

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ МУЛЬТИАГЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ЕПІДЕМІЧНОГО ПРОЦЕСУ ІКСОДОВОГО КЛІЩОВОГО БОРЕЛІОЗУ

«Моделювання ІКБ»

2018

ПЛАН НАУКОВОЇ РОБОТИ

Вступ

1 Аналіз стану проблеми. Постановка задачі дослідження

1.1 Аналіз захворюваності іксодовим кліщовим бореліозом

1.2 Аналіз методів моделювання епідемічного процесу

1.3 Постановка задачі

2 Імітаційне мультиагентне моделювання

3 Поняття і види інтелектуальних агентів

3.1 Структура агентів

3.2 Середовище

3.3 Взаємодія агентів

4 Мультиагентна модель ІКБ

3 Автоматизація та програмна реалізація

4 Результати дослідження

Висновки

Список використаної літератури

ВСТУП

Іксодові кліщові бореліози (ІКБ) – група інфекційних трансмісивних природних осередків захворювань, що викликаються бореліями групи *B. burgdorferi* та передаються іксодовими кліщами. Клінічно захворювання протікає з переважним ураженням шкіри, нервової системи, опорно-рухового апарату, м'яз серця і характеризується схильністю до хронічного, а також летального перебігу [1].

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 тисяч щорічно. Інтенсивні показники захворюваності бореліозом у Франції становлять 39,4 на 100 тис. населення, в Болгарії – 36,6 [2].

Назву хвороби – іксодові кліщові бореліози – стали використовувати після відкриття в останні роки нових генотипів борелій групи *B. burgdorferi*, які також передаються іксодовими кліщами. До цього випадки цієї групи захворювань реєструвалися як хвороба Лайма. І зараз за офіційною статистикою ці захворювання можуть проходити під назвою «Хвороба Лайма». Дане положення регламентовано на підставі короткого варіанту Міжнародної статистичної класифікації захворювань і проблем, пов'язаних зі здоров'ям, 10-го перегляду, прийнятої Сорок третьою Всесвітньою Асамблеєю Охорони здоров'я [3].

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. afzeli*. У найбільш активних природних вогнищах хвороби Лайма в Україні інфікованість бореліями кліщів становить 10-70%. Епідеміологічні та серологічні дослідження, проведені даними інститутом, показали, що від 10% до 42,2% населення України мають контакт із збудником бореліозу [4]. 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, та зростання інфікованості кліщів бореліями [5]. Внаслідок зростання популяції кліщів відзначається підвищення числа випадків укусів кліщами населення.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз захворюваності іксодовим кліщовим бореліозом

Для аналізу було обрано Харківську область.

У Харківській області перший випадок ІКБ зареєстрований в 2000 р, з цього часу в області проводиться епідеміологічний нагляд. Мною проведено епідеміологічний і ентомологічний аналіз з 2000 р. по 2015 р. Показники захворюваності в Україні перевищують показники в Харківській області (крім 2005 року), з 2006 р. помітна стійка тенденція зростання захворюваності. В останні роки в Харківській області загострюється епідемічна ситуація по ІКБ, кількість випадків захворювання продовжує рости (з 2 випадків в 2000 р. до 228 в 2015 р.). За період епідеміологічного нагляду зазначалося 4 різких підвищення захворюваності в 2005, 2009, 2012 2015 років. З поступовим зростанням показників у наступні 2-3 роки, крім 2014 року, коли відзначалося зниження захворюваності в 1,8 рази в порівнянні з попереднім роком. У 2015 році показники зросли в 4 рази.

В області виявлено 371 територія, ензоотична по 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.

На території Харківської області виявлено 7 видів іксодових кліщів, з яких найбільш епідемічно значущих три: іксодус ріцінус (лісовий кліщ), дермацентор ретікулятус (луговий кліщ) і дермацентор маргінатус (пасовищний кліщ).

Найбільш численним і поширеним по території всієї області є іксодус ріцінус, який в структурі всіх зібраних в природних умовах кліщів становить 86%, дермацентор ретікулятус – 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 році до 1,71 у 2012 році. Лабораторними дослідженнями кліщів з природи і відібраних на домашніх тваринах виявлено відповідно 5,1% і 11,4% кліщів, інфікованих збудником хвороби Лайма – *Borrelia burgdorferi*.

Серед видів кліщів більш високий показник інфікованості встановлено у дермацентор 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 аналізований період (з 2000 по 2015 рр.) інфікованість всіх видів кліщів бореліями зросла з 4,4% до 23,9%. У 2014 році зменшилась інфікованість до 21,4% і чисельність кліщів (1,3 на 1 км маршруту проти 1,9 в 2013 році і 1,93 у 2015 році).

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 активності кліщів.

У 2014 - 2015 роках зросла кількість осіб, що заразилися в антропоургічних осередках і склала 85,1% і 73,1%, в 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.

1.2 Аналіз методів моделювання епідемічного процесу

У самій охороні здоров'я і епідеміології моделювання застосовується 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. [7], це необхідно для того, щоб органи охорони здоров'я могли прийняти найбільш раціональні та дієві заходи в боротьбі з інфекціями. Тільки правильно сформульовані математичні моделі дозволяють підійти до суворого вивчення всіх аспектів цієї проблеми, незалежно від того, чи йде мова про епідеміологічні діагностики, оцінки ефективності існуючих профілактичних і протиепідемічних заходів або ж про заходи, що плануються органами охорони здоров'я та санітарно-епідеміологічної служби.

Крім кількісних оцінок результатів тих чи інших видів динамічних систем епідемічного процесу, слід зазначити й інші важливі застосування математичних моделей – прогнозування. Несподіване виникнення епідемічної поведінки в різних системах призводить до формування складної, швидко мінливої обстановки. В умовах надзвичайної ситуації поспішні або хаотичні дії фахівців різних служб можуть негативним чином вплинути на організацію і реалізацію заходів боротьби з проблемою [7].

Слід підкреслити важливість застосування математичних методів в 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) є необхідність будувати сучасні підходи до боротьби з захворюваністю на основі співпраці між інженерами та епідеміологами [8]. В Україні наказом Міністерства охорони здоров'я від 1998 року передбачається

інформатизація сфери охорони здоров'я шляхом впровадження в неї комп'ютерних технологій [9].

