

## Моделиране на епидемия в мрежи от социални контакти

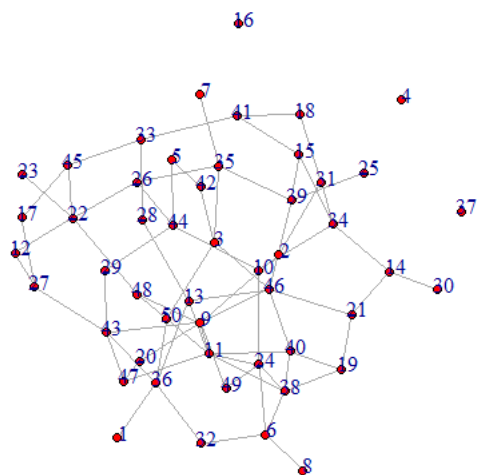
В този материал предлагам няколко илюстративни примера за това как се прави епидемиологичен анализ с използване на моделирани мрежи от социални контакти. Такива мрежи се наричат „социални мрежи“ и ще ги наричам така със специалната уговорка, че **не става дума за социалните мрежи в Интирнет, а за тези, формирани от реални контакти**. Социалните мрежи в Интернет в днешно време са един от начините, по които хората общуват и организират дори реалните си физически контакти. В този смисъл те са социални мрежи, но са едва последните, които са се появили относително скоро. Социалните мрежи като система от физически контакти и общуване със сигурност съществуват откакто има хора, а съществуват и при много животни. Именно тези мрежи са критично важни за епидемиологията.

Трябва да направя и няколко уговорки. Този анализ не представлява алтернатива на официално публикувани прогнози, правени от институции, други органи или от правителството. Сериозните епидемиологични анализи са екипна и високо специализирана работа. Все пак, тъй като мрежовият подход в епидемиологичните анализи все още не толкова популярен, реших че е добре да споделя този материал.

Епидемиологичните модели ползват три типа информация - 1) вирусологична - при какви видове социални контакти с каква вероятност се предава патогена; 2) демографска - в случай че различни категории и групи индивиди са с различна уязвимост според възраст, пол, начин на живот и 2) социологическа - как в различните общности е организирано социалното общуване. Социологическата информация не се ползва толкова активно в класическите епидемиологични модели, а тя е изключително важна. Моделирането на социални мрежи е особено продуктивно при анализа на началните фази от една епидемия, когато се проследяват конкретни случаи и се анализира как те са заразили своите социални контакти, за да се прогнозира как епидемията може да се развие на други места или да се направят по реалистични модели на масовото заразяване. По принцип, колкото по-заразен е един патоген, толкова по-малко значение има конкретния социално-мрежови анализ и може да се премине директно към масово моделиране без да ни интересува тъканта от социални контакти. По всичко личи, че коронавируса е граничен случай в това отношение.

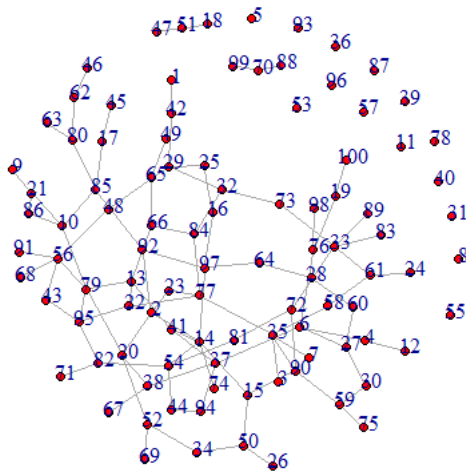
В следващите симулации единицата за време, показана по абсцисата е приблизително равна на една седмица. „Тактовете“ на една епидемия, зависят от поведението на патогена, така че единицата за време може да бъде различна – час, ден, седмица. Нека да вметна, че разпространението на други зловредни, не толкова зловредни и дори благотворни неща като иновации, моди, идеи, слухове, фалшиви и достоверни новини също се моделира с математически инструменти заимствани от епидемиологията.

**Фигура 1. Случайна (стохастична) мрежа на Ердьош-Рени с 50 участника**



Мрежа на Ердьош-Рени с 50 участника и вероятност от 5% за връзка между всеки двама от участниците. Подобни мрежи се заразяват относително бавно заради големите максимални разстояния между участниците. Тази мрежа има диаметър 7, което означава, че най-дългото разстояние между които и да е двама участници е 7 стъпки. В мрежата, както се вижда от фигура има и трима участници, които няма да бъдат заразени, защото са напълно изолирани от останалите – те не поддържат с никого контактите, които са необходими. Реалното време за заразяване в подобна мрежа зависи от честотата на социалните контакти в съответната общност за единица време.

