharkiv : National Aerospace University «KhAI», 2016. – 92 p.

189. Литвиненко, Л. М. Удосконалення епідеміологічного нагляду за дифтерією і правцем за результатами серологічних досліджень [Текст] : Автореф. дис. на здобуття наукового ступеня канд. мед. наук : спец. 14.02.02 «Епідеміологія» / Л. М. Литвиненко. – К., 2009. – 23 с.

190. Sokolov, O. O. Calculation of Epidemic Thresholds and their Application in Estimation of Epidemic Situations of Morbidity by Influenza [Text] / O. O. Sokolov, D. I. Chumachenko, D. G. Bondareva // Сучасні проблеми ракетно–космічної техніки і технології : IV науково–технічна конференція молоді та студентства, Харків, 15.05.07 р. : тези доповідей. – Харків : Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2007. – С. 95-96.

191. Chumachenko, D. I. Multiagent approach as an effective instrument of the transmission of antibiotic resistant healthcare associated infections simulation [Text] / D. I. Chumachenko // Інфекційний контроль та актуальні проблеми інфекцій, пов'язаних з наданням медичної допомоги: Матеріали науково-практичної конференції, присвяченої 135-річчю з дня народження Олександра Флемінга, бактеріолога, лауреата Нобелівської премії, винахідника першого антибіотика пеніциліну (16 листопада 2016 року, м. Харків). – Харків : ТОВ Планета-прінт, 2016. – С. 95–97.

192. Моделювання епідемічного процесу при іксодовому кліщовому бореліозі [Текст] / В. В. Баліцький, П. Є. Пілецький, Д. І. Чумаченко [та ін.] // Втілення ідей М. М. Соловйова в збереження популяційного здоров'я нації : матеріали науково-практичної конференції, присвяченої 130-річчю з дня

народження професора М. М. Соловйова, засновника та першого завідувача кафедри епідеміології ХНМУ (17 травня 2016 року, м. Харків). – Харків, 2016. – С. 116–119.

193. Чумаченко Д. И. Моделирование распространения иксодового клещевого боррелиоза в условиях сложной военной ситуации [Текст] / Д. И. Чумаченко, П. Е. Пилецкий, М. Ф. Сухорукова // Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи : матеріали Третьої Всеукраїнської науково-практичної конференції (22–23 вересня 2016 року, м. Одеса). – Одеса, 2016. – С. 384.

194. Пилецкий, П. Е. Моделирование эпидемического процесса методом скользящего среднего на примере заболеваемости иксодовым клещевым боррелиозом [Текст] / П. Е. Пилецкий, Д. И. Чумаченко // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ–2016 : Всеукраїнська науково-технічна конференція : збірник матеріалів конференції. – Харків : Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2016. – С. 151.

195. Экспертная система дифференциальной диагностики инфекций мочевыводящих путей, связанных с оказанием медицинской помощи [Текст] / П. Е. Пилецкий, В. В. Балицкий, Д. И. Чумаченко [и др.] // Втілення ідей М. М. Соловйова в збереження популяційного здоров'я нації: Матеріали науково-практичної конференції, присвяченої 130-річчю з дня народження професора М.М. Соловйова, засновника та першого завідувача кафедри епідеміології ХНМУ (17 травня 2016 року, м. Харків). – Харків, 2016. – С. 74–75.

196. Чумаченко Д. И. Разработка экспертной системы диагностики инфекций мочевыводящих путей в напряженной военной ситуации [Текст] / Д. И. Чумаченко, П. Е. Пилецкий, В. В. Балицкий // Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи : матеріали Третьої Всеукраїнської науково-практичної конференції (22–23 вересня 2016 року, м. Одеса). – Одеса, 2016. – С. 222.

197. А.с. № 68839. Комп'ютерна програма «Система поддержки принятия решений определения симптоматической инфекции мочевыводящих путей и инфекций мочевыводящих путей с бессимптомной бактериемией «UTI-Diagnostics»» / Чумаченко Д. І., Пілецький П. Є., Баліцький В. В., Несвижська І. І., Чумаченко Т. О. – Зареєстр. 29.11.2016.

198. Разработка программного продукта типа «Reminder» для контроля длительности применения мочевых катетеров [Текст] / Д. А. Радченко, Д. И. Чумаченко, Т. А. Чумаченко, И. И. Несвижская // Втілення ідей М. М. Соловйова в збереження популяційного здоров'я нації : матеріали науково-практичної конференції, присвяченої 130-річчю з дня народження професора М. М. Соловйова, засновника та першого завідувача кафедри епідеміології ХНМУ (17 травня 2016 року, м. Харків). – Харків, 2016. – С.77–78.

199. Чумаченко, Д. И. Разработка и внедрение программного обеспечения для улучшения качества оказания медицинской помощи пострадавшим в условиях вооруженного конфликта [Текст] / Д. И. Чумаченко, Д. А. Радченко // Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи : матеріали Третьої Всеукраїнської науково-практичної конференції (22–23 вересня 2016 року, м. Одеса). – Одеса, 2016. – С. 223.

200. Математическое моделирование распространения энтерококков, резистентных к ванкомицину [Текст] / А. В. Гончарук, Д. И. Чумаченко, Т. А. Чумаченко, И. И. Несвижская // Втілення ідей М. М. Соловйова в збереження популяційного здоров'я нації : матеріали науково-практичної конференції, присвяченої 130-річчю з дня народження професора М. М. Соловйова, засновника та першого завідувача кафедри епідеміології ХНМУ (17 травня 2016 року, м. Харків). – Харків, 2016. – С. 20–22.

201. Анализ и оценка анкетирования медицинских работников и ее автоматизация [Текст] / В. В. Балицкий, Д. И. Чумаченко // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ–2016 : Всеукраїнська

науково-технічна конференція : збірник матеріалів конференції. – Харків : Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2016. – С. 163.

202. Автоматизация оценки и анализа анкетирования медицинских работников по вопросам профилактики инфекций, связанных с оказанием медицинской помощи [Текст] / Д. И. Чумаченко, В. В. Балицкий, П. Е. Пилецкий [и др.] // Втілення ідей М. М. Соловйова в збереження популяційного здоров'я нації : матеріали науково-практичної конференції, присвяченої 130-річчю з дня народження професора М. М. Соловйова, засновника та першого завідувача кафедри епідеміології ХНМУ (17 травня 2016 року, м. Харків). – Харків, 2016. – С. 101–102.

203. Чумаченко, Д. И. Автоматизированный анализ анкет медицинских работников о профилактике инфекций, связанных с оказанием медицинской помощи, во время ведения боевых действий [Текст] / Д. И. Чумаченко, В. В. Балицкий, И. И. Несвижская // Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи : матеріали Третьої Всеукраїнської науково-практичної конференції (22–23 вересня 2016 року, м. Одеса). – Одеса, 2016. – С. 224.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА 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. Тимофєєва, І. В. Чумаченка. – Харків : ФОП Панов А. М., 2016. – С. 368–379.
2. Chumachenko, D. Investigation of agent-based simulation of malicious software [Text] / D. Chumachenko, S. Yakovlev // ECONTechMOD : An International Quarterly Journal, Vol. 5, № 4. – 2016. – P. 61–67. (Входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, BazTech).
3. Чумаченко, Д. И. О нечетких рекуррентных отображениях при мультиагентном моделировании популяционной динамики [Текст] / Д. И. Чумаченко, С. В. Яковлев // Бионика интеллекта : Научно-технический журнал. – 2016. – №2 (87). – 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). – 2016. – Vol. 3, issue 5. – P. 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. И. Чумаченко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. – Харьков : Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского “Харьковский авиационный институт”, 2013. – Вып. 59. – С. 295–303. (Входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

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

7. Моделирование распространения дерматовенерологических заболеваний на основе мультиагентных технологий [Текст] / П. П. Рыжко, А. Ю. Соколов, Л. В. Рощенюк, Е. К. Чмыхун, Д. И. Чумаченко, А. А. Соколов // Клиническая информатика и телемедицина. Научно-методический журнал. – 2008. – Т. 4, Вып. 5. – С. 56–59. (Входит 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: зб. наук. пр. 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

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 (20-th Zittau Fuzzy Colloquium, September 25 – 27, 2013). – IPM, 2013. – P. 161–168.

15. Chumachenko, T. Multiagent Simulation of the Hepatitis B Epidemic Process [Text] / 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 (19-th Zittau Fuzzy Colloquium, September 5 – 7, 2012). – Institut für Prozesstechnik Prozessautomatisierung und Messtechnik, 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 / 59-th ASTMH 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 (13-th Zittau Fuzzy Colloquium, September 13 – 15, 2006). – Institut für Prozesstechnik Prozessautomatisierung und Messtechnik, 2006. – P. 55–60.

19. Chumachenko, D. I. Application of fuzzy linguistic systems in epidemic process simulation [Текст] / D. I. Chumachenko // 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 Такаги – 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 ; Харківський

національний медичний університет МОЗ України, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут”, Укрмедпатентінформ МОЗ України. – К. : [Б.в.], 2014. – 4 с.

24. Патент № 90971 Україна, МПК (2014.01) А61В 10/00. Спосіб епідеміологічної діагностики вірусного гепатиту В у лікувально-профілактичному закладі / Чумаченко Т. О., Макарова В. І., Чумаченко Д. І. ; заявник і патентовласник Харківський національний медичний університет – № u201401729 ; Заявл. 24.02.14 ; опубл. 10.06.14 , Бюл. № 11.

25. А. с. 55118. 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. – Зареєстр. 02.06.14 ; опубл. 01.09.14, Бюл. №34.

26. А. с. 56462. 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. – Зареєстр. 11.09.14 ; опубл. 30.01.15, Бюл. №35.

27. А. с. 68480. Комп’ютерна програма «Мультиагентная модель динамики заболеваемости гриппом и ОРВИ «InfluenzaSim» / Чумаченко Д. І. – Зареєстр. 07.11.16.

28. А. с. 68481. Комп’ютерна програма «Мультиагентная модель динамики заболеваемости на сифилис «SyphilisSim» / Чумаченко Д. І. – Зареєстр. 07.11.16.

29. А. с. №68482. Комп’ютерна програма «Мультиагентная модель динамики заболеваемости на дифтерию «DiphtheriaSim»» / Чумаченко Д. І. – Зареєстр. 07.11.16.

30. А. с. 68849. Комп’ютерна програма «Мультиагентна система розповсюдження комп’ютерних хробаків у повнозв’язних гетерогенних мережах «MASWorm»» / Чумаченко Д. І., Чумаченко К. І. – Зареєстр. 29.11.16.

ДОДАТОК Б**ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. 13th East West Fuzzy Colloquium «Zittau Fuzzy Colloquium» (м. Циттау, Німеччина, 2006) – очна участь.
2. Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2007» (м. Харків, Україна, 2007) – очна участь.
3. 59th American Society of Tropical Medicine & Hygiene annual meeting (м. Атланта, США, 2010) – дистанційна участь.
4. 19th East West Fuzzy Colloquium «Zittau Fuzzy Colloquium» (м. Циттау, Німеччина, 2012) – очна участь.
5. ISDS Annual Conference “Expanding Collaborations to Chart a New Course in Public Health Surveillance” (Сан-Дієго, США, 2012) – заочна участь.
6. 20th East West Fuzzy Colloquium «Zittau Fuzzy Colloquium» (м. Циттау, Німеччина, 2013) – очна участь.
7. Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2014» (м. Харків, Україна, 2014) – очна участь.
8. ISDS Annual Conference “Challenges and Solutions for the Road Ahead” (м. Філадельфія, США, 2014) – дистанційна участь.
9. Міжнародна науково-практична конференція «Математичне моделювання процесів в економіці і управлінні проектами і програмами (ММП-2016)» (м. Миколаїв, 2016) – заочна участь.
10. Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2016» (м. Харків, Україна, 2016) – очна участь.
11. ISDS Annual Conference “New Frontiers in Surveillance: Data Science and Health Security” (м. Атланта, США, 2016) – заочна участь.
12. Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика розвитку сучасних наукових знань» (м. Київ, 2016) – заочна участь.

ДОДАТОК В**АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Державної установи
«Харківський обласний
лабораторний центр Міністерства
охорони здоров'я України»

Л.С. Махота

08.11.2016р.

АКТ

впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи

Чумаченка Дмитра Ігоровича

виконаної на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Комісія у складі голови – Карлової Т.О., завідувача відділення організації епідеміологічних досліджень, членів комісії – Новіцької Н.І., завідувача відділення санітарно-гігієнічних досліджень, та Сухорукової Г.Б., завідувача відділення особливо небезпечних інфекцій, склала даний акт про впровадження наукових результатів кандидатської дисертації Чумаченка Д.І. в практичну діяльність ДУ «Харківський обласний лабораторний центр МОЗ України».

В рамках реалізації робіт за договором №570 від 24.01.2013 р. про науково-практичне співробітництво з метою проведення наукових досліджень щодо розробки математичних моделей епідемічного процесу інфекцій та прогнозування захворюваності між кафедрою епідеміології Харківського національного медичного університету та кафедрою інформатики Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» та договором №730/09-14 від 1 вересня 2014 р. про науково-практичне співробітництво між "Харківським обласним лабораторним центром Держсанепідслужби України" та кафедрою епідеміології Харківського національного медичного університету з метою розробки технологій удосконалення епідеміологічного нагляду за інфекційними хворобами були використані наступні результати дисертаційної роботи:

– патент на корисну модель №90971. Спосіб епідеміологічної діагностики вірусного гепатиту В у лікувально-профілактичному закладі / Т. О. Чумаченко, В. І. Макарова, Д. І. Чумаченко. - № u201401729; Заявлено 24.02.2014; Опубл. 10.06.2014, Бюл. №11., що дозволяє проводити аналіз прогнозу динаміки захворюваності на гепатит В за допомогою нечітких рекурентних моделей;

– комп'ютерна програма «Компьютерная интерактивная имитационная среда агентного моделирования эпидемического процесса гепатита В «EventEpidSim»», свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 55118 від 02.06.2014 Чернишева Ю.К., Товстіка А.В., Чумаченка Д.І., Чумаченко Т.О., Макарової В.І., що була впроваджена раніше в ДУ «Харківський обласний лабораторний центр Держсанепідслужби України» та дозволила провести моделювання динаміки захворюваності на гепатит В, засноване на інтелектуальних агентах;

– комп'ютерна програма «Автоматизована система дослідження інфекційних захворювань за факторами ризику «ФАКТОР»», свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 56462 від 11.09.2014 Чумаченко Т.О., Радивоненко О.С., Бреус Н.В., Макарової В.І., Чумаченка Д.І., що була впроваджена раніше в ДУ «Харківський обласний лабораторний центр Держсанепідслужби України» та дозволила автоматизувати аналіз інфекційних захворювань на основі нечітких рекурентних моделей;

– інформаційний лист про нововведення в системі охорони здоров'я № 3-2014. Спосіб прогнозування захворюваності на гепатит В за допомогою мультиагентного моделювання / Т. О. Чумаченко, Ю. К. Чернишов, Д. І. Чумаченко, В. І. Макарова, А. В. Товстік; Харківський національний медичний університет, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Укрмедпатентінформ. – К. : Укрмедпатентінформ, 2014. – 4 с., що дозволила зробити прогноз динаміки захворюваності на гепатит В, заснований на мультиагентній моделі;

– комп'ютерна програма «Мультиагентная модель динамики заболеваемости гриппом и ОРВИ «InfluenzaSim»», свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 68480 від 07.11.2016 Чумаченка Д.І., що включає метод однозначної оцінки станів агентів, та дозволяє прогнозувати захворюваність на грип та ГРВІ.

Застосування розроблених методів дозволило підвищити точність побудування прогнозів захворюваності на інфекційні хвороби, провести якісний аналіз динаміки захворюваності та розробити ефективні профілактичні та превентивні заходи щодо профілактики захворюваності на інфекційні хвороби.

Голова комісії

Члени комісії



Т.О.Карлова



Н.І. Новіцька



Г.Б.Сухорукова

ЗАТВЕРДЖУЮ:



Головний лікар
 Комунального закладу охорони
 здоров'я Обласна дитяча клінічна
 лікарня

Муратов Г.Р.

АКТ

впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи
 Чумаченка Дмитра Ігоровича
 виконаної на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Комісія у складі:

Голова

Пушкар О.М. – заступник головного
лікаря з медичної частини,

Члени комісії

Єрмолаєв М.М. – завідувач

гастроентерологічним центром,

Левченко Ю.О. – лікар-гастроентеролог
дитячий гастроентерологічного центру

склала даний акт про те, що в Комунальному закладу охорони здоров'я
 Обласна дитяча клінічна лікарня було використано наступні нові наукові
 результати досліджень дисертаційної роботи Чумаченка Дмитра Ігоровича:

– комп'ютерна програма «Компьютерная интерактивная имитационная
 среда агентного моделирования эпидемического процесса гепатита В
 «EventEpidSim»», свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №
 55118 від 02.06.2014 Чернишева Ю.К., Товстіка А.В., Чумаченка Д.І.,
 Чумаченко Т.О., Макарової В.І., що дозволила провести моделювання
 динаміки захворюваності на гепатит В, засноване на інтелектуальних
 раціональних агентах;


– комп'ютерна програма «Автоматизована система дослідження
 інфекційних захворювань за факторами ризику «ФАКТОР»», свідоцтво про
 реєстрацію авторського права на твір № 56462 від 11.09.2014 Чумаченко
 Т.О., Радивоненко О.С., Бреус Н.В., Макарової В.І., Чумаченка Д.І., що
 дозволила автоматизувати аналіз інфекційних захворювань на основі
 нечітких рекурентних моделей;

– патент на корисну модель №90971. Спосіб епідеміологічної
 діагностики вірусного гепатиту В у лікувально-профілактичному закладі /
 Т. О. Чумаченко, В. І. Макарова, Д. І. Чумаченко. - № u201401729; Заявлено

24.02.2014; Опубл. 10.06.2014, Бюл. №11., що дозволив проводити аналіз прогнозу динаміки захворюваності на гепатит В за допомогою нечітких рекурентних моделей та виявити можливість хаотичної динаміки прогнозованого епідемічного процесу;

– інформаційний лист про нововведення в системі охорони здоров'я № 3-2014. Спосіб прогнозування захворюваності на гепатит В за допомогою мультиагентного моделювання / Т. О. Чумаченко, Ю. К. Чернишов, Д. І. Чумаченко, В. І. Макарова, А. В. Товстік; Харківський національний медичний університет, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Укрмедпатентінформ. – К. : Укрмедпатентінформ, 2014. – 4 с., що дозволив зробити адекватний довгостроковий прогноз динаміки захворюваності на гепатит В, заснований на інтелектуальній мультиагентній технології.

Застосування розроблених моделей, методів та програмних комплексів дозволило підвищити точність та продовжити термін побудування прогнозів епідемічного процесу вірусного гепатиту В, внаслідок чого розробити ефективні превентивні заходи щодо профілактики захворюваності на вірусний гепатит В.

Голова комісії:  Пушкар О.М.

Члени комісії:  Єрмолаєв М.М.

 Левченко Ю.О.

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор

ТОВ «ПРОТЕКТМАСТЕР СОЛЮШНС»


 КНИШ М. М.
 29.11.16

АКТ



реалізації результатів дисертаційної роботи

Чумаченка Дмитра Ігоровича,

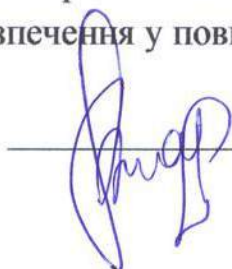
виконаної на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Комісія (голова – Таратушка Володимир Миколайович) склала даний акт про впровадження наукових результатів кандидатської дисертації Чумаченка Дмитра Ігоровича в практичну діяльність ТОВ «ПРОТЕКТМАСТЕР СОЛЮШНС», а саме:

– комп'ютерна програма «Мультиагентна система розповсюдження комп'ютерних хробаків у повнозв'язних гетерогенних мережах «MASWorm»», свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №68849 від 29.11.2016 Чумаченка Д. І. Чумаченко К. І., що дозволила провести ефективне імітаційне моделювання динаміки поведінки зловмисного програмного забезпечення типа мережевий хробак, засноване на інтелектуальних раціональних агентах.

Застосування розроблених методів дозволило одержати довгостроковий прогноз розповсюдження зловмисного програмного забезпечення типа мережевий хробак в умовах логічної невизначеності та підвищити точність його побудування, провести якісний аналіз поведінки комп'ютерних хробаків на основі нечітких рекурентних відображень та розробити ефективні профілактичні та превентивні заходи щодо захисту від шкідливого програмного забезпечення у повнозв'язних гетерогенних мережах.