Для того щоб обрати найкращий і актуальний спосіб моделювання поширення захворюваності, розглянемо найбільш популярні і практично значущі із вже існуючих моделей.

Завдання для моделювання епідемічного процесу вже відомо давно, об'єктом моделювання служили епідемії. Початок застосування математичних методів при вивченні динамічних систем було покладено в XVII столітті кількісною роботою Граунта і Петті, що склали «біллі про смертність в Лондоні» [10]. У своїй роботі, заснованій на статистиці смертності в Лондоні, зібраній за двадцять років, вони оцінювали ймовірність загинути від того чи іншого виду захворювання [11].

Данило Бернуллі представив роботу з аналізу смертності від віспи. У ній за допомогою найпростішого математичного апарату, заснованого на диференціальних рівняннях, він оцінював ефективність профілактичних заходів [7]. Роботу Бернуллі можна вважати першою моделлю поширення захворюваності.

Наступним етапом розвитку моделювання епідемічного процесу стали роботи Вільяма Фарра [12]. 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 століття статистичний підхід Фарра в вивченні епідемій був переосмислений і потім розвинений в роботах Джона Браунлі [7].

Принцип, який до цих пір лежить в основі епідемічного моделювання, заснований на диференціальних рівняннях, був сформульований Хемером в 1906 році. Нехай $x(t)$ – число індивідів з модельованої популяції, здорових і схильних до захворювання, а $y(t)$ – число вже захворілих (інфікованих) індивідів. Тоді зміна числа інфікованих індивідів з часом можна описати таким

чином [11]: $\frac{dy}{dt} = \beta xy$, де β – параметр, що визначає інтенсивність передачі інфекції.

Подальший розвиток моделі епідемічної поведінки динамічних процесів отримали з розвитком ЕОМ в 60х – 70х роках ХХ століття. Велика частина існуючих епідемічних моделей – безперервні, засновані на застосуванні апарату диференціальних рівнянь. У цих моделях динаміка процесу описується системою диференціальних рівнянь. В якості змінних станів виступають кількості об'єктів різного типу на необхідній території. Рішенням системи рівнянь є рівень розглянутого процесу в кожен момент модельного часу. Подібні підходи в моделюванні активно використовуються і сьогодні [13, 14].

Найбільш відомими серед цих моделей є моделі SIR і SEIR. Модель SIR була запропонована Кермаком і Мак-Кендриком в 1927 р. [15]. У цій моделі вся популяція на модельованій території 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:

$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI, \frac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I, \frac{dR}{dt} = \gamma I, \quad (1)$$

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

Існують модифікації моделі SIR, виконані для врахування особливостей того чи іншого модельованого процесу. У більшості випадків вони використовуються для моделювання динаміки епідемічного процесу захворюваності. Наприклад, для моделювання поширення грипу підходить модель SEIR [16]. У ній до вище перелічених груп модельованих індивідів 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:

$$\frac{dS}{dt} = B - \beta SI - \mu S, \frac{dE}{dt} = \beta SI - (\varepsilon + \mu)E, \frac{dI}{dt} = \varepsilon E - (\gamma + \mu)I, \frac{dR}{dt} = \gamma I - \mu R, \quad (2)$$

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

Акад. О. В. Барояном і проф. Л. А. Рвачевим була запропонована модель яка сьогодні широко відома [7, 17] і є однією з кращих детермінованих моделей епідемічної поведінки динамічних систем, заснованих на диференціальних рівняннях. Бароян та Рвачев застосовували модель для поширення захворюваності на грип. Модель Барояна-Рвачева можна умовно віднести до моделей типу SEIR, проте вона має ряд істотних відмінностей.

У ній виділені ті ж чотири групи індивідів, що і в моделі SEIR, але для опису збільшення кількості людей в кожній з груп використовується наступна система нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь в часткових похідних [17]:

$$\begin{aligned} \frac{dS(t)}{dt} &= -\frac{\lambda}{p(t)} S(t) \int I(t, \tau) d\tau, \frac{\partial E(t, \tau)}{\partial t} + \frac{\partial E(t, \tau)}{\partial \tau} = -\gamma(\tau) E(t, \tau), \\ \frac{\partial I(t, \tau)}{\partial t} + \frac{\partial I(t, \tau)}{\partial \tau} &= \gamma(\tau) E(t, \tau) - \delta(\tau) I(t, \tau), \frac{dR(t)}{dt} = \int \delta(\tau) I(t, \tau) d\tau, \end{aligned} \quad (3)$$

де t – календарний час розвитку епідемії, λ – середня частота передачі збудника від інфікованих хворих до чутливих індивідуумів, p – чисельність популяції, τ – локальний час, що минув з моменту зараження індивіда, $\gamma(\tau)$ – функція розвитку періоду інкубації, $\delta(\tau)$ – функція розвитку інфекційного періоду.

Найбільший внесок у розвиток моделювання епідемічного процесу в останні роки дали популяційні моделі. Популяційні моделі – це дискретно-подійові моделі, в яких все модельовані індивіди явно розділені на соціальні групи, які формуються з урахуванням віку індивідів, в детальних моделях може враховуватися рід занять індивіда. Поширення 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 бути передано здоровому. Контактні групи визначаються характерною структурою суспільства, яка буде залежати від модельованої території.

1.3 Постановка задачі

Метою даного дослідження є автоматизація прогнозування захворюваності іксодовим кліщовим бореліозом за допомогою мультиагентного моделювання.

При виконанні дослідницької роботи були поставлені наступні завдання.

1. Аналіз існуючих підходів в моделюванні динаміки поширення захворюваності.
2. Аналіз методів прогнозування часових рядів.
3. Аналіз захворюваності на ІКБ у Харківській області.
4. Розробка прогнозної моделі динаміки поширення ІКБ.
5. Програмна реалізація побудованої моделі.
6. Аналіз результатів моделювання захворюваності ІКБ.

2 ІМІТАЦІЙНЕ МУЛЬТИАГЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Агентні технології пов'язані з поняттям інтелектуального агента, як деякого інтелектуального робота (активного елемента), цілеспрямовано взаємодіючого з іншими подібними елементами і зовнішнім середовищем в заданих умовах.