Фигура 2. Случайна (стохастична) мрежа на Ердьош-Рени със 100 участника



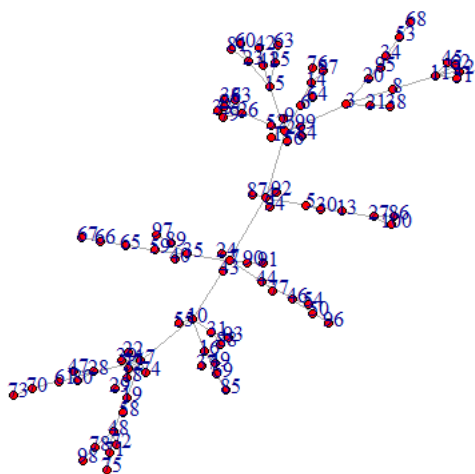
На фигура 2 е показана подобна на предишната мрежа със 100 участника и само 2% вероятност за връзка между всеки двама от тях. Тази мрежа е с диаметър 12, значително по-голям. Ако няма проследяване на контактите и навременно прекъсване на връзки в мрежата, целият ѝ свързан компонент се заразява. По-големият диаметър показва, че максималното време за заразяване на всеки който може да се зарази е по-дълго. Тъй като заразяването става от случайна начална точка (могат да бъдат и повече от една), по интересно е средното разстояние. В показаната по-горе мрежа то е 5.15. Понякога от голямо значение за моделирането е и цялото разпределение на разстоянията в мрежата. Например в горната мрежа има 103 (преки) връзки (разстояния) с дължина 1, 202 разстояния с дължина две (познат на моя познат), 361 разстояния с дължина 3 и т.н. до най-голямото разстояние 12, която е представена само в 2 пътя.

За епидемиологията особено важно е конструирането на реални социални мрежи от заразени индивиди. Социалните мрежи в различни култури, общности и групи могат да бъдат много различни. Още повече, че от епидемиологична гледна точка нас ни интересува определен кръг от социални контакти – интимни, семейни, модели на посещаване на публични места в населеното място и други.

Не всяко събиране на хора на едно място е еднакво опасно. Това зависи от характера на патогена и от характера на събирането. Има масови събирания между по принцип близки хора, при които общуването между много от участниците протича именно по начин, по който протича общуването между близки или познати – ръкостискания, прегръдки, танци, разговор от близко разстояние, споделяне на обща трапеза. При други събирания, например ходенето на театър, съвместното пребиваване на едно място протича при друг протокол. Пазаруването в супермаркет – при трети. Един много заразен патоген може да се окаже еднакво ефективен и при трите протокола, но това

може и да не е така. Вирусолозите определят дали и кога това е така. Въпросът колко често хората в дадена общност попадат в един или друг протокол на общуване, колко са обичайно участниците, с каква интензивност общуват е от различно естество. Отговорът му е по-скоро в периметъра на социалните науки и често изисква комбинация от познаване на културния контекст и провеждане на емпирични проучвания.

Фигура 3. Случайна мрежа Барабаши-Алберт със 100 участника



На фигура е показана случайна мрежа, генерирана по метода на Барабаши-Алберт. Този вид мрежи е много подходящ за моделиране на общности, в които има по-гъсто свързани индивиди и такива, които свързват отделни струпвания с по-голямата мрежа. Големите мрежи на Барабаши-Алберт моделират добре свързаността във виртуалното пространство и не са толкова добър модел на общуването във физическото пространство. Създаването на множество по-малки мрежи на Барабаши-Алберт и обединяването им по подходящ начин може обаче да послужи за моделиране на епидемии, които изискват физическо разпространение чрез някаква форма на пряк контакт.

### Моделиране на епидемия върху социални мрежи

Сега преминавам към няколко примера за моделиране на епидемия върху някои популярни видове мрежи. Част от тях не са толкова разпространени в реалността, но са много подходящи за илюстрация на самия процес на заразяване. В края на изложението давам няколко по-реалистични примера, които моделират заразяването на малък и по-голям град. При определени допускания може да се направи мрежови модел и за цяла държава. В него ще има различни видове социални мрежи. Като минимум трябва да се включат: 1) мрежите от лични и професионални контакти и 2) мрежите, които се образуват от посещаването на едни и същи обществени места. Хората, които

пазаруват в един и същ магазин, посещават едни и същи публични събития или обществени места също могат да се разглеждат като участници в мрежа от социални контакти. Такива мрежи се наричат двукомпонентни или бипартитни и могат да се ползват за различни анализи.