Голова комісії:



В. М. Таратушка

Головний лікар
КОМУНАЛЬНОГО ЗАКЛАДУ ОХОРОНИ
ЗДОРОВ'Я «ОБЛАСНИЙ СПЕЦІАЛІЗОВАНИЙ
БУДИНОК ДИТИНИ «ЗЕЛЕНИЙ ГАЙ»



I.O. Titarenko
I.O. Титаренко

2016 Р.

реалізації результатів дисертаційної роботи

Чумаченка Дмитра Ігоровича

виконаної на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Комісія у складі:

Голова

Титаренко І.О. – головний лікар,

Члени комісії

Піддубко І.В. – заступник головного

лікаря з лікувальної частини,

Михайлова Т.О. – лікар-педіатр

склала даний акт про те, що у Лікувально-профілактичному закладі «Обласний спеціалізований будинок дитини КЗОЗ «Зелений гай» було використано наступні нові наукові результати досліджень дисертаційної роботи Чумаченка Дмитра Ігоровича:

– комп'ютерна програма «Мультиагентная модель динамики заболеваемости ВИЧ-инфекцией «HIVSim»», заснована на використанні інтелектуальних раціональних агентів, функціонуючих в умовах логічної невизначеності;

– метод побудування довгострокового прогнозу захворюваності на ВІЛ-інфекцію, який використовує метод ідентифікації об'єктів мультиагентної системи, заснований на частковій спостережуваності простору станів.

Застосування розроблених моделей та методів дозволило підвищити точність побудування прогнозів захворюваності на ВІЛ-інфекцію та розробити ефективні превентивні заходи щодо профілактики захворюваності на ВІЛ.

Голова комісії

I.O. Titarenko
Титаренко І.О.

Члени комісії

I.V. Pidubko
Піддубко І.В.

T.O. Mykhailova
Михайлова Т.О.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з НДР
Національного аерокосмічного
університету

ім. М. С. Жуковського «ХАІ»
д-р техн. наук, професор
Гайдачук О.В.



Акт


**щодо впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
Чумаченка Дмитра Ігоровича у науково-дослідницьку роботу
Національного аерокосмічного університету ім. М.С. Жуковського «ХАІ»**

Ми, що підписалися нижче, декан факультету систем управління літальними апаратами к.т.н., доцент Заболотний О.В., заступник декана факультету систем управління літальними апаратами з наукової роботи к.т.н. Добряк В.С., завідувач кафедри інформатики к.ф.-м.н., доцент Карташов О.В. склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Чумаченка Дмитра Ігоровича впроваджені у науково-дослідницьку роботу по кафедрі інформатики, а саме:

- імітаційна мультиагентна модель популяційної динаміки, заснована на інтелектуальних раціональних агентах, що функціонують в умовах логічної невизначеності;
- класифікація епідемічних процесів систем популяційної динаміки;
- метод аналізу популяційної динаміки, заснований на нечітких рекурентних моделях;
- метод ідентифікації об'єктів мультиагентної системи, заснований на частковій спостережуваності простору станів.

Результати впроваджені в рамках держбюджетних НДР №ДР 0115U000838 «Методологія удосконалення промислових паливно-енергетичних комплексів і авіаційних двигунів з використання інформаційно-вимірювальних систем моніторингу змінних станів в умовах невизначеності вхідних даних» та №ДР 0111U001072 «Методологія проектування елементів та інформаційно-вимірювальних систем контролю параметрів авіаційних двигунів і промислових паливно-енергетичних комплексів». Результати наукового дослідження дозволили одержати довгостроковий прогноз поведінки динамічної системи в умовах невизначеності, та оцінити можливість виникнення хаотичної динаміки процесу.

Декан факультету систем управління
літальними апаратами,
к.т.н., доцент

 О.В. Заболотний

Заступник декана факультету систем
управління літальними апаратами
з наукової роботи, к.т.н.

 В.С. Добряк

Завідувач кафедри інформатики,
к.ф.-м.н., доцент

 О.В. Карташов

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з НІР
 Національного аерокосмічного
 університету
 ім. М. С. Жуковського «ХАІ»
 д-р техн. наук, професор
 Павленко В.М.



« 16 » 12. 2016

Акт

**щодо впровадження результатів дисертаційної роботи
 на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
 Чумаченка Дмитра Ігоровича у навчальний процес
 Національного аерокосмічного університету ім. М.С. Жуковського «ХАІ»**

Ми, що підписалися нижче, голова методичної комісії факультету систем управління літальними апаратами Анікін А. М., завідувач кафедри інформатики доцент Карташов О. В., доцент кафедри інформатики Скоб Ю.О. склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Чумаченка Дмитра Ігоровича впроваджені у навчальний процес по кафедрі інформатики, а саме:

- імітаційна мультиагентна модель популяційної динаміки, заснована на інтелектуальних раціональних агентах, функціонуючих в умовах логічної невизначеності;
- метод аналізу популяційної динаміки, заснований на нечітких рекурентних моделях;
- методики та алгоритмічні моделі прогнозування епідемічного процесу систем популяційної динаміки за допомогою комп'ютерних систем EventEpidSim, ФАКТОР, InfluenzaSim, SyphilisSim, DiphtheriaSim та MASWorm.

Результати впроваджені у якості методичних та програмних засобів в рамках курсів «Системи штучного інтелекту», «Імітаційно-подійне моделювання», «Захист інформації в ІКС» та «Programming and numerical methods», а також у програму курсових та дипломних робіт у якості завдань та методик проведення розрахунків для підготовки бакалаврів, спеціалістів і магістрів кафедри інформатики. За результатами дисертаційної роботи було розроблено теоретичне, методичне та програмне забезпечення.

Результати наукового дослідження увійшли до навчальних посібників «Programming and numerical methods. Part 2: Numerical methods using MatLab and Mathcad: guidance manual for laboratory works», розробленого Чумаченком Д. І. у співавторстві, та «Захист інформації в ІКС», розробленого Чумаченком Д. І. самостійно.

Голова методичної комісії
 Факультету систем управління літальними
 апаратами
 доцент

А. М. Анікін

Завідувач кафедри інформатики
 доцент

О. В. Карташов

Науковий секретар кафедри інформатики
 доцент

Ю. О. Скоб

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор з науково-педагогічної роботи Харківського національного медичного університету доктор медичних наук професор В.А. Капустник



Метоніага 2016р.

Акт

**щодо впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
Чумаченка Дмитра Ігоровича у навчальний процес
Харківського національного медичного університету**

Ми, що підписалися нижче, голова методичної комісії з проблем професійної підготовки д.м.н. професор В.Д. Марковський, доцент кафедри епідеміології доцент В.І. Семішев, секретар – доцент Л.А. Ждамарова склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Чумаченка Дмитра Ігоровича впроваджені у навчальний процес по кафедрі епідеміології, а саме:

- імітаційна мультиагентна модель епідемічного процесу популяційної динаміки, заснована на інтелектуальних раціональних агентах, функціонуючих в умовах логічної невизначеності;
- методики та алгоритмічні моделі прогнозування епідемічного процесу систем популяційної динаміки за допомогою комп'ютерних систем EventEpidSim, ФАКТОР, InfluenzaSim, SyphilisSim, DiphtheriaSim та MASWorm.

Результати впроваджені у якості методичних та програмних засобів в рамках викладання курсу «Епідеміологія» студентам 5 курсів медичних факультетів, які навчаються за фахом «Лікувальна справа», «Педіатрія», «Медико-профілактична справа», в післядипломній освіті при навчанні лікарів-інтернів за спеціальністю «Епідеміологія»; при проходженні курсів підвищення кваліфікації лікарями-епідеміологами на передатестаційному циклі

«Епідеміологія», на курсах тематичного удосконалення «Вибрані питання епідеміології інфекцій дихальних шляхів», «Епідеміологічні дослідження в клінічній та профілактичній медицині. Основи доказової медицини», «Епідеміологія та профілактика інфекцій, які пов'язані з наданням медичної допомоги», а також впроваджені у програму курсових робіт у якості завдань та методик проведення розрахунків для підготовки студентів за спеціальностями «Лікувальна справа», «Педіатрія», «Медико-профілактична справа». За результатами дослідження було розроблено теоретичне, методичне та програмне забезпечення.

Голова методичної комісії

з проблем професійної підготовки ХНМУ

професор



В.Д. Марковський

Доцент кафедри епідеміології

Доцент



В.І. Семішев

Секретар комісії

Доцент



Л.А. Ждамарова

« 17 » листопада 20 16 р.

ДОДАТОК Г**ВІДОМОСТІ ПРО ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ ПРАВО НА РЕЗУЛЬТАТИ
ДОСЛІДЖЕННЯ**

УКРАЇНА

224



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ
№ 90971

СПОСІБ ЕПІДЕМІОЛОГІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ВІРУСНОГО
ГЕПАТИТУ В У ЛІКУВАЛЬНО-ПРОФІЛАКТИЧНОМУ
ЗАКЛАДІ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.06.2014.

Голова Державної служби
інтелектуальної власності України

М.В. Ковіня



Kovinya



МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ
Український центр наукової медичної інформації
та патентно-ліцензійної роботи
(Укрмедпатентінформ)

ІНФОРМАЦІЙНИЙ ЛИСТ

ПРО НОВОВВЕДЕННЯ В СФЕРІ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я

№3-2014

Випуск 1 з проблеми
 «Епідеміологія та специфічна
 профілактика інфекційних
 захворювань»
 Підстава: рекомендація головного
 спеціаліста МОЗ України

ГОЛОВНОМУ ДЕРЖАВНОМУ
 САНІТАРНОМУ ЛІКАРЮ
 МОЗ АР КРИМ, ОБЛАСНИХ,
 СЕВАСТОПОЛЬСЬКОЇ ТА КИЇВСЬКОЇ
 МІСЬКИХ УПРАВЛІНЬ ТА ЛАБОРАТОРНИХ
 ЦЕНТРІВ САНІТАРНО-ЕПІДЕМІОЛОГІЧНОЇ
 СЛУЖБИ

ГОЛОВНОМУ ЕПІДЕМІОЛОГУ
 МОЗ АР КРИМ, УПРАВЛІННЯ ОХОРОНИ
 ЗДОРОВ'Я ОБЛАСНИХ, СЕВАСТОПОЛЬСЬКОЇ
 ТА КИЇВСЬКОЇ МІСЬКИХ ДЕРЖАВНИХ
 АДМІНІСТРАЦІЙ

СПОСІБ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАХВОРЮВАНОСТІ НА ГЕПАТИТ В ЗА ДОПОМОГОЮ МУЛЬТИАГЕНТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

УСТАНОВИ-РОЗРОБНИКИ:

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МЕДИЧНИЙ
 УНІВЕРСИТЕТ МОЗ УКРАЇНИ**
**НАЦІОНАЛЬНИЙ АЕРОКОСМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
 ІМ. М.С. ЖУКОВСЬКОГО**
 «ХАРКІВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

**УКРМЕДПАТЕНТИНФОРМ
 МОЗ УКРАЇНИ**

А В Т О Р И:

**ЧУМАЧЕНКО Т.О.,
 ЧЕРНИШОВ Ю.К.,
 ЧУМАЧЕНКО Д.І.,
 МАКАРОВА В.І.,
 ТОВСТІК А.В.**



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА

ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 55118

Комп'ютерна програма "Компьютерная интерактивная имитационная среда агентного моделирования эпидемического процесса гепатита В "EventEpidSim"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) Чернишев Юрій Костянтинович, Товстік Андрій Вадимович, Чумаченко Дмитро Ігорович, Чумаченко Тетяна Олександрівна, Макарова Вікторія Іванівна

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать Харківський національний медичний університет, пр-т Леніна, 4, м. Харків, 61022

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

02.06.2014

Дата реєстрації



Голова Державної служби інтелектуальної власності України
М.В. Ковія



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА

ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 56462

Комп'ютерна програма "Автоматизована система дослідження інфекційних захворювань за факторами ризику "ФАКТОР"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) Чумаченко Тетяна Олександрівна, Радивоненко Ольга Сергіївна, Бреус Наталія Василівна, Макарова Вікторія Іванівна, Чумаченко Дмитро Ігорович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать Харківський національний медичний університет, пр-т Леніна, 4, м. Харків, 61022

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

11.09.2014

Дата реєстрації



M. V. Koviya

Голова Державної служби інтелектуальної власності України
М.В. Ковія



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА

ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 68482

Комп'ютерна програма "Мультиагентная модель динамики захворюваності на дифтерію "DiphtheriaSim"

(вид, назва твору)

Автор(и) Чумаченко Дмитро Ігорович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації

07.11.2016



Голова Державної служби інтелектуальної власності України
В.о. Голови А.А. Малиш



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА

ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 68481

Комп'ютерна програма "Мультиагентная модель динамики заболеваемости на сифиліс "SyphilisSim"

(вид, назва твору)

Автор(и) Чумаченко Дмитро Ігорозич

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації

07.11.2016



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
В.с. Голови А.А. Малиш



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА

ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 68480

Комп'ютерна програма "Мультиагентная модель динамики заболеваемости гриппом и ОРВИ "InfluenzaSim"

(вид, назва твору)

Автор(и) Чумаченко Дмитро Ігорович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації

07.11.2016



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
В.о. Голови А.А. Малиш



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА

ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 68849

Комп'ютерна програма "Мультиагентна система розповсюдження комп'ютерних хробаків у повноз'язних гетерогенних мережах "MASWorm"

(вид, назва твору)

Автор(и) Чумаченко Дмитро Ігорович, Чумаченко Катерина Ігорівна

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації

29.11.2016



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
В.о. Голови А.А. Малиш

ДОДАТОК Д

МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО АНАЛІЗУ ТА ПОБУДОВИ ПОРОГА ЗАХВОРЮВАНOSTІ НА ГРИП ТА ГРВІ

Метод оперативного аналізу епідемічної ситуації. Для проведення оперативного аналізу ситуації по захворюваності на грип та ГРВІ в місті необхідно наступне.

1. Пронумерувати i календарні тижні даного року. Кожен рік складається з 53 календарних тижнів.

2. Обчислити інтенсивні показники (на 10 000 населення) поточної захворюваності на грип та ГРВІ в кожній віковій групі і сумарно по всьому населенню в даному місті за тиждень, який аналізується:

$$I = \frac{N \cdot 10000}{Q} \quad , \quad (\text{Д.1})$$

де N – кількість тих, що захворіли; Q – населення в даній віковій групі; I – інтенсивний показник.

3. Порівняти дані по захворюваності поточного тижня з тижневим контрольним рівнем в абсолютних показниках для відповідного місяця і з епідемічними порогоми для аналізованого тижня, представленими в розрахункових таблицях для даного міста.

4. Визначити темп приросту захворюваності на поточному тижні і по відношенню до попереднього тижня ($i-1$) в кожній віковій групі і для всього населення в абсолютних і інтенсивних показниках

$$\frac{P_i - P_{i-1}}{P_{i-1}} \cdot 100\% \quad , \quad (\text{Д.2})$$

де P_i – захворюваність за тиждень, що аналізується; P_{i-1} – захворюваність за попередній тиждень.

Якщо один або кілька днів попереднього тижня виявляються святковими або канікулами у школярів, коли звернення хворих за медичною

допомогою знижуються, темпи приросту захворюваності розраховують по відношенню до найближчого робочого тижня.

5. Темп приросту захворюваності на грип та ГРВІ більше ніж 20% служить додатковою ознакою розвитку епідемії грипу в місті. Винятками є порівняння святкових тижнів зі звичайними і перехідний період від літа до осені (кінець серпня – початок вересня), коли темп приросту захворюваності завжди досить високий. У цих випадках поточна захворюваність не повинна перевищувати епідемічні пороги для аналогічних тижнів.

6. Якщо критерії оцінки ситуації тижня, що аналізується, виявляються нижче контрольного рівня і епідемічних порогів, ситуація щодо захворюваності на грип та ГРВІ оцінюється як благополучна, а в разі перевищення в окремих вікових групах або серед населення в цілому – захворюваність повинна розглядатися як маркер початку епідемії грипу.

7. Для оцінки розвитку поточної епідеміологічної ситуації в місті необхідно використовувати всі три способи в комплексі (тижневий контрольний рівень захворюваності в абсолютних показниках, епідемічні пороги в відносних показниках, темп приросту захворюваності).

8. Ознакою закінчення епідемії є зниження інтенсивного показника захворюваності на грип та ГРВІ до епідемічного порогу.

Метод визначення ураженості населення під час епідемії. Для обчислення захворюваності за період епідемії всього населення і його окремих вікових груп необхідно.

1. Розрахувати інтенсивні показники щотижневої захворюваності на грип та ГРВІ від початку до кінця епідемії. З огляду на те, що ці групи інфекцій реєструють сумарно, отримані результати щодо захворюваності на грип протягом періоду епідемії є завищеними за рахунок сезонного фону ГРВІ.

2. Для виключення сезонного фону ГРВІ за стандартною розрахунковою таблицею розрахувати середні показники неепідемічної

захворюваності на грип та ГРВІ протягом часу, аналогічного періоду епідемії.

3. З сумарного інтенсивного показника щотижневої захворюваності на грип та ГРВІ за епідемію відняти сумарний середній показник неепідемічної захворюваності, яка становить фон ГРВІ в період епідемії. Отримана різниця більш об'єктивно відображає рівень захворюваності, обумовлений грипом в період епідемії.

Прогнозування захворюваності на гострі респіраторні вірусні інфекції в не епідемічний з грипу період. Отримані за допомогою алгоритму визначення ураженості населення під час епідемії, середні значення неепідемічної захворюваності можна розглядати як прогноз динаміки ГРВІ негрипозної етіології в період між епідеміями. Для того, щоб судити про можливу неепідемічну захворюваність в цілому або в кожній віковій групі населення, необхідно вибрати в розрахунковій таблиці середні значення за тиждень або за інший термін, який цікавить. Вважати найбільш вірогідним показником середню захворюваність. Відхилення від середнього не перевищуватимуть епідемічний поріг з довірчою ймовірністю 95%.

Методи розрахунку епідемічних порогів. Необхідними даними для обчислення епідемічних порогів є статистичні відомості про сумарну захворюваність на грип та ГРВІ в інтенсивних показниках на 10 000 населення за календарні тижні кожного року протягом останніх 5–10 років.

У згрупованому за стандартними календарними тижнями ретроспективному масиві інформації в кожному році, згідно з пунктом «Оперативний аналіз ситуації», у всіх вікових групах і у населенні в цілому визначають тижні, протягом яких в місті була епідемія грипу. При цьому необхідно враховувати, що в різних вікових групах їх тривалість часто не однакова. Такі тижні виділяють і виключають з розрахунку.

Епідемічні пороги розраховують як верхні толерантні межі показників неепідемічної захворюваності на ГРВІ, виходячи з припущення їх розподілу за нормальним законом.

Нехай $X = \{X'_i\}, i = \overline{1, N}$ – множина захворюваності на грип в якомусь місті за i -тий тиждень неепідемічного періоду за N_i років. Розрахунки робляться одним з двох методів, в залежності від кількості спостережень N_i .

I. Метод розрахунку епідемічних порогів при достатній кількості спостережень. Достатньою кількістю спостережень вважають $N_i \geq 5$.

1. Розраховують середнє значення захворюваності:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i} X'_n \quad (\text{Д.3})$$

2. Розраховують середнє квадратичне відхилення:

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{N_i - 1} \sum_{n=1}^{N_i} (X'_n - \bar{X}_i)^2} \quad (\text{Д.4})$$

3. Розраховують верхню толерантну межу:

$$X'_e = \bar{X}_i + Q_{N_i-2} \sqrt{\frac{N_i - 1}{N_i - 2 + Q^2_{N_i-2}}} \cdot S_i, \quad (\text{Д.5})$$

де Q_{N_i-2} – значення критерію Стьюдента для довірчої ймовірності 95% з $N_i - 2$ ступенями свободи. Значення критерію Стьюдента з різними ступенями свободи представлено в табл. Д.1.

Таблиця Д.1 – Значення критерію Стьюдента

Кількість ступенів свободи	Значення критерію Стьюдента для довірчої ймовірності 95%
2	4,303
3	3,182
4	2,776
5	2,571
6	2,445
7	2,365
8	2,306
9	2,262
10	2,228

II. Метод розрахунку епідемічних порогів при малій кількості спостережень. Малою кількістю спостережень вважають $N_i < 5$.