За визначенням під інтелектуальним агентом розуміється імітаційна модель активного елемента, стан і поведінку якого в різних ситуаціях досягнення мети змінюються в залежності від стану і поведінки інших агентів і середовища по аналогії з інтелектуальною поведінкою живого організму (в тому числі людини) в подібних умовах.

Таким чином, агентні технології пов'язані з імітацією взаємодії інтелектуальних агентів - активних елементів динамічних систем будь-якої фізичної, біологічної та соціальної природи. Поведінка і зміна стану таких систем є результатом покрокової взаємодії безлічі її активних елементів, характером відносин і зв'язків між ними, умовами досягнення локальних та глобальних цілей і т. п. У цьому випадку формалізація і моделювання процесів поведінки і взаємодії агентів дозволяють імітувати і прогнозувати виникнення якісно нових станів системи і оцінити можливості досягнення мети при різних варіантах, а також обґрунтувати прийняття рішень в складних ситуаціях ризику, невизначеності та конфлікту.

Рішення такого завдання аналітично або методами математичного програмування з покроковою зміною цільових функцій і обмежень для кожного агента в залежності від зміни ситуації та наближення до мети в більшості випадків неможливо. Це обумовлено неповною, нечіткою або помилковою інформацією про стан і поведінку активних елементів системи. Агентно - орієнтована імітація відкриває нові можливості ідентифікації і прогнозування стану та поведінки активної системи будь-якої фізичної, соціальної та біологічної природи, що є результатом багатокрокової взаємодії багатьох активних елементів системи і навколишнього середовища.

Безліч взаємопов'язаних агентів з індивідуальними характеристиками і поведінкою в будь-якого активного середовища утворює деяку мультиагентну систему, яка б відтворювала динаміку взаємодії і стану агентів в процесі досягнення спільних цілей.

Мультиагентне імітаційне моделювання активних систем - це нова концепція інтелектуальних інформаційних технологій. Вона орієнтована на спільне використання моделей і методів природного і штучного інтелекту для віртуального дослідження, ідентифікації та прогнозування стану та поведінки активних систем в заданому середовищі.

Принциповою відмінністю нової концепції моделювання є введення і формалізація сенсорних зв'язків (змінних) між взаємодіючими активними

елементами динамічної системи. Ці зв'язки визначають зміну стану і поведінки взаємодіючих агентів і системи в напрямку «виживання» і досягнення цілей в складних ситуаціях згоди і протидії, початкової невизначеності, ризику і конфлікту, неповної і нечіткої інформації про ступінь досягнення мети.

Однак практична розробка мультиагентних систем є складним завданням через труднощі в створенні віртуальних середовищ функціонування агентів і власне самих агентів. Тому багато роботи з агентно-орієнтованого моделювання мають описовий характер і в кінцевому підсумку зводяться до вирішення сукупності окремих завдань оптимізації, логістики та дослідження операцій без врахування чинників динамічної взаємодії автономних агентів.

3 ПОНЯТТЯ І ВИДИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АГЕНТІВ

Агент - це програмний модуль, здатний виконувати задані йому функції деякого живого або кібернетичного організму в залежності від функцій іншого агента і впливів активного середовища.

Відповідно до рівня штучного інтелекту і способом поведінки агенти можуть бути класифіковані на наступні основні типи:

1) рефлексивні агенти - характеризуються фізичним і соціальним станами; мають просту поведінку у вигляді реакцій на поточні зміни середовища і інформацію від інших агентів по продукційним правилам «умова - дія»;

2) знання-орієнтовані агенти - мають фізичні, соціальні і когнітивні стани; їх поведінка основана на апріорних знаннях навколишнього середовища, ідентифікації ситуації і ухваленні рішення для досягнення мети;

3) цілеспрямовані навчаючі інтелектуальні агенти - мають у своєму розпорядженні базу знань і ієрархією цілей, моделі поведінки і стратегії досягнення мети в умовах невизначеності, ризику і протидії;

4) самонавчаючі цілеспрямовані агенти - здатні накопичувати знання на основі великого обсягу даних і онтології подій в процесі взаємодії з іншими

агентами і навколишнім середовищем, адаптуватися до ситуації, вибирати стратегію досягнення обраної мети та оцінювати ступінь її досягнення;

5) емоційно-мотивовані агенти - володіють, поряд з вищеописаними «здібностями» попередніх класів, емоційним станом і психотипом в моделях поведінки людини.

Критерієм інтелектуальності агента є ступінь повноти і глибини апріорної бази знань, стратегії і алгоритми цілеспрямованої поведінки в умовах невизначеності, ризику і конфлікту. Загальний алгоритм поведінки інтелектуального агента в динамічній ситуації, що вимагає ухвалення рішення, показаних на рис. 1.

Поведінка агента описується, як деяка ітераційна процедура переробки даних про стан інших агентів і середовища з вибором стратегії цілеспрямованих дій, і представляється послідовністю операцій в дискретні часові періоди - тимчасові події.

Кожній операції відповідає свій алгоритмічний і свій програмний модулі, що забезпечують:

1) сприйняття інформації і накопичення знань про навколишнє середовище і середовищі взаємодії або конфлікту (сенсорний модуль);

2) механізм взаємодії і обробки даних від контрагентів;

3) аналіз власного стану і стану контрагентів з вибором або корекцією цільових функцій (інтелектуальний модуль);

4) прийняття автономних рішень і вибір стратегій. Поведінку агента можна уявити деякою рекурсивною формою, яка описує знаходження і вибір на черговому кроці функції переходу від початкового стану до нового стану в напрямку поліпшення цільової функції.

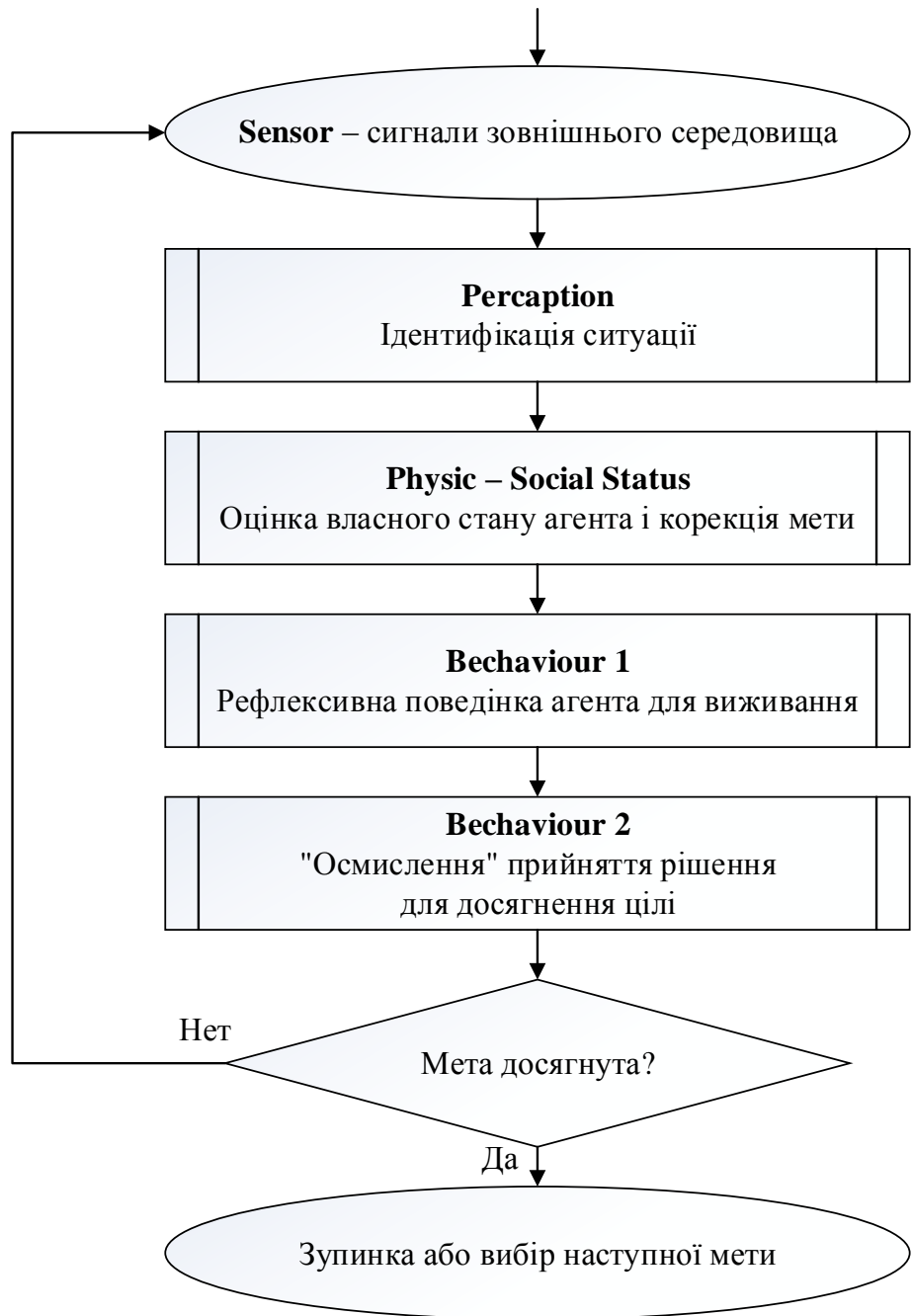


Рис. 1 - Класифікація моделей і методів прогнозування

Подібне завдання в окремих випадках може бути вирішене методами математичного програмування з корекцією цільової функції і індивідуальних обмежень на черговому кроці зміни стану агента в залежності від ситуації і наближення до мети в умовах невизначеності і нечіткої інформації.

3.1 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

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

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:

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

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

На рисунку 2 наведені переходи між станами агентів.

- **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.

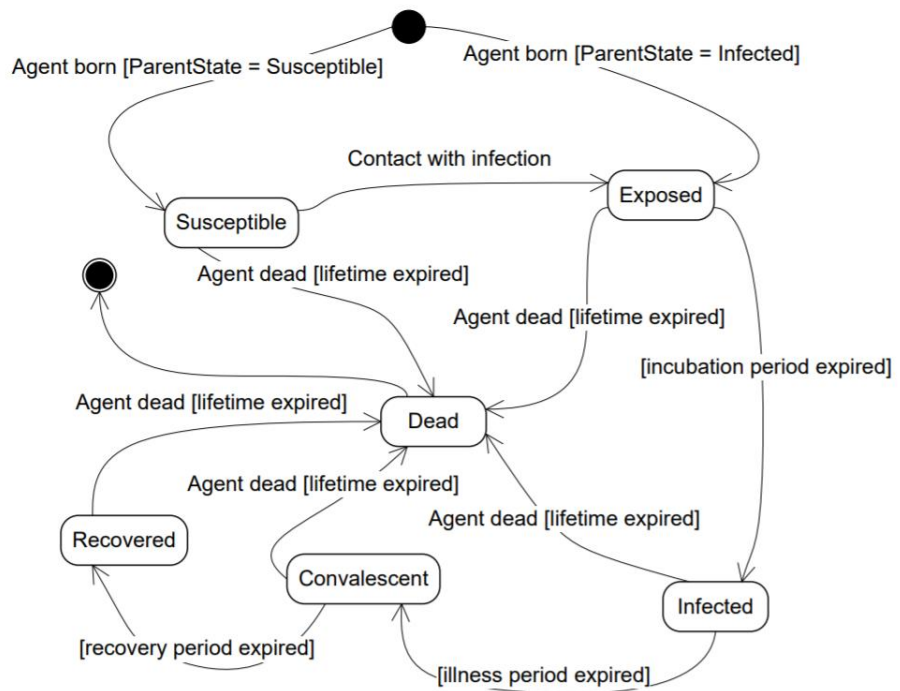


Рис 2 – Схема, що описує зміни станів агента

- 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.

3.2 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.

3.3 Взаємодія агентів

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.

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

$$t = \langle \bar{P}_t, \bar{\tau}_t \rangle, \quad (2.5)$$

де \bar{P}_t – вектор ймовірностей, характерних для типу агента;

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

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

$$\bar{P}_t = (P_b, P_{hr}, P_{hh}, P_{sr}, P_{sh}), \quad (2.6)$$

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».

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

$$\bar{P} = (P_i, P_r, P_d, P_s, P_a), \quad (2.7)$$

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.