1. Для кожного тижня з числом спостережень $N_i > 1$, за які в даний інтервал часу було два або більше року, коли для тижня з номером i дані є, але рік був неепідемічним, розраховують середнє значення \bar{X}_i і середнє квадратичне відхилення, як у методі розрахунку епідемічних порогів при достатній кількості спостережень. Далі для всіх тижнів з числом спостережень $N_i > 1$ розраховують коефіцієнт варіації

$$V_i = \frac{S_i}{\bar{X}_i} \cdot 100\% , \quad (\text{Д.6})$$

де i – порядковий номер тижня в році.

2. Отриманий набір коефіцієнтів варіації розглядається як вибірка, число спостережень в якій 53 або менше. За вибіркою розраховують середній коефіцієнт варіації \bar{V}

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^k V_i}{k} , \quad (\text{Д.7})$$

де k – кількість тижнів, за якими розраховано коефіцієнти варіації.

3. Для кожного тижня з малим числом спостережень розраховують оцінку середнього квадратичного відхилення (\tilde{S}_i)

$$\tilde{S}_i = \frac{\bar{V} \cdot \bar{X}_i}{100} \quad (\text{Д.8})$$

4. Розраховують значення епідемічного порога

$$X'_e = \bar{X}_i + 1.67 \cdot \tilde{S}_i \quad (\text{Д.9})$$

Апроксимація вхідних даних [113]. Для коригування вхідних даних використовується апроксимація кубічними сплайнами (B_3). Для апроксимації сплайнами побудуємо функціонал

$$J = \sum_{j=i}^m \left(\sum_{i=1}^n C_i \varphi_i(x_j) - y_j \right)^2 , \quad (\text{Д.10})$$

де φ_i – сплайни B_3 ; y_i – значення, які необхідно апроксимувати; C_i – шукані коефіцієнти, які будемо визначати з мінімуму функції J

$$\frac{\partial J}{\partial C_i} = 0 \quad (\text{Д.11})$$

Продиференціювавши (Д.10) за C_k отримаємо систему лінійних рівнянь

$$\sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^n C_i \varphi_i(x_j) \varphi_k(x_k) - y_j \varphi_k(x_k) \right] = 0 \quad (\text{Д.12})$$

$$\sum_{i=1}^n C_i \sum_{j=1}^m \varphi_i(x_j) \varphi_k(x_k) = \sum_{j=1}^m y_j \varphi_k(x_k) \quad (\text{Д.13})$$

Розв'язуючи систему (Д.12, Д.13), отримаємо коефіцієнти C_i , за допомогою яких отримаємо новий набір вже апроксимованих даних y'_j .

Крім апроксимування, введемо деякий зовнішній вплив. Спочатку передбачалося введення в розгляд даних, скоригованих ваговими функціями, але через недостатню кількість вхідних параметрів це стало неможливим. Тому пропонується зсув вибірок на деякий Δt крок щодо базисної вибірки (базового року). Таким чином, щоб при зсуві квадрат відхилення отриманої та базової вибірок був менше, ніж квадрат відхилення вихідної і базової.

Проблемою реалізації даної апроксимації було те, що введення зсуву вихідних вибірок дало позитивні результати лише в найбільш проблемній категорії населення – школярі (7-14 років). В інших же вікових категоріях досить було лише апроксимувати початкову вибірку.

Також є фактори, вплив яких на статистичні дані не можна не враховувати. Це температурні показники (при низькій температурі повітря збільшується скупченість населення, що полегшує розповсюдження вірусу грипу); план виконання вакцинації населення, а також серотип вірусу. Маючи дані з захворюваності та характеристики епідемічної ситуації за попередні роки можна розв'язувати зворотну задачу, тим самим порівнюючи результат з реальними статистичними даними [190].

ДОДАТОК Е

СПОСІБ ЕПІДЕМІОЛОГІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ВІРУСНОГО ГЕПАТИТУ В У ЛІКУВАЛЬНО-ПРОФІЛАКТИЧНОМУ ЗАКЛАДІ

ВГВ є істотною проблемою новітньої охорони здоров'я, займає серйозне місце в структурі внутрішньолікарняних хвороб та є одним з найбільш важливих професійних захворювань медичних працівників. Розповсюдженість ВГВ серед пацієнтів і медичних працівників у лікувально-профілактичних закладах є суттєво більшою, ніж серед донорів крові (індикаторна група) і представників дорослого населення та різниться в різних стаціонарах в залежності від їх специфіки.

В основу розробленого способу покладено задачу розширення арсеналу способів епідеміологічної діагностики епідемічної ситуації з інфекційних захворювань в лікувально-профілактичних закладах, підвищення інформативності й точності оцінки епідемічної ситуації в лікувально-профілактичних закладах, що дає можливість з високим ступенем достовірності оцінити епідемічну ситуацію, а у разі виявлення нестійкої або неблагополучної ситуації своєчасно провести адекватні профілактичні та протиепідемічні заходи.

Задачу, яку покладено в основу способу, вирішують тим, що у відомому способі оцінки епідемічної ситуації у лікувально-профілактичному закладі, який включає визначення

$$I = (-0,01 T_{Z_m} - 0,01 T_{Z_n} + 0,1 H_m + 0,1 H_n + 10 C_k - 0,01 B_m - 0,01 B_n) * T_c * P_n, \quad (E.1)$$

де I – епідеміологічний показник, Z_m – темп змінення показників захворюваності медичних працівників, Z_n – темп змінення показників захворюваності пацієнтів, H_m – відсоток носіїв HbsAg серед медичних працівників, H_n – відсоток носіїв HbsAg серед пацієнтів, B_m – відсоток вакцинованих медичних працівників, B_n – відсоток вакцинованих пацієнтів, C_k – відсоток позитивних результатів тестів на скриту кров, T_c – показник

типу стаціонара, P_n – показник парентерального навантаження, якщо I до 0,5, епідемічна ситуація з ВГВ може бути розцінена як благополучна, якщо епідеміологічний показник дорівнює 0,51 – 1,5, епідемічна ситуація розглядається як не стійка, а якщо епідеміологічний показник сягає 1,51 та більше, це свідчить про неблагополучну епідемічну ситуацію.

Даний спосіб оцінки епідемічної ситуації з ВГВ виконується наступним чином.

Визначається щорічний темп змінення показників захворюваності на ВГВ окремо серед медичних працівників та пацієнтів закладу по формулі:

$$TЗ = \frac{ПЗ \text{ поточного року} - ПЗ \text{ попереднього року}}{ПЗ \text{ попереднього року}} \times 100 \quad (E.2)$$

Враховують кількість носіїв HbsAg серед пацієнтів та медичних працівників ЛПЗ (окремо), а також обчислюють показник охоплення цих контингентів щепленнями проти ВГВ. Враховують і додають до загальної суми результати, отримані при проведенні тестів на скриту кров. Показник типу стаціонару визначається залежно від ступеня епідеміологічного ризику можливого внутрішньолікарняного розповсюдження ВГВ.

При проведенні епідеміологічної діагностики в відділеннях максимального ризику можливого внутрішньолікарняного розповсюдження ВГВ (відділення гемодіалізу, гематології та переливання крові, гастроентерології) використовуємо коефіцієнт 0,4, у відділеннях високого ризику (кардіології, неврології, пульмонології) – 0,3, у відділеннях проміжного ризику (онкології, амбулаторно-поліклінічне) – 0,2, у відділеннях найменшого ризику (терапії, гінекології, хірургії, травматології та ортопедії) – 0,1.

При кратності парентеральних втручань за добу 1 – 5 на одного пацієнта використовуємо коефіцієнт 1, при парентеральному навантаженні 6 - 10 маніпуляцій – коефіцієнт 2; 10 і більше – коефіцієнт 3.

Ефективність розробленого способу ілюструє наступний приклад.

Приклад 1. У кардіологічному стаціонарі працює 756 медичних робітників, з них щеплені проти ВГВ 711 осіб, захворюваність на ВГВ серед персоналу в минулому році склала 1,2 на 1000 медичних працівників, в поточному році захворювань на ВГВ не зареєстровано. Серед пацієнтів показник захворюваності в минулому та поточному роках склав відповідно 0,2 та 0,1 на 1000 пацієнтів, що виписались. При обстеженні медичних працівників на HbsAg всі результати негативні, серед обстежених пацієнтів HbsAg виявлено у 1,9 % випадків. При проведенні якості предстерилізаційної обробки виявлено 0,03 % позитивних проб на скриту кров, парентеральне навантаження не перевищувало 5 на 1 пацієнта.

Визначаємо темп змінення показників захворюваності на ВГВ серед медичних працівників і пацієнтів закладу по формулі

$$TЗ_{м} = \frac{0 - 1,2}{1,2} \times 100\% = -100\% ;$$

$$TЗ_{п} = \frac{0,1 - 0,2}{0,2} \times 100\% = -50\% ;$$

$$B_{м} = \frac{711}{756} \times 100\% = 94\% ;$$

$$H_{м} = 0\% ;$$

$$H_{п} = 1,9\% ;$$

$$C_{к} = 0,03\% .$$

$T_c = 0,3$, кардіологічний стаціонар відноситься до стаціонарів високого ризику можливого внутрішньолікарняного розповсюдження ВГВ, тому використовуємо коефіцієнт 0,3;

$$П_{п} = 1, \text{ показник парентерального навантаження}$$

Одержані значення вимірів вводимо у формулу

$$I = (-100 * -0,01 + 0,01 * 50 + 0,1 * 0 + 0,1 * 1,9 + 10 * 0,03 - 0,01 * 94 - 0,01 * 0) * 0,3 * 1 = 0,315.$$

.При проведенні підрахунків згідно розроблених коефіцієнтів епідеміологічний показник складає 0,3, що свідчить про благополучну епідемічну ситуацію з ВГВ.

Приклад 2. У стаціонарі хірургічного профілю працює 305 медичних працівників, захворюваність на ВГВ серед них в минулому році склала 0,8 на 1000 медичних працівників, у поточному році захворювань на ВГВ не зареєстровано. Серед пацієнтів показник захворюваності залишився на тому ж рівні та склав 0,2 на 1000 пацієнтів, що виписалися. При обстеженні медичних працівників на HbsAg всі результати негативні, серед обстежених пацієнтів HbsAg виявлено в 1,3 % випадків. Охоплення щепленнями медичних працівників дорівнювало 69 %. При проведенні якості предстерилізаційної обробки виявлено 0,5 % позитивних проб на скриту кров, парентеральне навантаження склало 5 маніпуляцій на 1 пацієнта за добу.

$$TZ_n = \frac{0,2 - 0,2}{0,2} \times 100\% = 0\% .$$

При проведенні підрахунків згідно розроблених коефіцієнтів, епідеміологічний показник складає 0,54, що свідчить про нестійку епідемічну ситуацію з ВГВ у даному стаціонарі та може призвести до росту ВГВ серед медичних працівників і пацієнтів закладу.

ДОДАТОК Ж

МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ ЗАХВОРЮВАНОСТІ НА ІКСОДОВІ КЛІЩОВІ БОРЕЛІОЗИ

Іксові кліщові бореліози (ІКБ) – група інфекційних трансмісивних природно-осередкових захворювань, що викликаються бореліями групи *B. burgdorferi* і передаються іксовими кліщами. Клінічно захворювання протікає з переважним ураженням шкіри, нервової системи, опорно-рухового апарату, м'яза серця і характеризується схильністю до хронічного, а також латентного перебігу [192].

У США спеціалізованим центром з контролю і профілактики захворювань (CDC) в Атланті щорічно реєструється понад 5 тисяч хворих. У країнах Європи, за оцінками німецьких вчених, кількість хворих може становити до 8–10 тис. щорічно. Інтенсивні показники захворюваності на бореліоз у Франції становлять 39,4 на 100 тис. населення, в Болгарії – 36,6 тис. [193].

Назву хвороби (ІКБ) почали використовувати після відкриття в останні роки нових генотипів борелій групи *B. burgdorferi*, які також передаються іксовими кліщами. До цього випадки цієї групи захворювань реєструвалися як хвороба Лайма. І зараз за офіційною звітною статистикою ці захворювання можуть проходити під назвою «хвороба Лайма». Дане положення регламентовано на підставі короткого варіанта Міжнародної статистичної класифікації захворювань і проблем, пов'язаних зі здоров'ям, 10-го перегляду, прийнятої Сорок третьою Всесвітньою асамблеєю охорони здоров'я.

В Україні, за даними Львівського НДІ епідеміології та гігієни, різноманітність нозологічних форм хвороби Лайма пов'язана з циркуляцією всіх трьох патогенних для людини видів борелій *B. burgdorferi*, *S. stricto*, *B. garinii*, *B. afzelii*. У найбільш активних природних осередках хвороби Лайма в Україні інфікованість бореліями кліщів становить 10–70%.

Епідеміологічні та серологічні дослідження, проведені даним інститутом, показали, що від 10 до 42,2% населення України має контакт із збудником бореліозу [194]. Це свідчить про активність епідемічного процесу хвороби Лайма.

Через неповне і несвоєчасне виявлення захворювань даної групи неможливо оцінити дійсний стан захворюваності, що робить їх епідеміологічно неконтрольованими і створює значну загрозу для виникнення епідемічних ускладнень.

Крім цього, передумовами виникнення випадків захворювань є збільшення чисельності кліщів, особливо в рекреаційних зонах, зростання інфікованості кліщів бореліями. Внаслідок зростання популяцій кліщів відзначається підвищення числа випадків укусів кліщами населення.

Аналіз захворюваності на ІКБ на території, що досліджується. Для аналізу було обрано Харківську область.

У Харківській області перший випадок ІКБ зареєстрований в 2000 р., з цього часу в ній проводиться епідеміологічний нагляд. Мною проведено епідеміологічний і ентомологічний аналіз з 2000 по 2015 р. Показники захворюваності в Україні перевищують показники в Харківській області (крім 2005 р), з 2006 р намітилася стійка тенденція зростання захворюваності. В останні роки в області загострюється епідемічна ситуація з ІКБ, кількість випадків захворювання продовжує зростати (з 2 випадків в 2000 р до 228 в 2015 р). За період епідеміологічного нагляду відмічено 4 різкі підйоми захворюваності в 2005, 2009, 2012, 2015 рр. з поступовим зростанням показників в наступні 2–3 роки, крім 2014 р., коли відзначалося зниження захворюваності в 1,8 раза в порівнянні з попереднім роком. У 2015 р. показники зросли в 4 рази.

В області виявлено 371 територія, ензоотична з бореліозу. На території України, в тому числі і в Харківській області, основним переносником збудників хвороби Лайма є європейський кліщ *I. ricinus*, який

домінує на території України. У найбільш активних природних осередках хвороби Лайма в Україні інфікованість бореліями кліщів досягає 10–70%.

На території Харківської області виявлено 7 видів іксодових кліщів, з яких найбільш епідемічно значущих три: іксодус рицинус (лісовий кліщ), дермацентор ретикулятус (луговий кліщ) і дермацентор маргінатус (пасовищний кліщ). Найбільш численним і поширеним на території всієї області є іксодус рицинус, який в структурі всіх зібраних в природних умовах кліщів становить 86 %, дермацентор ретикулятус – 10 %, дермацентор маргінатус – 4 %. Чисельність іксодових кліщів в природних умовах, яка залежить від циклу розвитку і ряду факторів навколишнього середовища, коливалася від 12,1 на 1 км маршруту в 2001 р. до 1,71 у 2012 р. Лабораторними дослідженнями кліщів з природи і відібраних на домашніх тваринах виявлено 5,1 і 11,4 % відповідно, інфікованих збудником хвороби Лайма – *Borrelia burgdorferi*.

Серед видів кліщів більш високий показник інфікованості встановлено у дермацентора маргінатуса (14,2 %), однак з огляду на невелику чисельність і меншу агресивність при нападі на людину цей вид не відіграє значної ролі в епідемічному процесі ІКБ в Харківській області. За період, що аналізується (з 2000 по 2015 р.), інфікованість всіх видів кліщів бореліями зросла з 4,4 до 23,9 %. У 2014 р. інфікованість зменшилася до 21,4 %, чисельність кліщів до (1,3 на 1 км маршруту проти 1,9 в 2013 році і 1,93 у 2015 р.).

За всі роки проведеного епідеміологічного аналізу захворюваність мала виражену сезонність з максимумом в травні-липні (46,9 – 58,5 %). Присмоктування кліща найчастіше відбувалися в травні-липні (65,8 %) і вересні-жовтні (20,1 %), що відповідає періоду найбільшої його активності.

У 2014 і 2015 рр. зросла кількість осіб, що заразилися в антропоургічних осередках і склала 85,1 і 73,1 %, у той час як в попередні роки їх число було трохи менше 50 %. У два рази збільшилася питома вага осіб, інфікованих на дачах і присадибних ділянках, – 36,0 проти 14,9 %. Таким чином, слід

зазначити, що ІКБ є актуальною інфекцією для Харківської області зі значним медичним, соціальним і економічним збитком.

Прогнозування методом ковзного середнього. Математичне моделювання як елемент моніторингу природно-осередкових інфекцій дозволяє оцінити епідеміологічний потенціал осередків в регіоні і на окремих територіях, спрогнозувати тенденції епідемічного процесу і визначити основні пріоритети й напрямки в профілактиці ІКБ. Прогнозування розповсюдження даної хвороби дозволить встановити основні фактори, що впливають на інтенсифікацію епідемічного процесу ІКБ, і провести раціональні профілактичні та протиепідемічні заходи з мінімальними фінансовими і трудовими затратами.

У даному дослідженні процес розробки прогнозу здійснюється за допомогою методу ковзного середнього. Даний метод використовується для згладжування і прогнозування часових рядів.

Метод ковзного середнього дозволяє виявити тенденції зміни фактичних значень параметра Y в часі і спрогнозувати майбутні значення Y . Отриману модель можна ефективно використовувати у випадках, якщо для значень прогнозованого параметра спостерігається стала тенденція в динаміці. Основна ідея методу ковзного середнього полягає в заміні фактичних рівнів досліджуваного часового ряду їх середніми значеннями, що погашають випадкові коливання. В результаті згладжується ряд значень досліджуваного параметра, що дозволяє більш чітко виділити основну тенденцію його зміни.

Метод ковзного середнього – відносно простий метод згладжування і прогнозування часових рядів, заснований на поданні прогнозу y_t^* у вигляді середнього значення m попередніх спостережуваних значень y_{t-i} ($i=1, m$), тобто

$$y_t^* = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{t-i} \quad (\text{Ж.1})$$

Якщо, наприклад, при дослідженні часового ряду даних про популяцію кліщів по роках в якості прогнозу вибрати ковзне середнє за три роки ($m = 3$),

то прогнозом на 2016 р. буде середнє значення показників за три попередні роки (2013, 2014, 2015). Якщо ж вибрати ковзне середнє за чотири роки ($m = 4$), то прогнозом на 2016 р. буде середнє значення показників за чотири попередні роки (2012, 2013, 2014, 2015).

Прогнозування чисельності популяції кліщів, які є переносниками хвороби Лайма, методом ковзного середнього, заснованим на спостереженнях за 3 (або 4) попередні роки, буває ефективнішим, ніж методи, засновані на довгострокових спостереженнях (за 10 років і більше). Це пояснюється тим, що в результаті застосування 3-річного ковзного середнього кожне з 3-х значень показника (за ці три роки) відповідає за одну третину значення прогнозу. При 10-річному ковзному середньому значення кожного з показників цих же останніх трьох років відповідають лише за одну десяту прогнозу.

На жаль, немає правила, що дозволяє підбирати оптимальне число m членів ковзного середнього. Однак можна відзначити, що чим менше m , тим сильніше прогноз реагує на коливання часового ряду, і навпаки, чим більше m , тим процес прогнозування стає більш інерційним. На практиці величина m зазвичай приймається в межах від 2 до 10. При наявності достатнього числа елементів часового ряду прийнятне для прогнозу значення m можна визначити, наприклад, наступним чином:

- задати декілька попередніх значень m ;
- згладити часовий ряд, використовуючи кожне задане значення m ;
- обчислити середню помилку прогнозування за однієї з формул:

середнє абсолютне відхилення

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_t |y_t - y_t^*|; \quad (\text{Ж.2})$$

середнє відносне відхилення

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_t \left| \frac{y_t - y_t^*}{y_t} \right|; \quad (\text{Ж.3})$$

середнє квадратичне відхилення

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_t (y_t - y_t^*)^2}, \quad (\text{Ж.4})$$

де n – кількість моментів часу t , що використовуються при розрахунку;

- вибрати значення m , що відповідає меншій похибці.