4 МУЛЬТИАГЕНТНА МОДЕЛЬ ІКБ

Математичне моделювання як елемент моніторингу інфекцій дозволяє оцінити епідеміологічний потенціал осередків в регіоні і на окремих територіях, спрогнозувати тенденції епідемічного процесу і визначити основні пріоритети та напрямки в профілактиці ІКБ. Прогнозування поширення 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 даній роботі процес розробки прогнозу здійснюється за допомогою імітаційного мультиагентного моделювання.

Принциповою відмінністю нової концепції моделювання є введення і формалізація сенсорних зв'язків (змінних) між взаємодіючими активними елементами динамічної системи. Ці зв'язки визначають зміну стану і поведінки взаємодіючих агентів і системи в цілому в напрямку «виживання» і досягнення цілей в складних ситуаціях згоди і протидії, початкової невизначеності, ризику і конфлікту, неповної і нечіткої інформації про ступінь досягнення мети.

Порівняльний аналіз точності прогнозування методом ковзних середніх до 3 років і агентного моделювання показав, що останній описує існуючі дані краще (рис. 3), отже, прогноз буде виконано точніше.

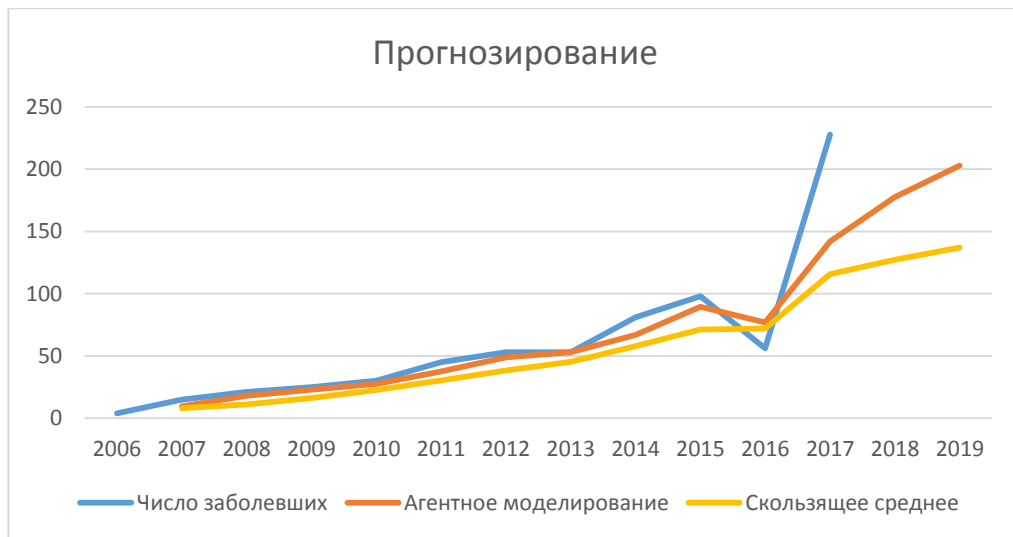


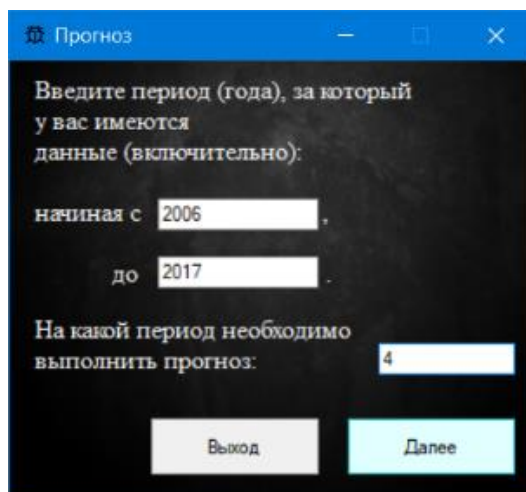
Рис. 3. Прогнозування захворюваності ІКБ із застосуванням різних підходів

5 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

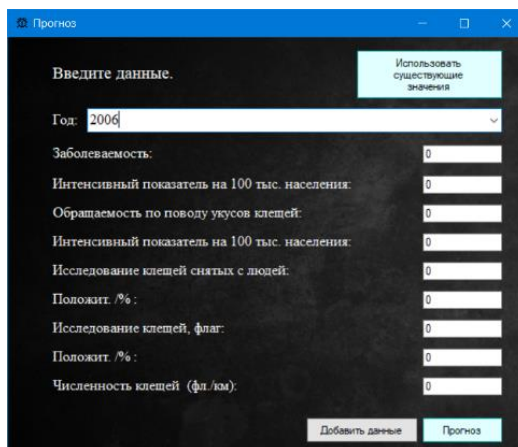
Для автоматизації прогнозування захворюваності ІКБ на мові С# розроблений програмний комплекс, що дозволяє обчислити прогноз захворюваності на підставі існуючих статистичних даних в режимі реального часу. У моїй моделі налаштування програмного комплексу включені дані за період 2006 - 2017 роки. Дані по роках включають інтенсивні показники захворюваності на 100 тис. населення, зверненнями населення з приводу укусів кліщів, результати досліджень кліщів, знятих з людей, на наявність борелій і питома вага інфікованих борреліями кліщів, зібраних на прапор, показники чисельності кліщів.

Для початку розрахунку прогнозу необхідно ввести роки, за які є дані, і кількість років для яких необхідно виконати прогноз (рис. 4а). Потім необхідно ввести дані за кожен рік або вибрати наявні значення з бази даних і виконати прогноз (рис. 4б, 4в).

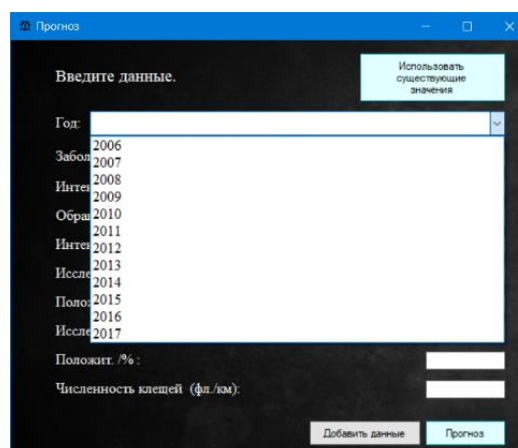
Після введення даних за один рік необхідно натиснути на кнопку "Додати дані". Після заповнення всіх значень за кожен рік, необхідно натиснути "Прогноз", щоб виконати прогноз.