Дане дослідження дозволяє спрогнозувати інтенсивний показник захворюваності на ІКБ, звертання населення з приводу укусів, кількість людей, інфікованих бореліями після укусів кліщів, а також чисельність кліщів (пр/км). Отримані дані будуть основою для планування раціональних і ефективних профілактичних і протиепідемічних заходів.

Автоматизація і програмна реалізація. Для автоматизації прогнозування захворюваності на ІКБ на мові C# розроблено програмний комплекс, який дозволяє обчислити прогнозу захворюваність на підставі існуючих статистичних даних в режимі реального часу. Базова настройка програмного комплексу включає дані з 2004 по 2016 рр. Дані по роках включають інтенсивні показники захворюваності на 100 тис. населення, звернення населення з приводу укусів кліщів, результати досліджень кліщів, знятих з людей, наявність борелій і питому вагу інфікованих бореліями кліщів, зібраних на прапор, показники чисельності кліщів.

Для початку розрахунку прогнозу необхідно ввести роки, за які є дані (мінімум за 3 роки включно) і на скільки років вперед необхідно виконати прогноз (рис. Ж.1).

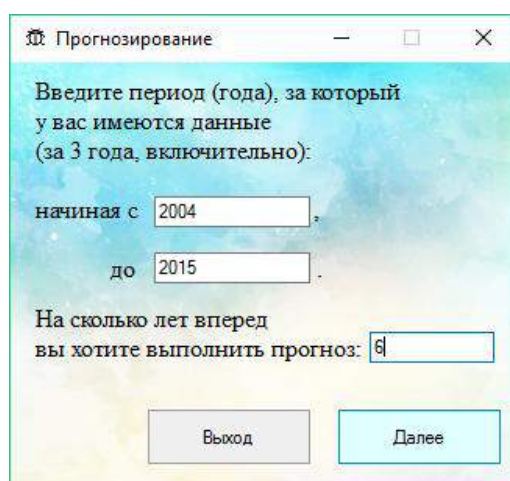


Рисунок Ж.1 – Початкове вікно роботи програмного комплексу

Потім необхідно ввести дані за кожен рік або вибрати наявні значення за період 2004 – 2015 рр. і виконати прогноз (рис. Ж.2, Ж.3). Після введення даних за один рік необхідно натиснути на кнопку «Додати дані». Після заповнення всіх значень за кожен рік необхідно натиснути «Прогноз», щоб виконати прогноз.

Прогнозирование

Введите данные.

Использовать существующие значения

Год: 2004

Забол 2004

2005

Интег 2006

2007

Обра 2008

2009

Интег 2010

Иссле 2011

2012

Поло 2013

2014

Иссле 2015

Положит. /% : 0

Численность клещей (фл./км): 0

Добавить данные Прогноз

Рисунок Ж.2 – Вибір року для прогнозування

Прогнозирование

Введите данные.

Использовать существующие значения

Год: 2004

Заблеваемость: 0

Интенсивный показатель на 100 тыс. населения: 0

Обращаемость по поводу укусов клещей: 0

Интенсивный показатель на 100 тыс. населения: 0

Исследование клещей снятых с людей: 0

Положит. /% : 0

Исследование клещей, флаг: 0

Положит. /% : 0

Численность клещей (фл./км): 0

Добавить данные Прогноз

Рисунок Ж.3 – Введення даних для прогнозування

Далі програмний комплекс автоматично розраховує прогноз. Результати представлені у вигляді графіків. Є можливість подивитися точне значення, навівши курсором мишки на потрібну точку.

На підставі обчисленого прогнозу (рис. Ж.4) можна зробити висновок про подальше збільшення числа випадків ІКБ з певною трирічною циклічністю: збільшення числа випадків ІКБ протягом 2-х років з незначним зниженням на наступний рік.

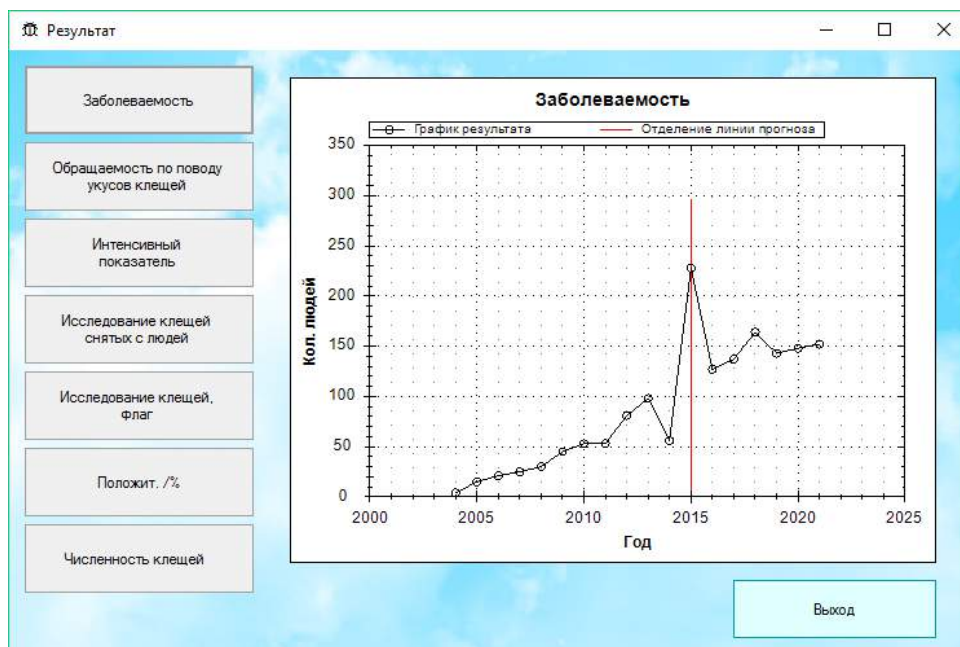


Рисунок Ж.4 – Динаміка показників захворюваності на хворобу Лайма

На підставі прогнозу (рис. Ж.5) простежується подальше зростання звернення за медичною допомогою у зв'язку з укусами кліщів. При цьому чітка циклічність відсутня.

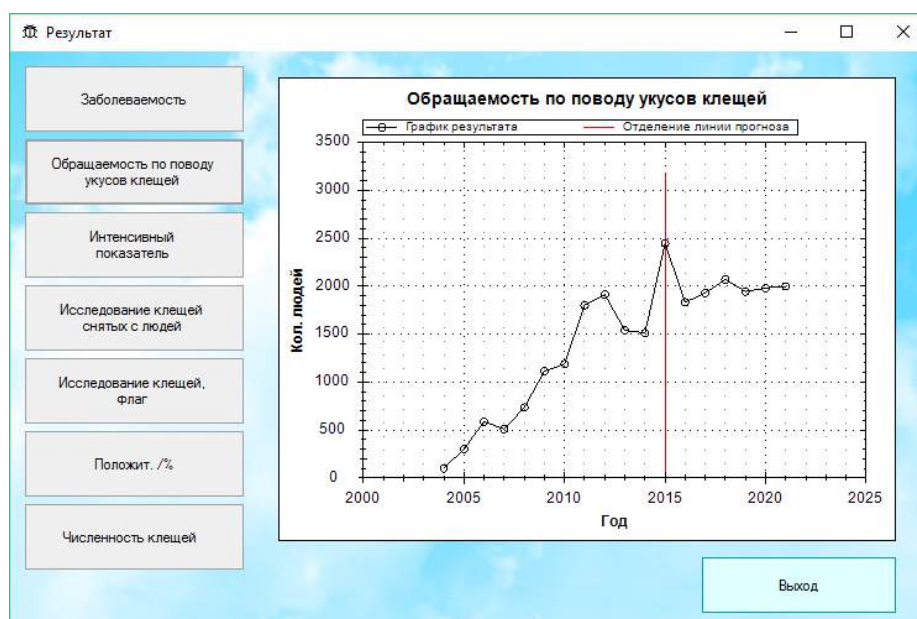


Рисунок Ж.5 – Звернення за медичною допомогою з приводу укусів кліщами

Як видно з графіка (рис. Ж.6), простежуються загальні тенденції зростання показників захворюваності на хворобу Лайма та звернення населення за медичною допомогою з приводу укусів кліщів на 100 тис. населення.

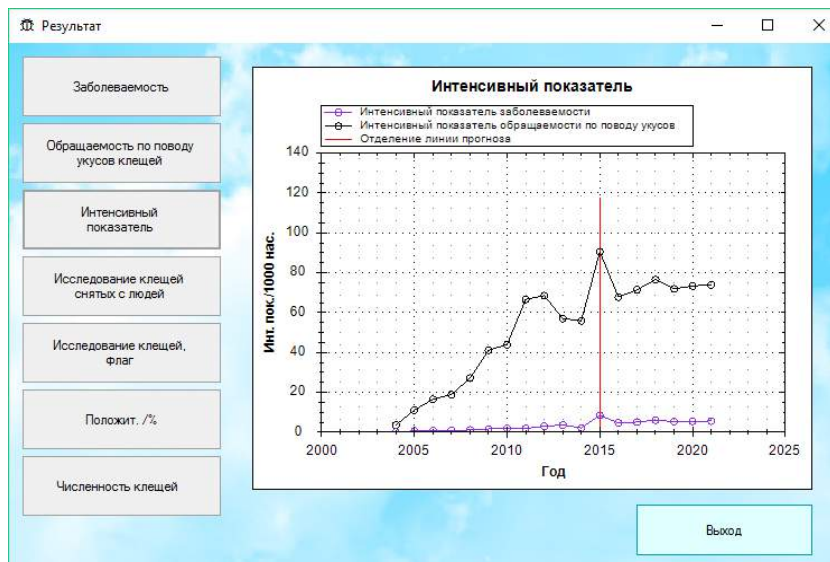


Рисунок Ж.6 – Показники захворюваності на хворобу Лайма та звернення людей за медичною допомогою з приводу укусів кліщів в перерахунку на 100 тис. населення

На підставі розрахованого прогнозу (рис. Ж.7) можна припустити незначне зниження і стабілізацію чисельності кліщів у природних станціях.

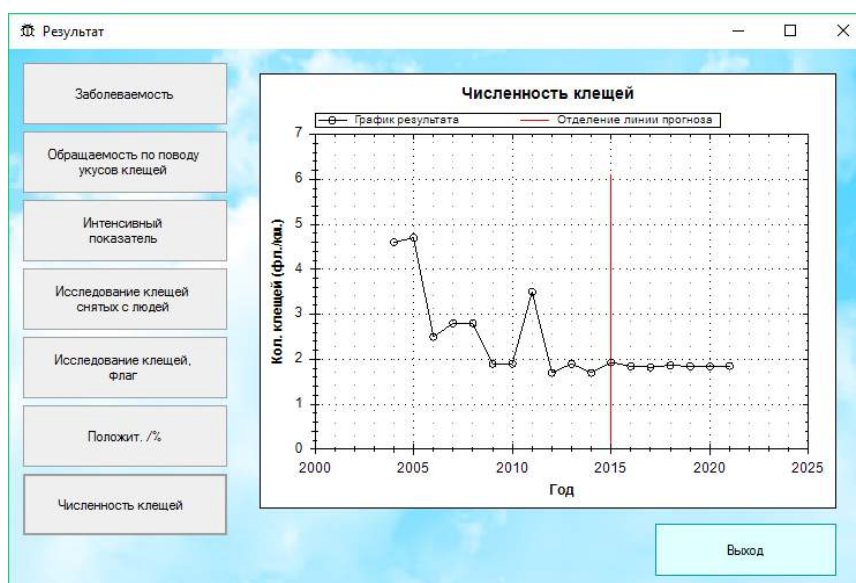


Рисунок Ж.7 – Чисельність кліщів в природі за результатами ентомологічного моніторингу

Прогноз чисельності інфікованих бореліями кліщів (рис. Ж.8, Ж.9) показує, що їх кількість не буде знижуватися, як і в останні роки.

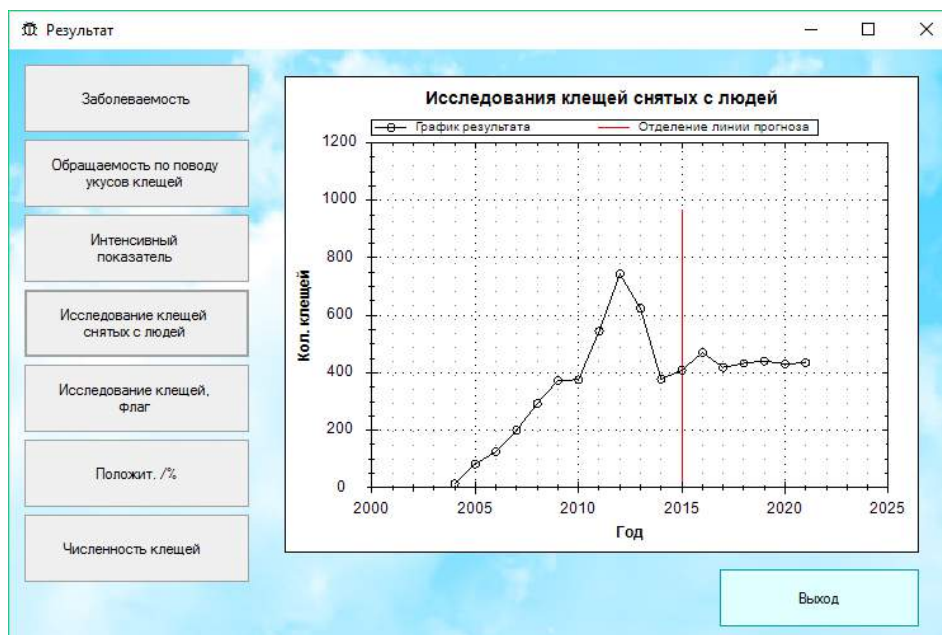


Рисунок Ж.8 – Дослідження кліщів, знятих з людей

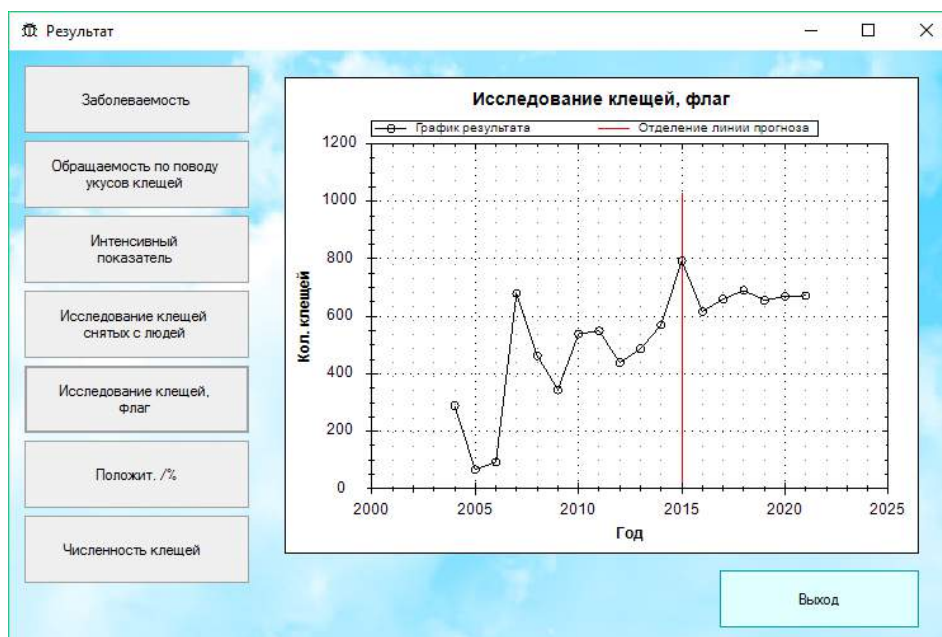


Рисунок Ж.9 – Дослідження кліщів, прапор

Як видно з рис. Ж.10, простежується відсутність прямого зв'язку між рівнем інфікованості бореліями кліщів у природі і кліщів, знятих з людей.

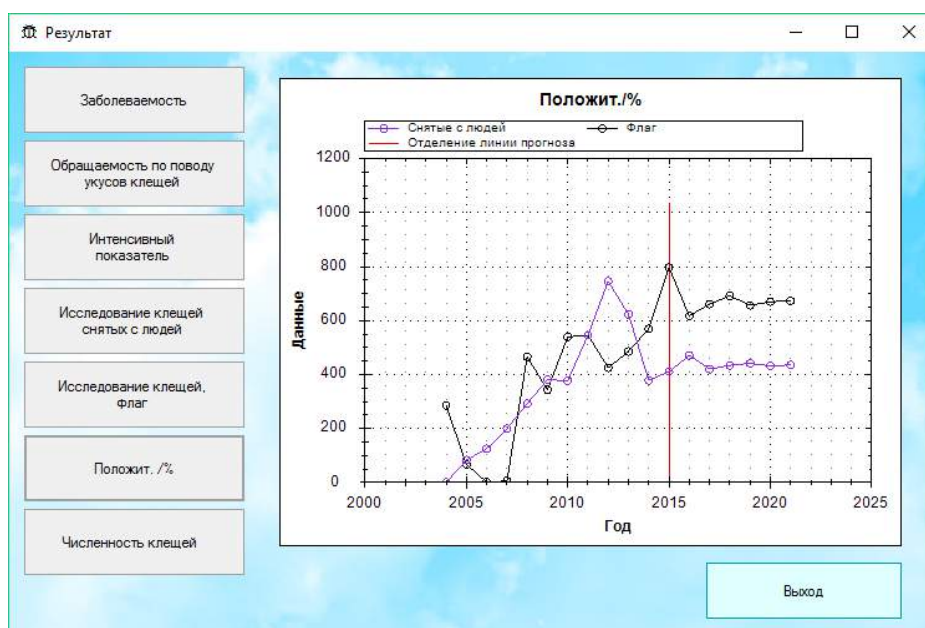


Рисунок Ж.10 – Рівень інфікованості кліщів бореліями

Проведено аналіз захворюваності на іксодовий кліщовий бореліоз в Харківській області з 2000 по 2015 р. Розроблено програмний комплекс, що дозволяє обчислити прогнозний рівень захворюваності на ІКБ на підставі методу ковзного середнього. Адекватність побудованого прогнозу перевірена на реальних статистичних даних щодо захворюваності на ІКБ.

Таким чином, проведені дослідження показує, що зберігається нестійка епідемічна ситуація щодо ІКБ, що диктує необхідність розробки плану профілактичних заходів, головною метою якого є зниження захворюваності людей на ІКБ.

ДОДАТОК И

ЕКСПЕРТНА СИСТЕМА ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ ІНФЕКЦІЇ СЕЧОВИВІДНИХ ШЛЯХІВ

У зоні проведення антитерористичної операції (АТО) на сході України існує ряд проблем, пов'язаних з наданням медичної допомоги: в тилу не вистачає клінік для реабілітації поранених бійців, відсутнє необхідне обладнання для надання повноцінної медичної допомоги, недостатня кількість медпрепаратів. Також однією з найбільших проблем в зоні АТО є брак кадрів і відсутність фахівців в області військово-польової хірургії. Деякі кадрові прогалини заповнюються за допомогою волонтерів, які не мають досвіду надання медичної допомоги в умовах ведення бойових дій. Таким чином, існує висока ймовірність виникнення інфекцій, пов'язаних з наданням медичної допомоги [195].

У структурі інфекцій, пов'язаних з наданням медичної допомоги, частка інфекцій сечовивідних шляхів становить близько 40%. Частою причиною цих інфекцій є тривала катетеризація сечового міхура, що проводиться під час поранень та інших травм, характерних для збройного конфлікту [196].

Актуальним є побудова експертної системи для диференціальної діагностики інфекції сечовивідних шляхів, пов'язаних з наданням медичної допомоги. Така експертна система дозволить направляти медичний персонал, який не має належного рівня підготовки до прийняття правильного рішення щодо лікування хворого. Також подібна система дозволяє значно скоротити час прийняття рішення в умовах активного військового конфлікту.

Мовою C# розроблено програмний продукт [197], який дозволяє користувачеві за допомогою навідних запитань визначити відповідність хворого певним критеріям. Запропонований продукт реалізований як алгоритм, що складається з блоків питань, відповідями на які є однозначні «Так» або «Ні». Залежно від відповідей користувача йому пропонується

відповісти на наступне питання або виводиться результат, яким є відповідність певним діагностичним критеріям. Програмний продукт має інтуїтивно зрозумілий ергономічний інтерфейс, що дозволяє його використовувати його користувачами, які не мають спеціальної математичної підготовки.