а)



б)



в)

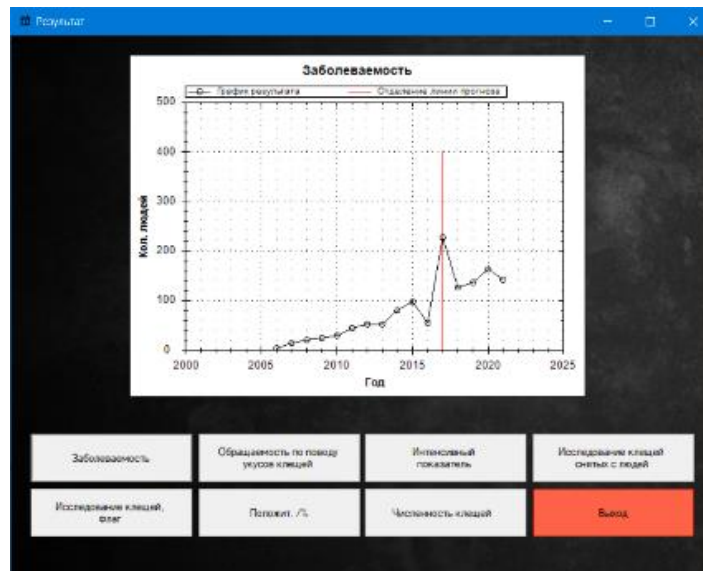
Рис. 4. Початкове вікно роботи програмного комплексу (а), вибір року для прогнозування (б), введення даних для прогнозування (в).

Програмний комплекс автоматично розраховує прогноз, результати якого зображуються у вигляді графіків. Навівши курсором мишки на потрібну точку можна подивитися точне значення.

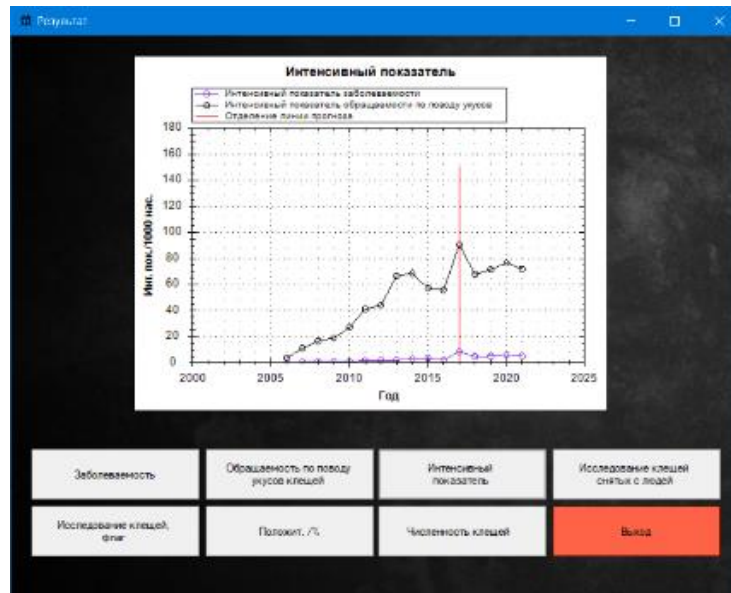
5 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Обчислений прогноз (рис. 5а) показує очікуване збільшення числа випадків ІКБ з певною трирічної циклічністю: збільшення числа випадків ІКБ протягом 2 років з незначним зниженням на наступний рік. Як видно з графіка (рис. 5б), прогнозуються загальні тенденції зростання показників захворюваності хворобою Лайма та зверненнями населення за медичною допомогою з приводу укусів кліщами на 100 тисяч населення.

На підставі розрахованого прогнозу (рис. 6а) можна очікувати незначне зниження і стабілізацію чисельності кліщів в природних стаціях. Прогноз чисельності інфікованих борреліями кліщів (рис. 6б, 7а) показує, що їх кількість не буде знижуватися, як і в останні роки.

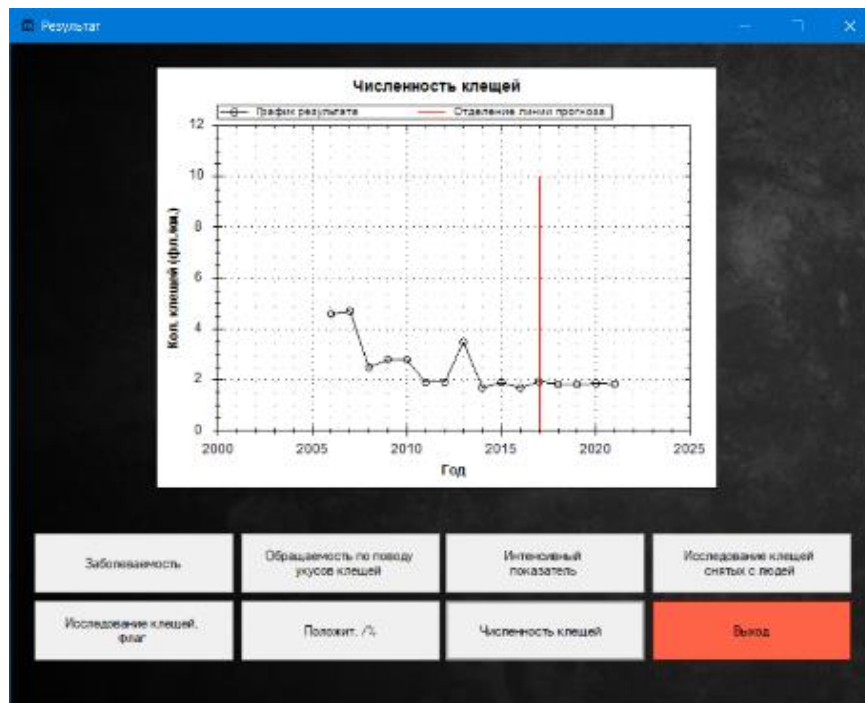


а)

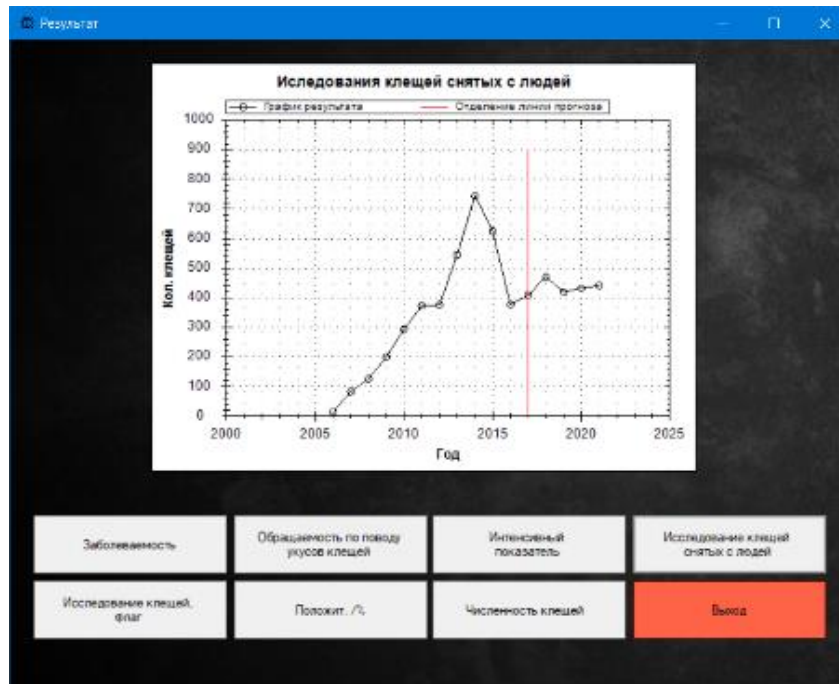


б)

Рис. 5. Динаміка показників захворюваності хворобою Лайма (а), показники захворюваності хворобою Лайма та зверненнями людей за медичною допомогою з приводу укусів кліщами в перерахунку на 100 тисяч населення (б)



а)

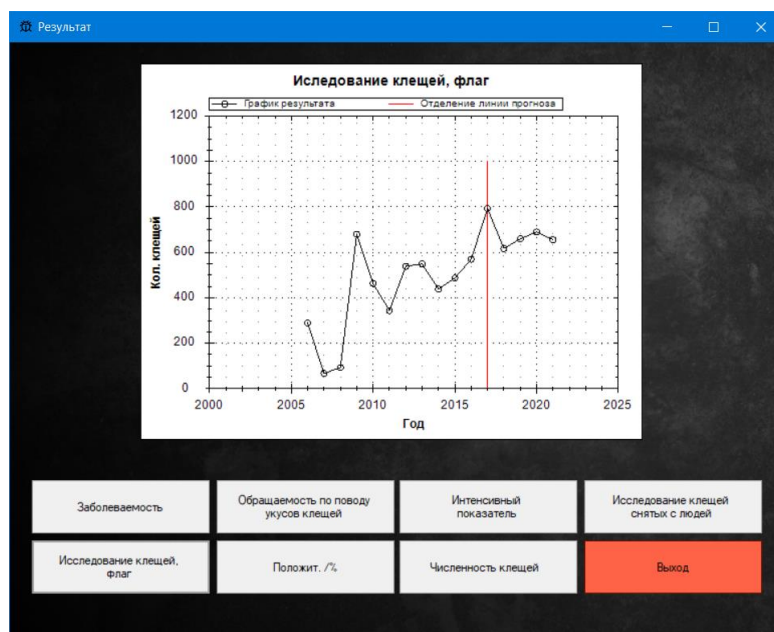


б)

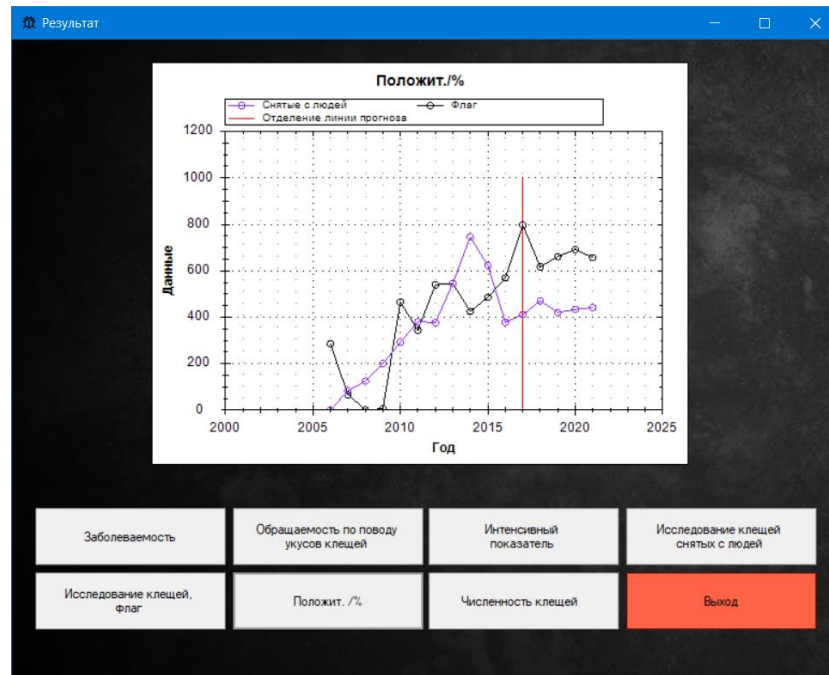
Рис. 6. Показник чисельности клещей в природе по результатами энтомологического мониторингу (а), дослідження кліщів знятих з людей (б)

Рисунок 7а показує чисельність кліщів, знятих з прапора, тобто при спеціальному аналізі досліджуваної території.

Як видно з рисунка 7б, простежується відсутність прямого зв'язку між рівнем інфікованості борреліями кліщів в природі і кліщів знятих з людей.