«Система підтримки прийняття рішень диференціальної діагностики симптоматичної інфекції сечовивідних шляхів та інфекції сечовивідних шляхів з безсимптомною бактеріємією «UTI-Diagnostics» являє собою виконуваний файл ABUTI.EXE для ОС Windows 10.

Запуск програми здійснюється викликом виконуваного модуля «ABUTI.EXE», після чого на екрані з'являється головне вікно програми (рис. И.1.) і починається взаємодія користувача з системою.

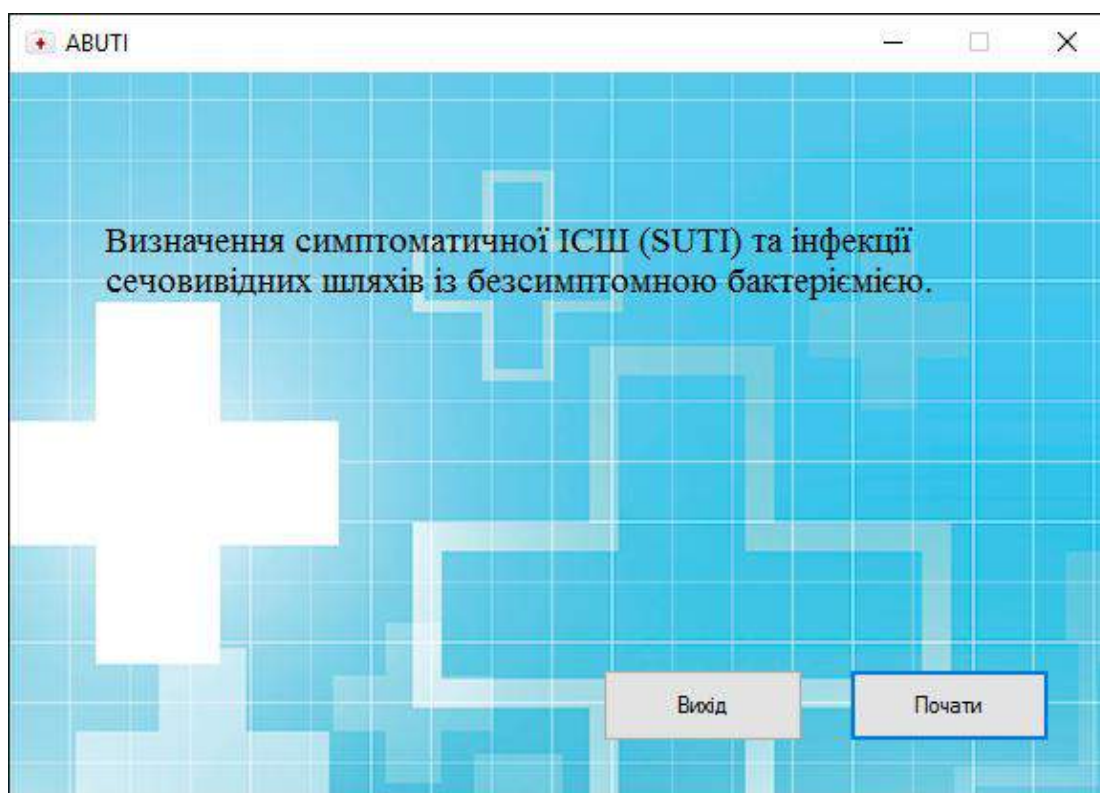


Рисунок И.1 – Головне вікно програми

На рис. И.2 надано приклад вікна з питаннями тесту.

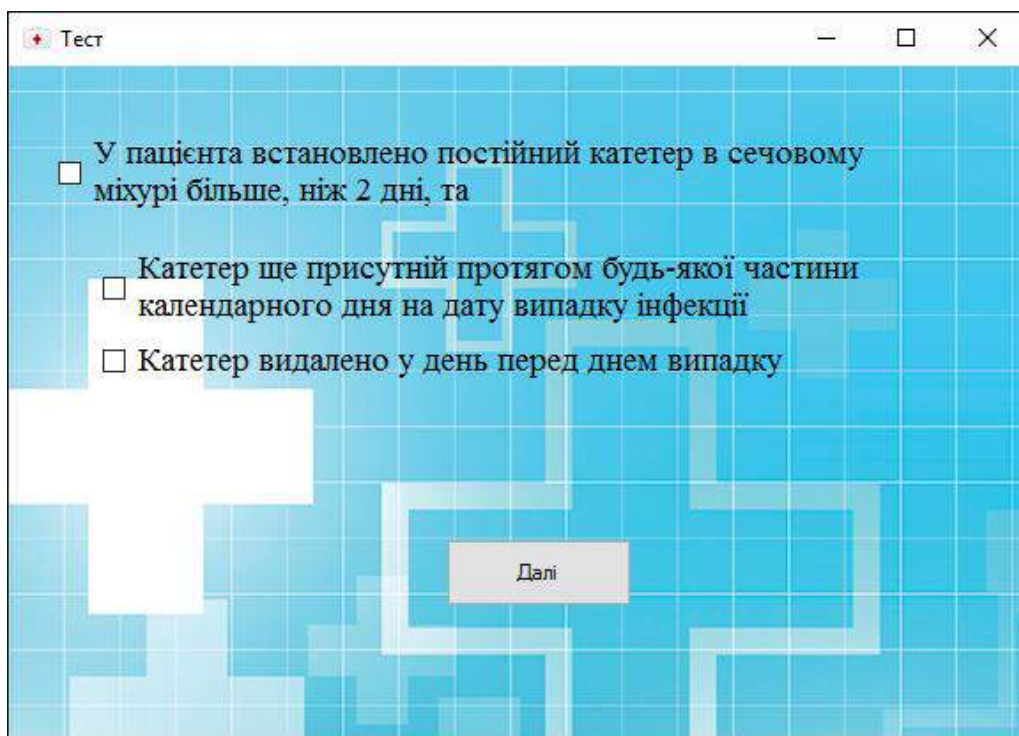


Рисунок И.2 – Приклад вікна з питаннями з тесту

Приклад результату роботи програми надано на рисунку И.3.

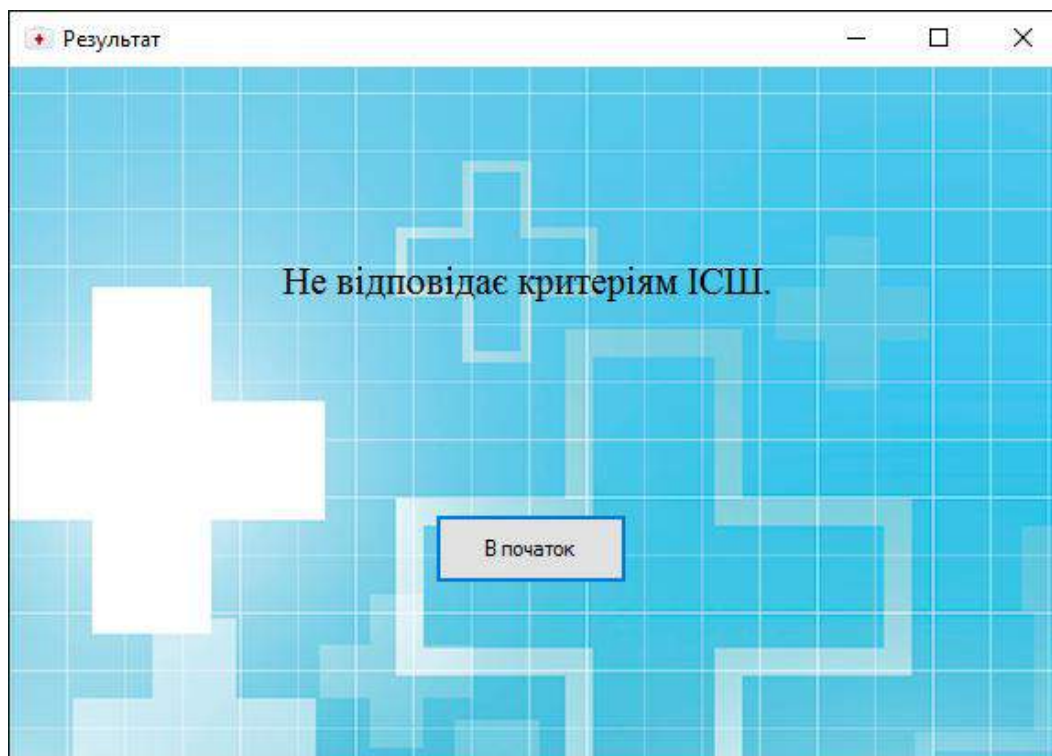


Рисунок И.3 – Приклад вікна результату роботи програми

Продукт реалізовано на підставі розробленого методу діагностики інфекцій сечовивідних шляхів з безсимптомною бактеріоурією. Метод представлений на рис. И.4.

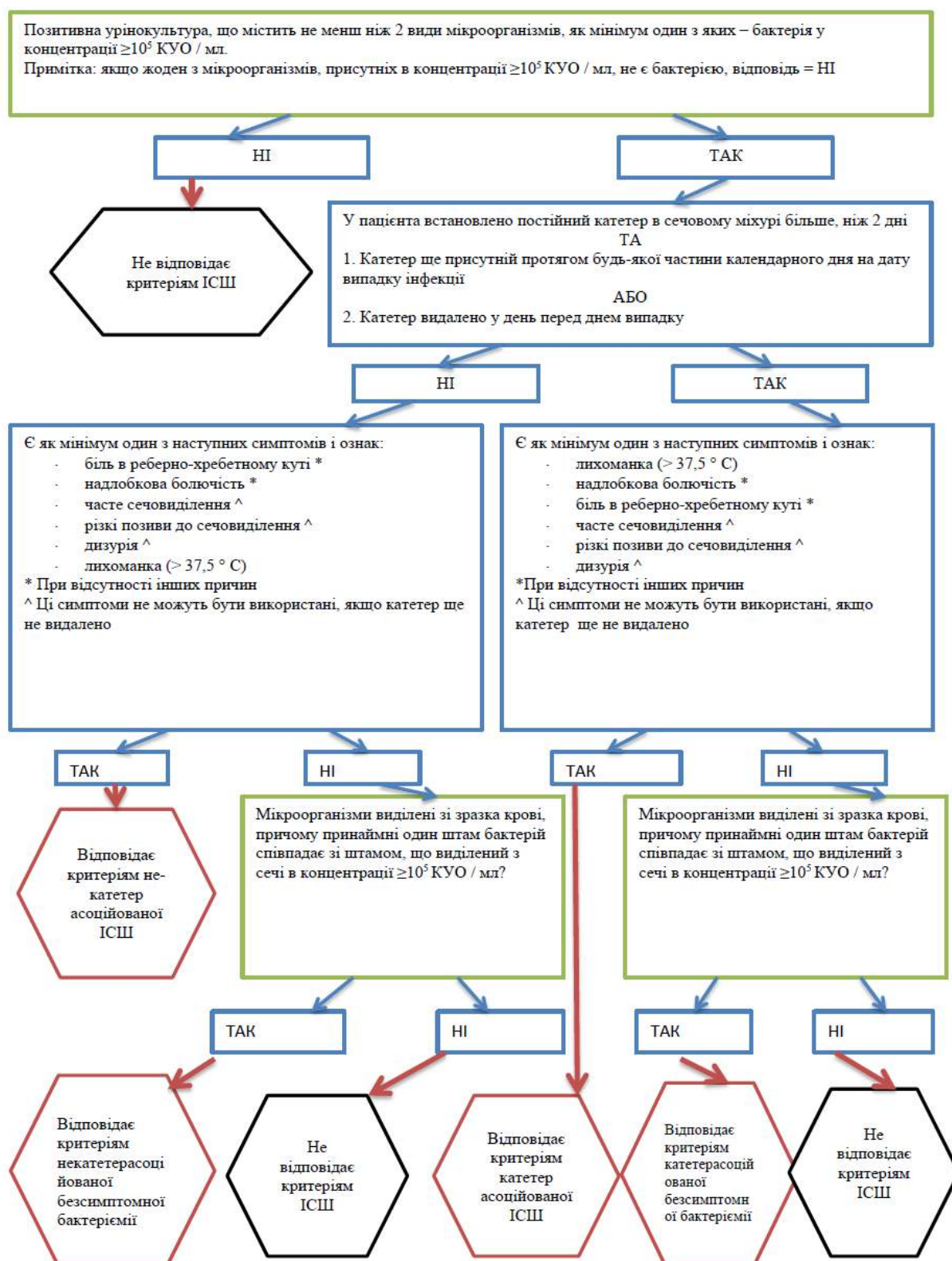


Рисунок И.4 – Метод діагностики інфекцій сечовивідних путей з безсимптомною бактеріоурією

Під час проведення дослідження, що тривало протягом 4 тижнів у двох відділеннях хірургічного стаціонара, розрахованих на 60 та 20 ліжок, була відсутня реєстрація випадків катетер-асоційованих інфекцій сечовивідних шляхів (КАІСШ), проте симптоми, що були наявні у деяких пацієнтів, та призначення антибіотиків хворим при відсутності інших показань, крім інфекції сечовивідних шляхів у пацієнтів з встановленими сечовими катетерами, були ознакою можливої наявності у пацієнтів ІСШ, пов'язаної з наданням медичної допомоги. Загалом з 73 пацієнтів 69 було призначено антибактеріальну терапію, що складає 94,5%.

З метою покращення виявлення випадків КАІСШ було запропоновано стандартне визначення випадку для діагностики клінічно вираженої ІСШ. Використання стандартного визначення випадку для діагностики клінічно вираженої КАІСШ дозволило, проаналізувавши дані медичних карт стаціонарного хворого, виявити 3 випадки КАІСШ, рівень захворюваності склав 5,3 випадки на 1000 катетероднів.

Впровадження запропонованого стандартного визначення випадку внутрішньолікарняної ІСШ дозволить покращити діагностику та налагодити облік та реєстрацію внутрішньолікарняних ІСШ, дасть можливість коректного порівняння показників захворюваності на ІПМД, одержаних при здійсненні епідеміологічного нагляду, та удосконалити і гармонізувати дані щодо ІПМД в Україні з даними світової наукової спільноти.

ДОДАТОК К

ПРОГРАМНИЙ ПРОДУКТ ТИПУ «REMINDER» ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТРИВАЛОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СЕЧОВИХ КАТЕТЕРІВ

Відомо, що КАІСШ є найбільш поширеними серед інфекцій, пов'язаних з наданням медичної допомоги [198]. Скорочення кількості та тривалості катетеризацій є ефективним та знижує захворюваність на КАІСШ, яка складає близько 75% ІСШ. З метою запобігання приєднання КАІСШ використання сечового катетера повинно бути зведено до мінімуму; катетер повинен залишатися на місці тільки до тих пір, поки існують показання.

Найбільш ефективним способом зниження захворюваності на КАІСШ є зменшення використання сечових катетерів шляхом обмеження проведення катетеризації сечового міхура для пацієнтів тільки за суворими показаннями та видалення катетера негайно, як тільки в ньому більше немає необхідності. Було виявлено, що стратегії скорочення кількості та тривалості катетеризацій є ефективними і, ймовірно, мають більший вплив на захворюваність на КАІСШ, ніж будь-які інші стратегії.

Для запобігання розвитку КАІСШ було розроблено технологію, що включала рекомендації щодо уникнення встановлення сечових катетерів без суворих показань [199]. До показань к катетеризації відносяться: гостра затримка сечі та/або обструкція сечовивідних шляхів; потреба в точному вимірі діурезу тяжкохворих; урологічна хірургічна операція; підготовка до операції або післяопераційний стан (до 36 годин); тривала іммобілізація (наприклад, при переломі кісток тазу); поліпшення комфорту пацієнтів в термінальній стадії захворювання; наявність пролежнів або інших уражень в ділянці статевих органів.

Основним принципом технології запобігання розвитку КАІСШ є те, що використання сечового катетера повинно бути зведено до мінімуму; катетер повинен залишатися на місці тільки до тих пір, поки існують показання. Для цього в документації пацієнта (операційний протокол, лист призначень,

медична карта стаціонарного хворого) повинні бути зазначені показання до катетеризації та очікувана її тривалість. Необхідність катетеризації повинна бути переглянута при щоденних обстеженнях пацієнтів, і якщо катетер повинен залишитися, показання, за якими катетер залишено, та час, коли він повинен бути видалений, повинні бути задокументовані.

Важливим елементом технології є використання систем нагадування, які можуть бути як у вигляді паперових листів-нагадувань, самостійно розроблених лікувальним закладом, які вкладають у медичну карту стаціонарного хворого, так і у вигляді автоматичних комп'ютерних програм. Такі системи використовують для медичного персоналу з метою попередження про необхідність видалення катетера.

В додатках програмного комплексу наводяться дані про встановлені катетери: їх застосування, запланований час знаходження катетера і повідомляють медичного працівника коли підійшов запланований час вилучення катетера у того чи іншого пацієнта.

Додаток YS.Catheter складається з двох частин – серверної і клієнтської. В якості клієнтської частини виступає Desktop-додаток або мобільний додаток для платформ Android та iOS. Особливістю клієнтського додатка є можливість автономної роботи при відсутності підключення до сервера або сервера як такого, при цьому з функціоналу програми не буде доступна тільки функція синхронізації даних. Клієнтська частина функціоналу додатка реалізована на базі PCL (Portable Class Library) в .Net, що дозволяє перенести його на різні платформи (як мобільні, так і стаціонарні), такі як iOS, Android, Microsoft Windows, MacOS, Linux. В якості бази даних вибрано SQLite, тому що дані, з якими буде працювати клієнт, будуть обмежуватися кількістю пацієнтів для одного персоналу. У свою чергу, при налаштованій синхронізації клієнт буде отримувати ці дані з головної бази даних, яка буде зберігати записи про всіх пацієнтів даного класу в даному медичному закладі. Для сервера обрана база даних PostgreSQL, яка призначена для зберігання великої кількості інформації.

Аутентифікація до сервера здійснюється за допомогою технології Google OAuth, яка дозволить упустити крок реєстрації, а також дозволяє отримати дані про конкретного клієнта з довіреного джерела. Процес сполучення клієнта з конкретним сервером медичної установи відбувається за допомогою відправки запиту серверу і підтвердження даного запиту з боку адміністрації, що дозволяє виключити появу сторонніх користувачів у мережі конкретного медичного закладу.

Реалізація компонента YS.EventScheduler :

Реалізація взаємодії внутрішніх компонентів здійснюється за допомогою фреймворка керованих розширень (PCL MEF або Microsoft.Composition), що дозволяє уникнути повсюдного застосування патерна Singleton, при цьому зберігаються внутрішні стани ініціалізованих об'єктів, і побудувати подієво-орієнтовану архітектуру компонента не ускладнюючи зв'язок між внутрішніми компонентами.

Було вирішено відмовитися від non-sql баз даних, а саме LiteDB через несумісність з PCL (Portable Class Library) проектами. В якості заміни було вибрано SQLite базу даних, а саме компонент (Sqlite-net-pcl), який дозволяє забезпечити роботу з sql-сумісними базами даних на платформах iOS, Android, Windows, Linux, Os X. При цьому вимагається низькорівневий драйвер, орієнтований під конкретну платформу.

Відношення між класами побудовані за принципом єдиної відповідальності, де кожен клас виконує тільки один тип обробки даних, при цьому передає дані на подальшу обробку наступного за ієрархією класу.

Доступ до ресурсів здійснюється з окремих потоків, що дозволяє уникнути блокування інтерфейсу програми в момент операцій з боку обробника, але при цьому збільшується ризик виникнення критичної помилки нескінченного очікування ресурсів.

У програмному комплексі реалізовані наступні класи:

1) `ProviderBase` – є базовим класом для провайдерів даних і реалізує стандартні операції `Insert`, `Remove`, `Update`, а також забезпечує з'єднання з базою даних;

2) `ComponentsService` – клас реалізовано за паттерном `Singleton`, і він містить контейнер компонентів. Використовується для виконання композиції компонентів імпорту й експорту;

3) `ScheduleService` – клас планувальник, обов'язком якого є оповіщення абонентів про необхідність перевірки даних;

4) `ActionHandlerService` – клас-обробник, який перевіряє дані на наявність подій, що настали, про які повідомляє користувача;

5) `UserHelper` – клас для взаємодії безпосередньо з інтерфейсом, призначеним для користувача, а саме управління новими подіями;

6) `ActionProvider`, `PatientsProvider`, `MedicProvider` – реалізують інтерфейс взаємодії для певної моделі даних, перелік доступних операцій для конкретного типу даних.

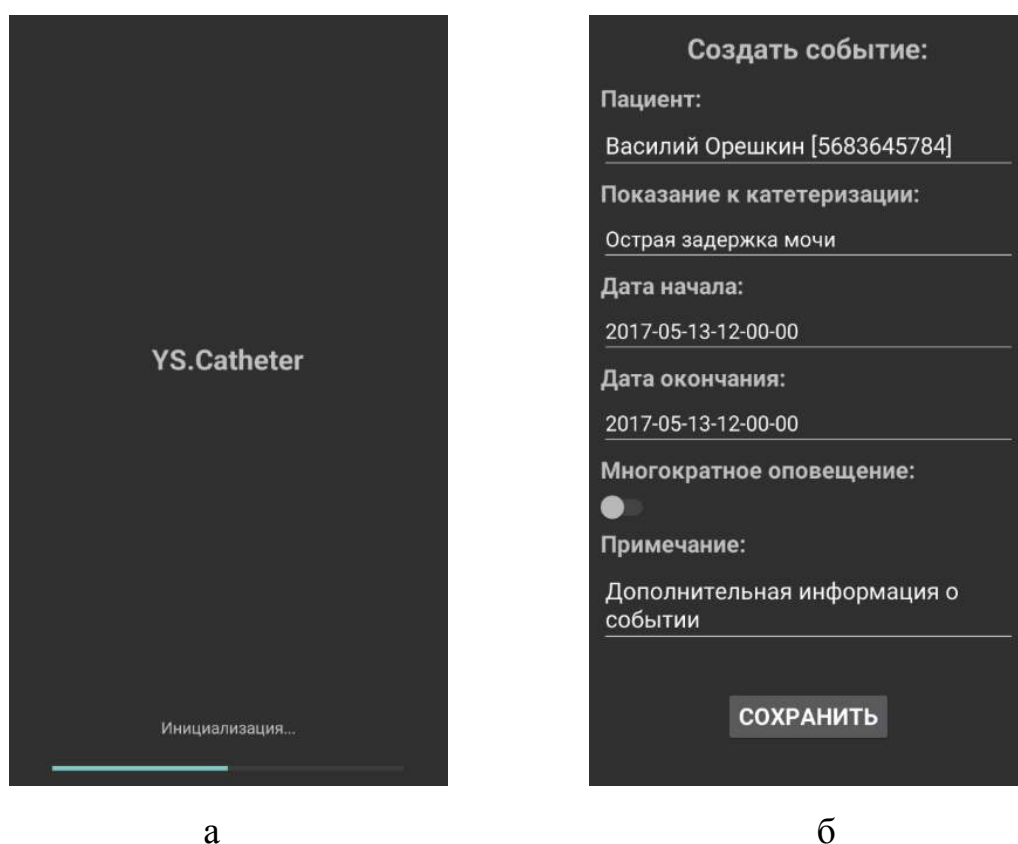
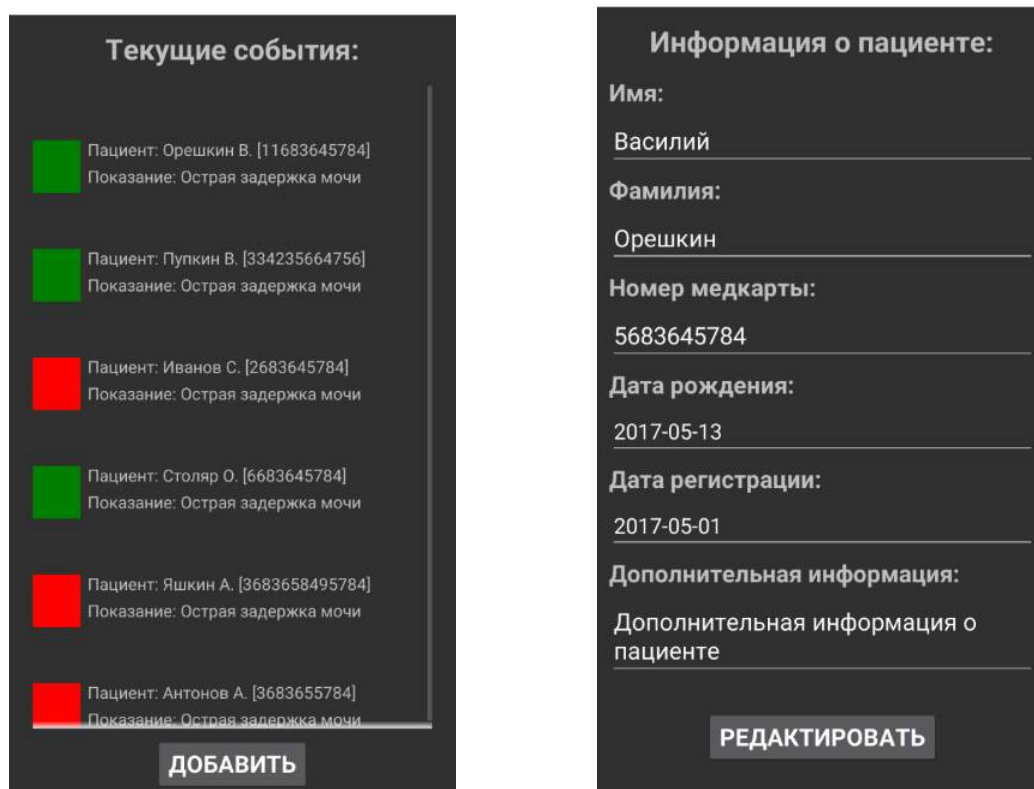


Рисунок К.1 – Початкове вікно мобільного додатка (а), створення події (б)

На початку користування мобільним додатком завантажуються внутрішні компоненти та відображається вікно ініціалізації додатка (рис. К.1а). Для внесення показань пацієнта медичний персонал використовує вікно створення події (рис. К.1б). Також медичний працівник може переглянути перелік пацієнтів системи, їх показання та рекомендації (рис. К.2а). Кожен медичний працівник може переглянути та відредагувати інформацію про своїх пацієнтів, адміністратор системи може переглядати та редагувати будь-якого пацієнта (рис. К.2б).



а

б

Рисунок К.2 – Вікно перегляду подій (а) та карти пацієнта (б)

Результати проведених досліджень показали ефективність використання ремайндерів. Так, аналіз використання додатка продемонстрував зниження рівня КАІСШ (випадки на 1000 катетероднів) на 53%. Ґрунтуючись на даних аналізу, можна зробити висновок, що використання програм-нагадувань сприятиме значному зниженню числа випадків КАІСШ на 1000 днів катетеризації, особливо коли базові показники

КАІСШ є високими. Після проведення аналізу дев'яти досліджень ефективності впровадження ремайндерів з достатньою деталізацією для об'єднання зниження тривалості катетеризації склала 1,54 дня.

Таким чином, дослідження показали, що використання ремайндерів має бути необхідним елементом стратегії щодо зниження рівня ППМД, який дозволить скоротити кількість катетеризацій сечового міхура і проводити видалення сечових катетерів так швидко, як тільки їх використання перестало бути необхідним. Ремайндери є економічно вигідним, високоефективним заходом, що не вимагає великих додаткових витрат і не несе ризику для пацієнта. Особливо актуально це в сучасних умовах, коли внутрішньолікарняні інфекції сечовивідних шляхів все частіше викликаються мікроорганізмами з множинною лікарською стійкістю (ММЛС), і запобігання КАІСШ може допомогти пацієнтам уникнути інфекції ММЛС. Моніторинг і забезпечення зворотного зв'язку використання катетера і показників КАІСШ має важливе значення для реалізації і подальшого використання превентивних стратегій зниження внутрішньолікарняних ІСШ.

Рекомендації щодо догляду за встановленим сечовим катетером включають відмову від непотрібних маніпуляцій, щоб звести до мінімуму ризик зараження. Проводити заміну сечоприймача і катетера слід у відповідності до рекомендацій виробника на підставі клінічних показань (наприклад, розвиток інфекції, протікання сечі, обструкція або пошкодження системи збору сечі). Необхідно тримати катетер належним чином закріпленим, щоб запобігти його руху або випадення з уретри, сечоприймач повинен весь час знаходитись нижче рівня сечового міхура, щоб запобігти рефлюксу сечі.

Основним принципом технології запобігання розвитку КАІСШ є те, що використання сечового катетера повинне бути зведене до мінімуму; катетер повинен залишатися на місці тільки до тих пір, поки існують показання. Для цього в мобільному додатку повинні бути визначені показання до катетеризації та очікувана її тривалість. Необхідність катетеризації повинна

бути переглянута при щоденних обстеженнях пацієнтів, і якщо катетер повинен залишитись, показання, за якими його залишено, та час, коли він повинен бути видалений, повинні бути задокументовані.

Впровадження технології запобігання розвитку КАІСШ дозволило скоротити кількість катетероднів за аналогічний період часу, за період спостереження кількість катетероднів у обох хірургічних відділеннях склала 417; кількість пацієнтоднів – 2161, коефіцієнт використання катетера склав для обох хірургічних відділень 0,19.

ДОДАТОК Л
СПОСІБ ЕПІДЕМІОЛОГІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ КАТЕТЕР-
АСОЦІЙОВАНОЇ ІНФЕКЦІЇ СЕЧОВИВІДНИХ ШЛЯХІВ
У ЛІКУВАЛЬНО-ПРОФІЛАКТИЧНОМУ ЗАКЛАДІ

Сьогодні запропоновано певні підходи до оцінювання епідемічної ситуації, найбільш поширеним з яких є визначення єдиного інтегрального показника комплексного оцінювання ступеня епідеміологічного благополуччя чи неблагополуччя лікувально-профілактичного закладу, певної групи населення або території, що базується на співставленні певних окремих статистичних показників. Було встановлено, що при показниках, що змінюються різнонаправлено, надійний висновок щодо епідеміологічного благополуччя чи неблагополуччя базується, окрім логічного аналізу, на використанні єдиного інтегрального показника.

В основу способу поставлено задачу розширення арсеналу способів епідеміологічної діагностики у лікувально-профілактичних закладах шляхом розробки способу епідеміологічної діагностики у лікувально-профілактичному закладі катетер-асоційованої інфекції сечовивідних шляхів (КАІСШ).

Задачу, яку поставлено в основу винаходу, вирішують тим, що у відомому способі епідеміологічної діагностики у лікувально-профілактичному закладі, який полягає у визначенні єдиного інтегрального показника, згідно з винаходом, епідеміологічну діагностику КАІСШ виконують шляхом вимірювання відсотка позитивних пацієнтів з бактеріурією, тривалості катетеризації сечового міхура пацієнта, оцінювання виду сечового катетера і дренажної системи, що застосовуються, типу стаціонара та визначення тривалості госпіталізації пацієнтів, загальної кількості пацієнтів з сечовими катетерами та кількості пацієнтів з різними видами катетерів (силіконові, латексні та ін.), статі і віку пацієнтів, при цьому спочатку визначають тривалість катетеризації сечового міхура, потім

залежно від отриманих вимірів обирають формулу та розраховують єдиний інтегральний показник:

$$I = \begin{cases} \left(\frac{B}{100\%} + 0,01\right) \times \frac{0,1 \times KC + 0,5 \times KL + KP}{K} \times C \times \frac{\sum_{i=1}^K DK_i \times TC_i \times D_i \times Cm_i \times B_i \times 0,01}{K}, TK \in [1,3]; \\ \left(\frac{B}{100\%} + 0,01\right) \times \frac{0,1 \times KC + 0,5 \times KL + KP}{K} \times C \times \frac{\sum_{i=1}^K DK_i \times TC_i \times D_i \times Cm_i \times B_i \times (TK - 3) \times 0,05}{K}, TK \in (3,23]; \\ \left(\frac{B}{100\%} + 0,01\right) \times \frac{0,1 \times KC + 0,5 \times KL + KP}{K} \times C, TK \in (23; \infty); \end{cases} \quad (Л.1)$$

де I – інтегральний показник епідемічного благополуччя стосовно КАІСШ, B – відсоток пацієнтів з бактеріурією; ТК – тривалість катетеризації сечового міхура у днях; ДК – показник діаметра сечового катетера; С – показник ризику виникнення КАІСШ залежно від типу стаціонара; ТС – тривалість перебування пацієнта у стаціонарі в днях; Д – показник залежно від типу дренажної системи; КС – кількість пацієнтів з силіконовим катетером; КЛ – кількість пацієнтів з латексним катетером; КР – кількість пацієнтів з іншими видами сечових катетерів; К – загальна кількість пацієнтів з сечовими катетерами; Ст – показник залежно від статі; В – показник залежно від віку пацієнта, при цьому параметри формули ДК, ТС, Д, С, Ст та В приймають фіксовані значення залежно від експертних оцінок, внесених попередньо до таблиць: ДК (табл. Л.1), ТС (табл. Л.2), Д (табл. Л.3), С (табл. Л.4), Ст (табл. Л.5), В (табл. Л.6).

Таблиця Л.1 – Значення ДК відповідно до діаметра катетера

Стать	Діаметр катетера (Fr)	Значення ДК
ч	5-10	0,4
ч	12-14	0,1
ч	16-18	0,4
ч	20	0,5
ч	22	0,6
ч	24	0,7

продовження табл. Л.1

Стать	Діаметр катетера (Fr)	Значення ДК
ч	26-28	1
ж	5-8	0,4
ж	10-12	0,1
ж	14-16	0,4
ж	18	0,5
ж	20	0,6
ж	22	0,7
ж	24-28	1

Таблиця Л.2 – Значення ТС відповідно до тривалості перебування у стаціонарі

Тривалість перебування у стаціонарі	Значення ТС
Менш ніж 48 годин	0,01
Від 2 до 7 діб	0,2
Від 8 до 14 діб	0,4
Від 15 до 30 діб	0,6
Більше 30 діб	1

Таблиця Л.3 – Значення Д залежно від типу дренажної системи

Дренажна система	Значення Д
Відкрита	1
Закрита	0,032

Таблиця Л.4 – Значення С залежно від типу стаціонара

Тип стаціонара	Значення ризику С
Терапевтичні відділення	0,2 (мінімальний)
Хірургічний стаціонар	0,4 (відносно низький)
Урологічний стаціонар	0,6 (середній)

Тип стаціонара	Значення ризику С
Будинок для людей похилого віку	0,8 (високий)
Відділення реанімації та інтенсивної терапії	1 (максимальний)

Таблиця Л.5 – Значення Ст залежно від статі

Стать	Значення Ст
Жіноча	1
Чоловіча	0,7

Таблиця Л.6 – Значення В залежно від віку

Вік	Значення В
Менш ніж 65 років	1
Від 65 до 75 років	1,1
Старші 75 років	1,2

Якщо інтегральний показник епідемічного благополуччя менше ніж 0,001, то епідемічну ситуацію стосовно КАІСШ діагностують як благополучну, якщо інтегральний показник епідемічного благополуччя від 0,001 до 0,5, то епідемічну ситуацію діагностують як нестійку, а якщо інтегральний показник епідемічного благополуччя сягає більше, ніж 0,5, епідемічну ситуацію діагностують як неблагополучну.

Технічний ефект винаходу, а саме розширення арсеналу способів діагностики епідемічної ситуації стосовно КАІСШ у лікувально-профілактичному закладі, зумовлений синергізмом факторів, які детермінують і призводять до виникнення захворювань на КАІСШ, та їхніх кількісних значень. Сукупність суттєвих ознак способу невідома із рівня техніки і створює надсумарний результат – оригінальний спосіб епідеміологічної діагностики КАІСШ у лікувально-профілактичному закладі,

який дозволяє виявити катетер-асоційованої інфекції, своєчасно скорегувати фармакологічні підходи до лікування даної категорії хворих та за можливості попередити формування розвитку КАІСШ у лікувально-профілактичному закладі. Сукупність суттєвих ознак способу, яка є невідомою із рівня техніки, має суттєві відмінності по відношенню до такої відомих способів епідеміологічної діагностики у лікувально-профілактичних закладах та є неочевидною для фахівця. Відрізняє винахід те, що поєднане використання відомих в медицині заходів та вимірів невідоме із рівня техніки і приводить до результату, який не витікає із очевидністю з відомих характеристик цих заходів і вимірів, таким чином одержуючи значний надсумарний результат – створення способу, який заявляється.

Виміри, які заявляються, та їхні кількісні значення встановлені в результаті клініко-лабораторних досліджень.

Ефективність способу ілюструють такі приклади.

Приклад № 1. У терапевтичному відділенні знаходиться на лікуванні 10 чоловіків з установленими сечовими катетерами віком від 27 до 55 років. Тривалість перебування хворих у стаціонарі становить до 2 діб. При дослідженні зразків сечі хворих бактеріурію не виявлено. Для катетеризації використовувались силіконові катетери Фолея діаметром 12 та 14 мм та закриті дренажні системи.

Тривалість катетеризації пацієнтів дорівнює менше ніж 48 годин, отже, обчислення будуть проводитися за формулою

$$I = \left(\frac{B}{100\%} + 0,01 \right) \times \frac{0,1 \times KC + 0,5 \times KЛ + КР}{K} \times C \times \frac{\sum_{i=1}^K DK_i \times TC_i \times D_i \times Cm_i \times B_i \times 0,01}{K}, TK \in [1,3] \quad (Л.2)$$

При дослідженні зразків сечі хворих бактеріурію не виявлено, отже, B буде дорівнювати 0.

Для катетеризації використовувались силіконові катетери Фолея та не використовувались латексні та інші катетери, тобто КС дорівнює 10, а КЛ та КР – 0.

Загальна кількість пацієнтів з сечовими катетерами (К) дорівнює 10.

Терапевтичні стаціонари належать до стаціонарів з мінімальним ризиком виникнення КАІСШ, тому використовуємо коефіцієнт 0,2.

Тривалість перебування хворих у стаціонарі становить до 2 діб, тобто $TC = 0,01$.

Діаметр катетерів, що використовувались, дорівнював 12 та 14 мм, тобто для всіх пацієнтів ДК буде дорівнювати 0,1. Використовувались тільки закриті дренажні системи, тому Д дорівнює 0,032.

Всі пацієнти – чоловіки віком до 65 років, тому коефіцієнт Ст дорівнює 0,7, коефіцієнт В – 1.

Одержані значення вводимо у формулу

$$I = \left\{ \left(\frac{0}{100\%} + 0,01 \right) \times \frac{0,1 \times 10 + 0,5 \times 0 + 0}{10} \times 0,2 \times \frac{\sum_{i=1}^{10} 0,1 \times 0,01 \times 0,032 \times 0,7 \times 1 \times 0,01}{10}, TK \in [1,3] \right\} \quad (Л.3)$$

$$I = 448 \times 10^{-13}$$

При проведенні розрахунків згідно з формулою з використанням розроблених коефіцієнтів інтегральний показник епідемічного благополуччя менше ніж 0,001, що свідчить про благополучну епідемічну ситуацію стосовно КАІСШ.

Приклад № 2. В урологічному відділенні знаходиться на лікуванні 5 чоловіків та 5 жінок з встановленими сечовими катетерами. Вік пацієнтів: менше ніж 65 років – 2 пацієнти, від 65 до 75 років – 6 пацієнтів, старші 75 років – 2 пацієнти. Тривалість перебування хворих у стаціонарі становить: від 8 до 14 діб – 2 пацієнти, від 15 до 22 діб – 7 пацієнтів, більше 30 діб – 1 пацієнт. Тривалість катетеризації знаходиться в інтервалі від 3 до 20 днів. При дослідженні зразків сечі хворих у 8 пацієнтів виявлено бактеріурію. Для катетеризації використовувались силіконові катетери Фолея (табл. Л.7) діаметром 12 та 14 мм (усі чоловіки) та латексні катетери діаметром 16 мм (усі жінки); закриті (8 пацієнтів) і відкриті (2 пацієнти) дренажні системи.