а)



б)

Рис. 7. Дослідження кліщів, знятих на прапор (а), рівень інфікованості кліщів борреліями (б)

ВИСНОВКИ

Проведена порівняльна оцінка точності прогнозування динаміки епідемічного процесу з використанням методу ковзних середніх і мультиагентного підходу. Більш висока точність відзначається при використанні мультиагентного імітаційного моделювання, на підставі якого розроблено програмний комплекс, що дозволяє обчислити очікуваний рівень захворюваності ІКБ. Адекватність перевіреного прогнозу перевірена на реальних статистичних даних щодо захворюваності на ІКБ в Харківській області з 2006 по 2017 рік.

Отриманий прогноз виявив очікуване збереження нестійкої епідемічної ситуації щодо ІКБ, що диктує необхідність розробки комплексу профілактичних заходів, спрямованих на зниження захворюваності людей ІКБ. Віртуальна перевірка ефективності таких заходів буде наступним етапом нашого дослідження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Малий, В.П. Системний кліщовий бореліоз [Текст] / В.П. Малий, І.С. Кратенко / Харків: Фоліо, 2006. - 127 с.
2. Gulia-Nuss, M. Genomic insights into the Ixodes scapularis tick vector of Lyme disease [Text] / M. Gulia-Nuss, AB Nuss et al. // Nature Communications, Vol. 7, Iss. 10507. - 2016.
3. Міжнародна класифікація хвороб: Короткий варіант, заснований на Міжнародній статистичній класифікації хвороб і проблем, пов'язаних зі здоров'ям, 10-го перегляду, прийнятої 43-ю Всесвітньою Асамблеєю Охорони здоров'я, - 1999. - 741 с.
4. Білецька, Г.В. Сучасні проблеми епідеміології кліщових трансмісивних інфекцій в Україні [Текст] / Г.В. Білецька, І.М. Лозинський, О.Б. Семенишин // Матеріали науково-практичної конференції «Інфекційні хвороби, туберкульоз та сучасний стан довкілля». - Львів, 2005. - С. 135-138.
5. Ткаченко, Л.В. До питання про вивчення нових природно-інфекцій в Харківській області [Текст] / Л.В. Ткаченко, В.А. Нахабно, В.А. Гриненко, В.Є. Кульшин // Тези доповідей науково-практичної конференції, присвяченої 50-річчю створення відділів особливо-небезпечних інфекцій. - Іллічівськ, 2005. - С. 95-96.
6. Чумаченко, Д.І. Математичні моделі і методи комп'ютерно - інтегрованої технології прогнозування динаміки захворюваності на інфекційні хвороби в Україні. [Електронний ресурс] / Д.І. Чумаченко. - 2008. - Режим доступу: <http://old.pinchukfund.org/storage/students/works/2008/488.doc>
7. Боїв, Б.В. Прогнозно-аналітичні моделі епідемій [Електронний ресурс]. - М., 2005. - Режим доступу: <http://www.armscontrol.ru/course/lectures05a/bvb050324.pdf>

8. Reid, PP Building a Better Delivery System: A New Engineering / Health Care Partnership [Text] / PP Reid - Washington DC: The National Academies Press, 2005. - 276 p.
9. Про создания Єдиного інформаційного поля системи охорони здоров'я України [Електронний ресурс]: наказ Міністерства охорони здоров'я України від 21.05.1998 № 127. - Київ, 1998 - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=351>.
10. Бейлі, Н. Математика в біології та медицині [Текст] / Н. Бейлі. - М.: Світ, 1970. - 327 с.
11. Gani, J. Mathematical models of epidemics [Text] / J. Gani // The Mathematical Intelligencer. - 1980. - Vol.3, №1. - P.35-47.
12. Johnson, NJ Leading personalities in statistical sciences: from 17th century to the present [Text] / NJ Johnson, S. Kotz. - Canada, 1997. - P. 284.
13. Авілов, К.К. Математичне моделювання захворюваності на туберкульоз органів дихання на території Росії і оцінка ефективності протитуберкульозних заходів [Текст]: дис. канд. ф.-м. наук: 05.13.18 / Авілов Костянтин Костянтинович. - М., 2007. - 154 с.
14. Iacus, SM Simulation and Inference for Stochastic Differential Equations [Text] / SM Iacus. - Milan: Springer, 2008. - P. 14-18.
15. Brauer, F. Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology [Text] / F. Brauer, C. Castillo-Chavez. - New York: Springer-Verlag New York, 2001. - 448 p.
16. Vynnycky, E. An Introduction to Infectious Disease Modelling [Text] / E. Vynnycky, RG White. - New York: Oxford University Press, 2010. - P.41-62.
17. Бородулін, А. І. Статистична модель епідемічного процесу [Текст] / А. І. Бородулін, Б. М. Десятків, А. Н. Шабанов, А. А. Яригін // Сибірський журнал індустріальної математики. - 2007. - Т.10, №2. - С.23-30.

АНОТАЦІЯ

Актуальність теми дослідження. Іксодові кліщові бореліози (ІКБ) – група інфекційних трансмісивних природних осередків захворювань, що викликаються бореліями групи *B. burgdorferi* та передаються іксодовими кліщами. 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. Побудування якісного прогнозу захворюваності на ІКБ дозволить запровадити своєчасні профілактичні та превентивні заходи та знизити рівень інфікованості населення.

Мета роботи: автоматизація прогнозування захворюваності іксодовим кліщовим бореліозом за допомогою інтелектуального мультиагентного моделювання.

Об'єктом дослідження є епідемічний процес іксодового кліщового бореліозу.

Предметом дослідження є моделі та методи прогнозування динаміки розповсюдження епідемічних захворювань.

Методи дослідження: для побудування прогнозу захворюваності на ІКБ застосовано мультиагентний підхід до імітаційного моделювання. Для розробки програмного комплексу для автоматизації розрахунку прогнозу використана мова програмування С#.

Отримані результати: Проведено аналіз захворюваності іксодовим кліщовим бореліозом в Харківській області з 2000 по 2015 рік. За допомогою мови програмування С# розроблено програмний комплекс, що дозволяє обчислити прогнозний рівень захворюваності ІКБ на підставі мультиагентного моделювання. Адекватність прогнозу перевірена на реальних статистичних даних щодо захворюваності на ІКБ.

Ключові слова: моделювання епідемічного процесу, мультиагентне моделювання, прогнозування захворюваності, іксодовий кліщовий бореліоз, хвороба Лайма.