Тривалість катетеризації пацієнтів (табл. Л.7) входить до інтервалу від 3 до 23 днів, отже, обчислення будуть проводитися за формулою

$$I = \left\{ \left(\frac{B}{100\%} + 0,01 \right) \times \frac{0,1 \times KC + 0,5 \times KL + KP}{K} \times C \times \frac{\sum_{i=1}^K DK_i \times TC_i \times D_i \times Cm_i \times B_i \times (TK - 3) \times 0,05}{K}, TK \in (3,23] \right\} \quad (Л.4)$$

При дослідженні зразків сечі хворих бактеріюрію виявлено у 8 пацієнтів. Визначаємо відсоток хворих з бактеріюрією: $B = (8/10) \cdot 100\% = 80\%$.

Для катетеризації використовувались силіконові катетери Фоля діаметром 12 та 14 мм (5 пацієнтів) та латексні катетери діаметром 16 мм (5 пацієнтів).

Визначаємо кількість хворих з силіконовими і латексними катетерами: $KC = 5$; $KL = 5$.

Інші види катетерів не використовувались, тобто $KP = 0$.

Загальна кількість пацієнтів з сечовими катетерами (K) дорівнює 10.

Урологічні стаціонари відносяться до стаціонарів з середнім ризиком виникнення КАІСШ, тому використовуємо коефіцієнт $C = 0,6$.

Тривалість перебування у стаціонарі становить: від 8 до 14 діб – 2 пацієнти (коефіцієнт TC дорівнює 0,4), від 15 до 30 діб – 7 пацієнтів ($TC = 0,6$), більше 30 діб – 1 пацієнт ($TC = 1$) (табл. Л.7).

Діаметр катетерів, що використовувались у чоловіків, дорівнював 12 та 14 мм, тобто для всіх чоловіків DK буде дорівнювати 0,1. Діаметр катетерів, що використовувались у жінок, дорівнював 16 мм, тобто для всіх жінок DK буде дорівнювати 0,4. Використовувались закриті (8 пацієнтів) та відкриті (2 пацієнти) дренажні системи, тому D дорівнює відповідно 1 та 0,032 (табл. Л.7).

Для пацієнтів – чоловіків St дорівнює 0,7, для жінок St дорівнює 1. Залежно від віку пацієнтів B буде приймати наступні значення: менше ніж 65 років – 1, від 65 до 75 років – 1,1, старші 75 років – 1,2 (табл. Л.7).

Таблиця Л.7 – Дані про пацієнтів

Номер п/п	Стать	Вік	Тривалість перебування в стаціонарі	Діаметр катетера	Дренажна система	Тривалість катетеризації
1	Ч	менше ніж 65 років	від 8 до 14 діб	14 мм	закрита	9 днів
2	Ч	від 65 до 75 років	від 8 до 14 діб	14 мм	закрита	11 днів
3	Ч	від 65 до 75 років	від 15 до 30 діб	12 мм	закрита	18 днів
4	Ч	від 65 до 75 років	від 15 до 30 діб	14 мм	відкрита	16 днів
5	Ч	від 65 до 75 років	від 15 до 30 діб	12 мм	відкрита	17 днів
6	Ж	менше ніж 65 років	від 15 до 30 діб	16 мм	закрита	15 днів
7	Ж	від 65 до 75 років	від 15 до 30 діб	16 мм	закрита	21 день
8	Ж	від 65 до 75 років	від 15 до 30 діб	16 мм	закрита	17 днів
9	Ж	більше 75 років	від 15 до 30 діб	16 мм	закрита	18 днів
10	Ж	більше 75 років	більше 30 діб	16 мм	закрита	11 днів

Одержані значення вводимо у формулу:

$$I = \left\{ \left(\frac{80}{100\%} + 0,01 \right) \times \frac{0,1 \times 2 + 0,5 \times 8 + 0}{10} \times 0,6 \times \frac{\sum_{i=1}^{10} DK_i \times TC_i \times D_i \times Cm_i \times B_i \times (TK - 3) \times 0,05}{10}, TK \in (3,23] \right\} \quad (Л.5)$$

$$I = 0,002.$$

При проведенні розрахунків згідно з формулою з використанням розроблених коефіцієнтів інтегральний показник епідемічного благополуччя дорівнює 0,002, що свідчить про нестійку епідемічну ситуацію стосовно КАІСШ.

Приклад № 3. У відділенні реанімації та інтенсивної терапії знаходиться на лікуванні 5 чоловіків та 5 жінок з установленими сечовими катетерами. Вік пацієнтів: менше ніж 65 років – 1 пацієнт, від 65 до 75 років – 3 пацієнти, старші 75 років – 6 пацієнтів. Тривалість перебування хворих в стаціонарі становить: від 25 до 30 діб – 2 пацієнти, більше 30 діб – 8 пацієнтів. Тривалість катетеризації знаходиться в інтервалі від 25 до 40 днів. При дослідженні зразків сечі хворих у всіх пацієнтів виявлено бактеріурію. Для катетеризації використовувались латексні катетери Фолея діаметром 14 мм (2 пацієнти), 16 мм (4 пацієнти), та 18 мм (2 пацієнти), а також катетери, самостійно виготовлені персоналом реанімації з трубок від систем для крапельного введення розчинів (2 пацієнти). Використовуються закриті і відкриті дренажні системи.

Тривалість катетеризації пацієнтів перевищує 24 доби, отже, обчислення будуть проводитися за формулою

$$I = \left\{ \left(\frac{B}{100\%} + 0,01 \right) \times \frac{0,1 \times KC + 0,5 \times KL + KP}{K} \times C, TK \in (23; \infty) \right\} \quad (Л.6)$$

При дослідженні зразків сечі хворих бактеріурію виявлено у всіх пацієнтів. Визначаємо відсоток хворих з бактеріурією: $B = (10:10) \cdot 100 \% = 100 \%$.

Для катетеризації використовувались латексні катетери Фолея (8 пацієнтів), а також катетери, самостійно виготовлені персоналом реанімації з трубок від систем для крапельного введення розчинів (2 пацієнти).

Визначаємо кількість хворих з латексними катетерами та іншими видами катетерів: $KL = 8$; $KP = 2$.

Силіконові катетери не використовувались, отже, $KC = 0$.

Загальна кількість пацієнтів з сечовими катетерами (K) дорівнює 10.

Відділення реанімації та інтенсивної терапії належать до стаціонарів з максимальним ризиком виникнення КАІСШ, тому використовуємо коефіцієнт $C = 1$.

Одержані значення вводимо у формулу

$$I = \left\{ \left(\frac{100}{100\%} + 0,01 \right) \times \frac{0,1 \times 0 + 0,5 \times 8 + 2}{10} \times 1, TK \in (23; \infty) \right\}; \quad (Л.7)$$

$$I = 0,606$$

При проведенні розрахунків згідно з формулою з використанням розроблених коефіцієнтів інтегральний показник епідемічного благополуччя сягає більше ніж 0,5, що свідчить про неблагополучну епідемічну ситуацію стосовно КАІСШ.

Приклад № 4. В хірургічному відділенні знаходиться на лікуванні 5 чоловіків та 5 жінок з установленими сечовими катетерами. Вік пацієнтів: менше ніж 65 років – 4 пацієнти, від 65 до 75 років – 5 пацієнтів, більш ніж 75 років – 1 пацієнт. Тривалість перебування хворих у стаціонарі становить: менш ніж 48 годин – 1 пацієнт, від 2 до 7 діб – 3 пацієнти, від 8 до 14 діб – 2 пацієнти, від 15 до 22 діб – 3 пацієнти, більше 30 діб – 1 пацієнт. Тривалість катетеризації дорівнює: до 3 діб – 2 пацієнти, від 3 до 23 діб – 7 пацієнтів, більше 23 діб – 1 пацієнт. При дослідженні зразків сечі хворих у 6 пацієнтів виявлено бактеріурію. Для катетеризації використовувались силіконові катетери Фолея діаметром 12 і 14 мм (1 чоловік і 2 жінки) та діаметром 16 мм (1 чоловік), всього у 4 хворих, та латексні катетери діаметром 14 мм (3 чоловіки) та діаметром 16 мм (3 жінки), всього 6 пацієнтів.

Тривалість катетеризації (табл. Л.8) дорівнює: до 3 діб – 2 пацієнти, від 3 до 23 діб – 7 пацієнтів, більше 23 діб – 1 пацієнт, отже, обчислення будуть проводитися за формулою

$$I = \begin{cases} \left(\frac{B}{100\%} + 0,01 \right) \times \frac{0,1 \times KC + 0,5 \times KL + KP}{K} \times C \times \frac{\sum_{i=1}^K DK_i \times TC_i \times D_i \times Cm_i \times B_i \times 0,01}{K}, TK \in [1,3]; \\ \left(\frac{B}{100\%} + 0,01 \right) \times \frac{0,1 \times KC + 0,5 \times KL + KP}{K} \times C \times \frac{\sum_{i=1}^K DK_i \times TC_i \times D_i \times Cm_i \times B_i \times (TK - 3) \times 0,05}{K}, TK \in (3,23]; \\ \left(\frac{B}{100\%} + 0,01 \right) \times \frac{0,1 \times KC + 0,5 \times KL + KP}{K} \times C, TK \in (23; \infty); \end{cases} \quad (Л.8)$$

Таблиця Л.8 – Дані про пацієнтів

Номер п/п	Стать	Вік	Тривалість перебування в стаціонарі	Діаметр катетера	Дренажна система	Тривалість катетеризації
1	Ч	менше ніж 65 років	менш ніж 48 годин	14 мм	закрита	24 години
2	Ч	менше ніж 65 років	від 2 до 7 діб	14 мм	закрита	5 днів
3	Ч	менше ніж 65 років	від 2 до 7 діб	12 мм	закрита	48 годин
4	Ч	від 65 до 75 років	від 8 до 14 діб	14 мм	закрита	14 днів
5	Ч	від 65 до 75 років	від 15 до 30 діб	12 мм	закрита	17 днів
6	Ж	менше ніж 65 років	від 2 до 7 діб	16 мм	закрита	6 днів
7	Ж	від 65 до 75 років	від 15 до 30 діб	16 мм	закрита	20 днів
8	Ж	від 65 до 75 років	від 15 до 30 діб	16 мм	закрита	17 днів
9	Ж	від 65 до 75 років	від 8 до 14 діб	16 мм	закрита	18 днів
10	Ж	більше 75 років	більше 30 діб	16 мм	закрита	32 дні

При дослідженні зразків сечі хворих бактеріурію виявлено у 6 пацієнтів. Визначаємо відсоток хворих з бактеріурією: $B = (6:10) \cdot 100\% = 60\%$.

Для катетеризації використовувались силіконові (4 пацієнти) та латексні катетери Фолея (6 пацієнтів) (табл. Л.8).

Визначаємо кількість хворих з силіконовими та латексними катетерами: $KC = 4$; $KЛ = 6$.

Інші види катетерів не використовувались, тобто $KP = 0$.

Загальна кількість пацієнтів з сечовими катетерами (K) дорівнює 10.

Хірургічні стаціонари належать до стаціонарів з відносно низьким ризиком виникнення КАІСШ, тому використовуємо коефіцієнт $C = 0,4$.

Коефіцієнт TC залежно від тривалості перебування хворих в стаціонарі дорівнює: менш ніж 48 годин – 1 пацієнт ($TC = 0,01$), від 2 до 7 діб – 3 пацієнти ($TC = 0,2$), від 8 до 14 діб – 2 пацієнти ($TC = 0,4$), від 15 до 30 діб – 3 пацієнти ($TC = 0,6$), більше 30 діб – 1 пацієнт ($TC = 1$) (табл. Л.8).

Діаметр катетерів, що використовувались у чоловіків, дорівнював 12 мм, 14 мм та 16 мм, тобто для чоловіків DK буде дорівнювати 0,1 та 0,4. Діаметр катетерів, що використовувались у жінок, дорівнював 12 мм, 14 мм та 16 мм, тобто для жінок DK буде дорівнювати 0,1 та 0,4. Використовувались закриті дренажні системи, тому D дорівнює 1 (табл. Л.8).

Для пацієнтів – чоловіків St дорівнює 0,7, для жінок St дорівнює 1. В залежності від віку пацієнтів B буде приймати наступні значення: менше ніж 65 років – 1, від 65 до 75 років – 1,1, старші 75 років – 1,2 (табл. Л.8).

Одержані значення вводимо у формулу, та отримуємо: $I = 0,0085$.

При проведенні розрахунків згідно з формулою з використанням розроблених коефіцієнтів, інтегральний показник епідемічного благополуччя дорівнює 0,0085, що свідчить про нестійку епідемічну ситуацію стосовно КАІСШ.

Функціональну схему способу епідеміологічної діагностики у лікувально-профілактичному закладі подано на рис. Л.1.

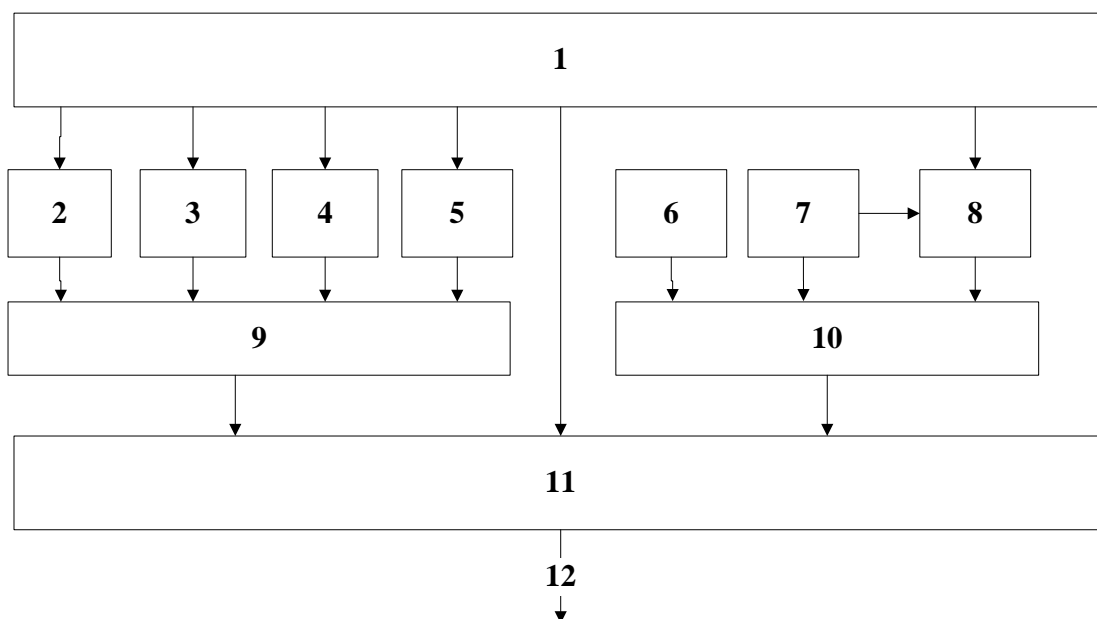


Рисунок Л.1 – Функціональна схема способу епідеміологічної діагностики у лікувально-профілактичному закладі

Функціональна система містить блок реєстрації інформації про пацієнтів 1, блок оцінювання діаметра катетера пацієнта 2, блок оцінювання тривалості катетеризації сечового міхура пацієнта 3, блок оцінювання дренажної системи пацієнта 4, блок вводу особистої інформації про пацієнта 5, блок оцінювання долі пацієнтів із бактеріурією 6, блок оцінювання типів катетерів 7, блок обчислення ситуації по типам катетерів по стаціонару 8, блок обчислення індексу благополуччя пацієнта стосовно КАІСШ 9, блок обчислення епідеміологічного індексу стаціонару 10, блок обчислення епідеміологічного показника благополуччя стосовно КАІСШ 11, вихідну шину 12, причому виходи блока реєстрації інформації про пацієнтів 1 з'єднані з входами блоків оцінювання діаметру катетера пацієнта 2, оцінювання тривалості катетеризації сечового міхура пацієнта 3, оцінювання дренажної системи пацієнта 4, вводу особистої інформації про пацієнта 5, виходи яких з'єднані з відповідними входами блока обчислення індексу благополуччя пацієнта стосовно КАІСШ 9; а також з першим входом блока обчислення ситуації по типам катетерів по стаціонара 8, другий вхід якого

з'єднано з першим виходом блоку оцінювання типів катетерів 7, а вихід з'єднано з першим входом блока обчислення епідеміологічного індексу стаціонара 10, з яким також з'єднано вихід блока оцінки долі пацієнтів із бактеріурією 6 та другий вихід блока оцінки типів катетерів 7; також вихід блока реєстрації інформації про пацієнтів 1 з'єднано з першим входом блока обчислення епідеміологічного показника благополуччя стосовно КАІСШ 11, другий та третій вхід якого з'єднано з блоком обчислення індексу благополуччя пацієнта стосовно КАІСШ 9 та блоком обчислення епідеміологічного індексу стаціонара 10, а вихід блока обчислення епідеміологічного показника благополуччя стосовно КАІСШ 11 з'єднано з вихідною шиною 12.

Блок 1 виконує функцію реєстрації основної інформації про пацієнта, блок 2 виконує функцію оцінювання діаметра катетера пацієнта залежно від статі, блок 3 дозволяє оцінити тривалість катетеризації сечового міхура пацієнта у днях, блок 4 виконує функцію оцінювання дренажної системи пацієнта: закрита або відкрита, блок 5 дозволяє ввести особисту інформацію про пацієнта, блок 6 виконує функцію обчислення частки пацієнтів із бактеріурією серед тих пацієнтів, кому встановлено сечовий катетер за формулою: $B=BK/K$, де B – частка пацієнтів з бактеріурією, BK – кількість пацієнтів із бактеріурією серед тих пацієнтів, кому встановлено сечовий катетер, K – загальна кількість катетеризованих пацієнтів; блок 7 виконує функцію оцінювання типів катетерів (силіконові, латексні чи інші види катетерів), блок 8 дозволяє провести обчислення ситуації по типах катетерів по стаціонару, блок 9 виконує функцію обчислення індексу благополуччя пацієнта стосовно КАІСШ, блок 10 виконує функцію обчислення епідеміологічного індексу стаціонара C , який приймає фіксоване значення залежно від експертних оцінок (табл. Л.4), блок 11 виконує функцію обчислення епідеміологічного показника благополуччя стосовно КАІСШ за формулою (Л.1).

ДОДАТОК М

ПРОГРАМНИЙ ПРОДУКТ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО АНАЛІЗУ РІВНЯ ЗНАТЬ МЕДИЧНОГО ПЕРСОНАЛУ ПРО ПРОФІЛАКТИКУ ІНФЕКЦІЙ, ПОВ'ЯЗАНИХ З НАДАННЯМ МЕДИЧНОЇ ДОПОМОГИ

Серед усіх інфекцій, пов'язаних з наданням медичної допомоги (ІПМД), від 23 % інфекцій, що реєструються у відділеннях інтенсивної терапії (ВІТ), і до 40 % внутрішньолікарняних інфекцій припадає на інфекції сечовивідних шляхів (ІСШ) [200]. Переважна більшість ІСШ пов'язано з постійними сечовими катетерами; приблизно 70 % від усіх ІСШ і 95 % ІСШ, що реєструються у ВІТ, розвиваються у хворих з постійними сечовими катетерами [201].

Суворе дотримання гігієни рук рекомендується для профілактики всіх ІПМД, у тому числі й ІСШ [202]. Більшість спалахів, викликаних уропатогенами, були пов'язані з неадекватною гігієною рук медичного персоналу. Сечовивідні шляхи госпіталізованих хворих являють собою резервуар для мікроорганізмів з множинною лікарською стійкістю (ММЛС). Наявність у пацієнтів інвазивних пристроїв, у тому числі й сечових катетерів, збільшує ризик колонізації ММЛС. Отже, обмеження використання постійних сечових катетерів є важливою стратегією для запобігання поширенню ММЛС у лікувальних установах. Зменшення використання антимікробних препаратів широкого спектра дії як частина загальної програми контролю за антибіотикорезистентністю є важливою стратегією для запобігання розвитку антибіотикорезистентності, пов'язаної з використанням сечових катетерів [203].

Дотримання медичним персоналом вимог до раціональної обробки рук до і після поставлення катетера і при будь-яких маніпуляціях з ним входить до основних принципів профілактики катетер-асоційованих ІСШ поряд з епідеміологічним наглядом, належними методиками поставлення катетера і

догляду за ним, а також навчанням медичного персоналу і наявністю зворотного зв'язку щодо належного використання сечових катетерів.

Сечоприймач пацієнта з бактеріурією також може бути резервуаром мікроорганізмів, які будуть контамінувати об'єкти навколишнього середовища і можуть передаватися іншим пацієнтам через руки медичного персоналу.

Керівництво установ охорони здоров'я несе відповідальність за забезпечення системи профілактики і контролю, яка ефективно запобігає виникненню випадків ІПМД, у тому числі й ІСШ, і передачу епідеміологічно важливих патогенів. Медичні працівники, які беруть безпосередню участь у наданні медичної допомоги пацієнтам (наприклад, лікарі і медсестри), а також допоміжний персонал несуть відповідальність за постійне використання практики профілактики і контролю ІПМД, у тому числі й вимог гігієни рук.

Виконання цієї вимоги неможливо без систематичного навчання персоналу лікарень, яке може полягати у проведенні лекцій, практичних занять, а також у використанні навчальних матеріалів, доступних у паперовому форматі або в електронному вигляді. Навчання може допомогти окреслити керівні принципи виконання медичних маніпуляцій відповідно до сучасних вимог, що ґрунтуються на доказовій медицині. Заняття з медичними працівниками дозволяють визначити мету програми профілактики і контролю ІПМД, підвищення комплаєнтності персоналу до вимог гігієни рук, що диктує необхідність її оцінювання. Забезпечення зворотного зв'язку з персоналом відділень підвищує ефективність програм профілактики і контролю ІПМД.

Розробка методики. З метою оцінювання якості знань медичних сестер декількох лікувально-профілактичних закладів з питань гігієни рук, а також вивчення їх обізнаності у питаннях правил виконання медичних маніпуляцій, прийнятих у стаціонарі і виявлення причин, що ускладнюють виконання медсестрами правил гігієни рук, мною була розроблена відповідна

анкета. Анкета містила питання, що характеризують респондентів за статтю, віком і стажем роботи, а також питання, що відображають зміст чинного регламентуючого документа: Наказ МОЗ України від 21.09.10 № 798 «Про затвердження методичних рекомендацій "Хірургічна та гігієнічна обробка рук медичного персоналу"».

Автоматизація проведення опитування. Для зручності збору даних мною був розроблений програмний продукт, який дозволяє проводити оцінювання і аналіз анкет медичних працівників з питань профілактики інфекцій, пов'язаних з наданням медичної допомоги. Це дозволило провести анкетування та проаналізувати анкети за короткий період часу, а також знизити трудомісткість проведення подібного аналізу вручну.

Даний програмний продукт призначений для збору даних результатів тестування. Програмний продукт реалізований на мові C #, його головною перевагою є простота реалізації програмного продукту з використанням Windows forms, вбудованими методами і простотою використання баз даних. Дані про користувача і результати тестування заносяться на робочих місцях та передаються у базу даних, яка розташована на віддаленому сервері. Даний програмний продукт реалізований у вигляді тесту. Результатом роботи програми є збір даних про результат тестування для подальшого аналізу отриманих даних. Програмний продукт має ергономічний, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що дозволяє його використання користувачами, які не мають спеціальної математичної освіти. Приклад вхідного вікна програми показаний на рис. М.1.

WashHand Test

Имя: Иван

Дата рождения: 06.09.1989

Фамилия: Иванов

Сколько лет работаете: 6

Возраст: 27

Место работы: Областной Клинич

Пол: Мужской Женский

Должность: Лаборант

Дата заполнения: 12.11.2016

Назад Далее

Рисунок М.1 – Вхідне вікно програмного продукту

Після заповнення даних про користувача медичний працівник переходить до відповідей на питання анкети (рис. М.2).

WashHand Test

Как часто вы носите перчатки, когда руки могут быть загрязнены биологическими жидкостями (например, отсасывание содержимого эндотрахеальной трубки или сбор мочи из катетера) ?

< 5 % случаев

5-29 % случаев

30-49 % случаев

50-69 % случаев

70-95 % случаев

> 95 % случаев

Назад Далее

Рисунок М.2 – Приклад вікна з відповідями на питання

Після відповіді на всі питання анкети медичний працівник бачить вікно з кількістю правильних відповідей (рис. М.3), а програмний комплекс автоматично зберігає всі відповіді користувача у базі даних на віддаленому сервері.

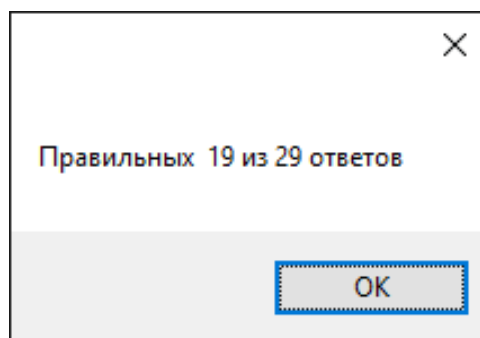


Рисунок М.3 – Приклад вікна з результатами анкетування медичного працівника

В ході дослідження було проведено анкетування 498 середніх медичних працівників лікувально-профілактичних закладів. Перед проведенням дослідження респондентам було роз'яснено мету проведення опитування і правила заповнення анкети. Анкетування проводилося на добровільних засадах. Варіант відповіді респонденти обирали самостійно. Результати дослідження були оброблені статистично.

Результати. З 498 опитаних медсестер переважна більшість становили жінки – 467 (93,8 %). Найбільша кількість респондентів була з двох вікових груп – 21-30 років (33 %) і 31-40 років (29 %), особи у віці від 41 до 50 років становили 22 % анкетованих, у віці 51 рік і більше – 9 %. Особи 20 років і молодше становили 7 % опитаних.

Більшість анкетованих (38 %) працює на займаній посаді від 1 до 10 років. З опитаних медсестер 24 % мають стаж роботи від 11 до 20 років, 20 % – 21–30 років, 10 % мають стаж роботи менше 1 року і лише 8 % працюють 31 рік і більше (рис. М.4).

Далі в анкеті був блок питань, метою яких було виявити, як самі медсестри оцінюють виконання ними вимог з гігієни рук. Переважній більшості (92,4 %) медичних сестер відомо про те, що в лікувально-профілактичному закладі розроблені правила, що регламентують виконання вимог по обробці рук медичного персоналу. 75,3 % середніх медичних працівників упевнені, що дотримуються вимог на 71–100 %; 14,3 %

респондентів – на 41–70 %. Вважають, що виконують правила гігієни рук в 11–40 % випадків всього 1,9 % респондентів, і в 1–10 % випадків – лише 0,9 % респондентів.

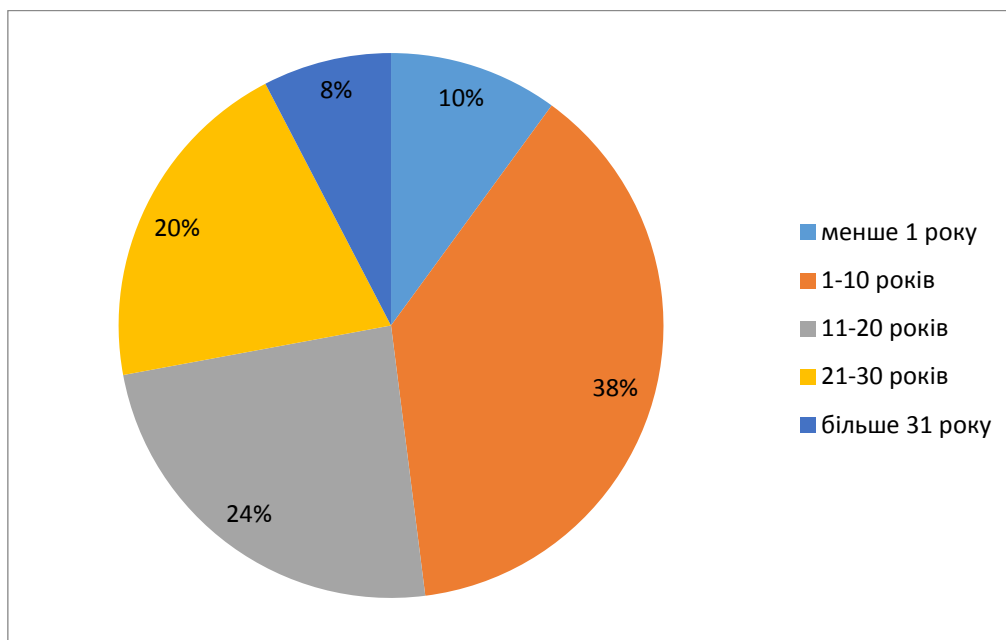


Рисунок М.4 – Розподілення учасників анкетування за стажем роботи на займаній посаді

При відповіді на питання про дотримання правил гігієни рук при контакті з пацієнтами, а також з поверхнями предметів і устаткування в палатах медичні сестри продемонстрували досить високий рівень упевненості в дотриманні ними всіх вимог (рис. М.5, М.6). При цьому медсестри краще застосовували знання з гігієни рук до і після контакту з пацієнтами і відчували велику невпевненість з питань обробки рук після торкання поверхонь. Вважають, що на 70–95 % дотримуються правил гігієни рук до і після контакту з пацієнтом 44,7 % опитаних і дотримуються правил гігієни рук після торкання поверхонь у палаті пацієнта тільки 33,35 % опитаних.

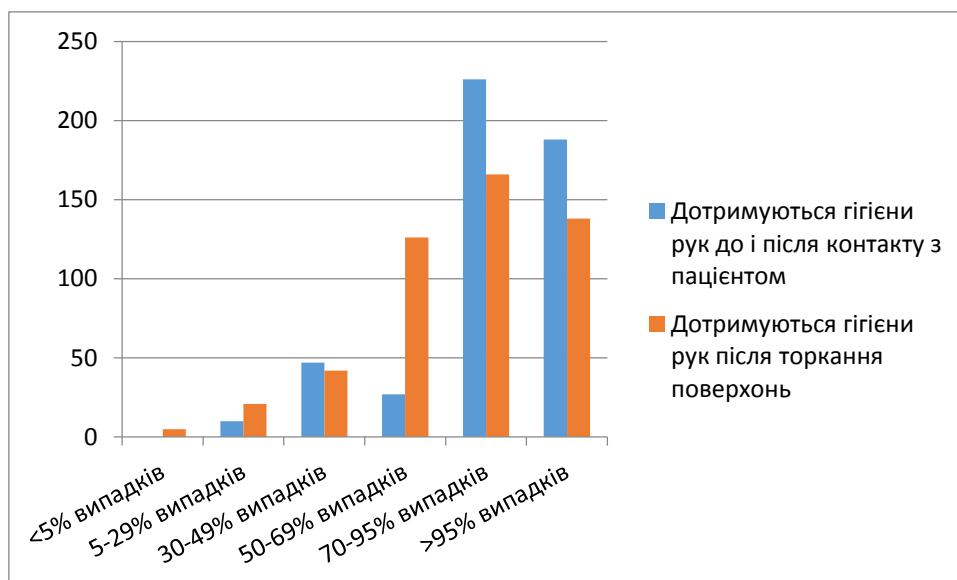


Рисунок М.5 – Думка персоналу щодо дотримання правил гігієни рук при контакті з пацієнтами і поверхнями предметів і устаткування

Щодо дотримання правил гігієни рук при використанні рукавичок більшість персоналу демонструє високий рівень впевненості в дотриманні вимог при зборі сечі через катетер і після зняття рукавичок.

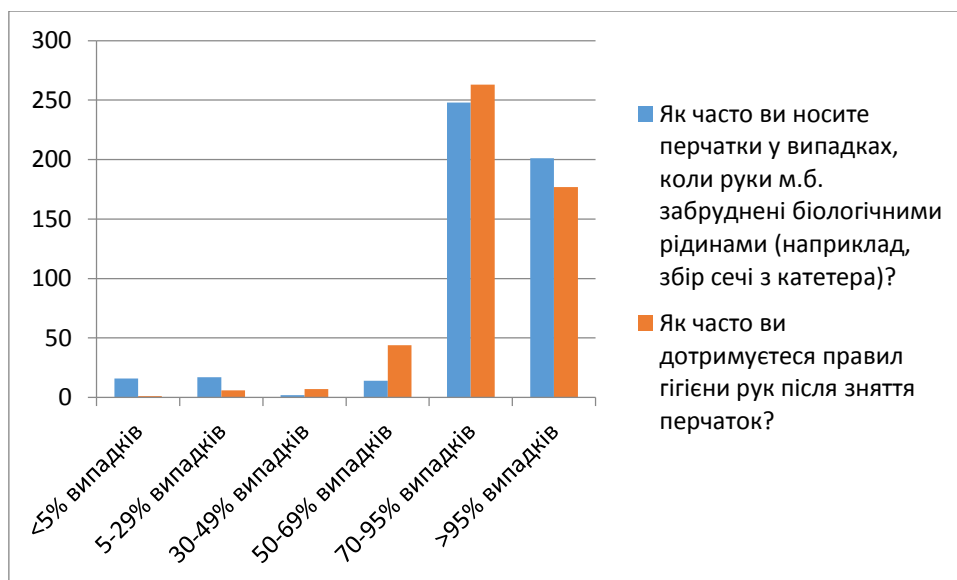


Рисунок М.6 – Думка персоналу щодо дотримання правил гігієни рук при використанні рукавичок

Завданням наступного блоку питань анкети було безпосереднє оцінювання знань середнього медичного персоналу з питань гігієни рук, які

регламентуються чинним наказом: Наказ МОЗ України від 21.09.10 № 798 «Про затвердження методичних рекомендацій. Хірургічна та гігієнічна обробка рук медичного персоналу». При аналізі відповідей з'ясувалося, що переважній більшості опитаних (99,1 %) відомо, що саме руки медичного персоналу є провідним фактором передачі інфекції в установах охорони здоров'я; 93,6 % знають, що працівники охорони здоров'я викликають ризик для пацієнтів, якщо вони носять каблучки, штучні нігті, а також використовують одні і ті самі рукавички для різних пацієнтів.

При цьому тільки 80 % медичних сестер знають, з чого складається гігієнічна обробка рук, лише 62,2 % правильно перераховують послідовність дій при гігієнічній антисептиці рук, 70,8 % – при звичайному митті рук. Вірно перерахували етапи хірургічної обробки рук лише 37,7 % опитаних. Недостатньо уваги середні медпрацівники приділяють питанням обробки рук після операції і догляду за шкірою рук.

При відповіді на питання про те, яка процедура є стандартною протягом робочого дня, лише 61,3 % опитаних вказали «Втирання спиртового антисептика в шкіру рук». 32,4 % вважають, що стандартним є миття рук рідким милом і втирання одноразовими рушниками, хоча при подальших відповідях на питання анкети з'ясовується, що більшість опитаних (91,6 %) справедливо вважають, що звичайне миття рук призначено винятково для механічного очищення рук і не має високої ефективності щодо усунення транзиторних і резидентних мікроорганізмів, і 97,1 % опитаних впевнені, що саме використання спиртових антисептиків найбільш ефективно приводить до загибелі мікроорганізмів.

Крім того медичні працівники чудово обізнані про переваги спиртових антисептиків: 83,8 % опитаних указали, що їх застосування більш доступно і швидше у використанні, ніж традиційні методи (миття рук милом і водою в раковині); 99,1 % знають, що при звичайному митті можливо вторинне забруднення шкіри рук мікроорганізмами з водопровідної води; 96,2 % респондентів вважають, що гігієнічна антисептика рук у порівнянні зі

звичайним миттям має кілька переваг: не потрібна наявність води, витрачається менше часу, не потрібна наявність одноразових рушників, рідко виникає роздратування шкіри, немає поширення мікроорганізмів у навколишньому середовищі.

Більшість респондентів (95,2 %) обізнані, що використання зволожуючих кремів знижує ймовірність розвитку контактного дерматиту (КД). У той самий час тільки 7,8 % знають про те, що раціональне застосування спиртових антисептиків також сприяє зниженню ризику розвитку КД і лише 71,4 % вважають спиртові антисептики менш шкідливими для шкіри, ніж вода і мило. Крім того, недостатньо уваги приділяється використанню захисних кремів на робочому місці і вдома.

Медичні сестри показали добру обізнаність у питаннях обробки рук до і після проведення медичних маніпуляцій: 98,1 % опитаних вважають, що гігієнічна антисептика рук повинна виконуватися не тільки після кожного контакту з пацієнтом, а і перед виконанням інвазивних втручань, до і після використання рукавичок; 97,15 % вважають, що звичайне миття рук проводиться на початку і в кінці робочого дня, перед приготуванням і роздачею їжі, після відвідування туалету.

Що стосується використання рукавичок, 92,4 % опитаних знають про те, що це не дає абсолютної гарантії захисту пацієнтів і персоналу від збудників інфекції; 99,1 % не застосовує рукавичок повторно, крім ситуацій, що вимагають частої зміни рукавичок, наприклад, при заборі крові, як і передбачено чинним наказом; 99,1 % справедливо вважають неприпустимим пересування медичних працівників у рукавичках по відділеннях стаціонара. Основні помилки при використанні рукавичок правильно назвали 80,2 % опитаних, виділивши використання одноразових рукавичок при роботі на харчоблоці, надягання рукавичок на руки, що вологі від антисептика, відсутність обробки спиртовим антисептиком рук після зняття рукавичок, а також недостатній догляд за шкірою рук після зняття рукавичок.

Недостатній рівень знань продемонстрували медсестри при відповіді на питання про те, як потрібно обробляти руки при ризику забруднення їх спороутворюючими мікроорганізмами. Лише 12 % опитаних знають, що спороутворюючі мікроорганізми видаляються з поверхні рук за допомогою пролонгованого в часі миття рук (протягом як мінімум 2 хв).

В кінці анкети респондентам пропонувалося назвати основні причини, які заважають їм регулярно дотримуватися правил гігієни рук (рис. М.7).

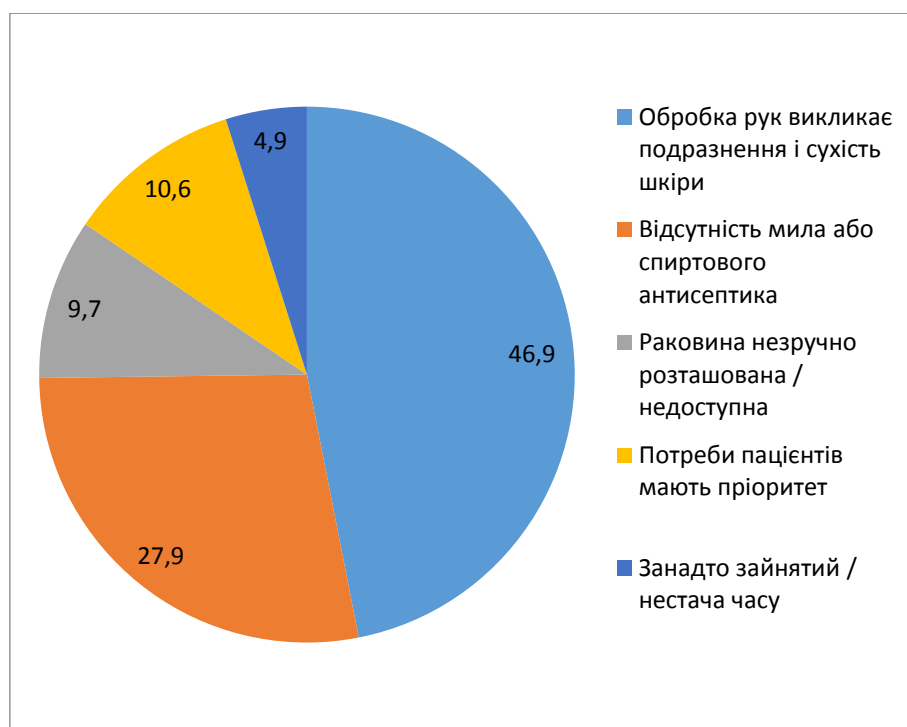


Рисунок М.7 – Основні причини, що перешкоджають дотриманню правил гігієни рук медичними сестрами

Основними названими причинами були сухість і подразнення шкіри після обробки рук, відсутність мила і спиртового антисептика, а також брак часу у персоналу і турбота про пріоритетні потреби пацієнтів.

Таким чином, результати анкетування середнього медичного персоналу показали, що при проведенні навчання медичних сестер правилам гігієни рук особливу увагу слід приділяти питанням профілактики КД, у тому числі й забезпеченню медичних працівників зволожуючими захисними кремами,

акцентуючи увагу на правильному виконанні всіх етапів гігієнічної і хірургічної обробки рук; необхідно посилити контроль за безперервним забезпеченням відділень лікарень спиртовими антисептиками і рідким милом і переглянути норми навантажень на медичних сестер для забезпечення можливості якісного медичного обслуговування пацієнтів.