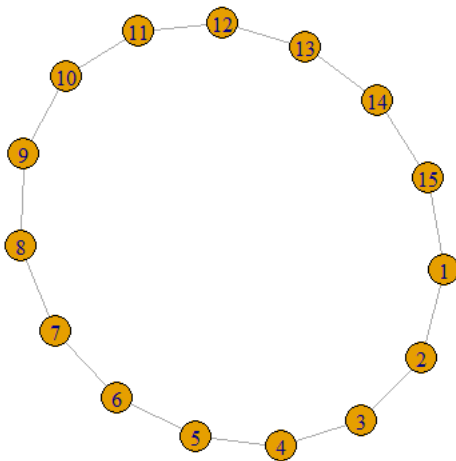
Предполагам, че в контекста на настоящата епидемия от коронавирус е ясно какво имам предвид. За анализа в идеалния случай са необходими: 1) данни/допускания за населението по населени места; 2) данни/допускания за движението на хора между населените места; 3) данни/допускания за разпределението на структурата на домакинствата и техния брой; 4) данни/допускания за честота на социалните контакти, които представляват интерес за анализа.

Епидемиологични симулации върху толкова големи модели не са възможни на персонален компютър, какъвто ползвам в момента, защото изискват голям ресурс от памет и изчислителна мощ.

Всички мрежи и епидемиологични симулации са направени с пакета `igraph`<sup>1</sup> за програмния език и среда за статистически изчисления с отворен код `R`<sup>2</sup>.

Нека погледнем първо един прост, но интересен пример - заразяване на кръг (в буквалния смисъл) от свързани хора. Кръгът е с 15 участника.

Фигура 4. Кръгова мрежа от 15 участника.



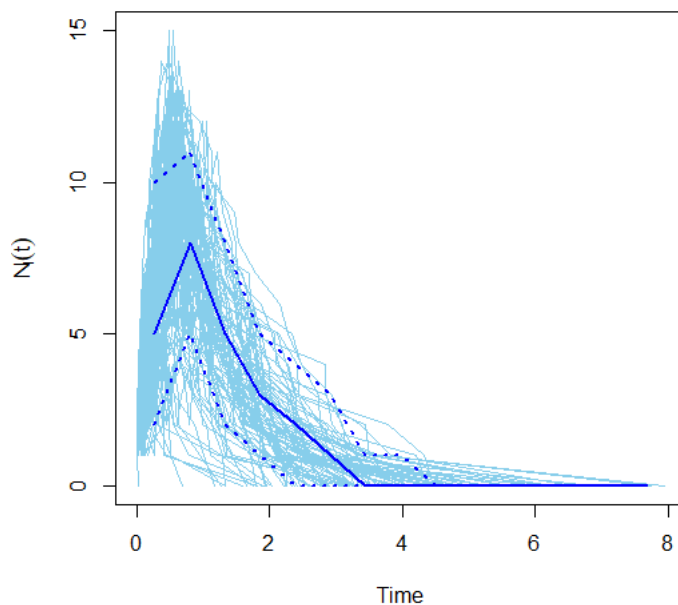
---

<sup>1</sup> <https://igraph.org/r/>

<sup>2</sup> Kolaczyk, Eric, and Gabor Csardi. 2014. *Statistical Analysis of Network Data with R*. New York: Springer.

Ето резултата от 100 реализации на модела при силен темп на заразяване и нисък темп на оздравяване. На тази и всички следващи графики, които показват разпределението на броя на заразените във времето гъстата мрежа от тънки линии представлява сноп от 100 отделни реализации на епидемията, плътната синя линия е средната от всички траектории на епидемията, а пунктирните линии показват доверителните интервали при степен на достоверност 95%, т.е. в тези граници попадат 95 от 100 симулирани траектории на епидемията. На всички графики ще забележите, че дори само под влияние на случайността и при липса на всякакви мерки една епидемия може да се развие в много широки граници. Затова не бива да приемате с лека ръка твърдения какъв процент от населението ще се зарази, да кажем 30% или 70%. При всички случаи това са конкретни изчисления при някакви допускания и без да се отчитат случайните фактори. Отчитайки дори само случайните фактори, без да навлизаме в допълнителното моделиране на различни сценарии, твърдението би трябвало да звучи примерно така, „между 30% и 70% от населението могат да се заразят в хода на епидемията“<sup>3</sup>.

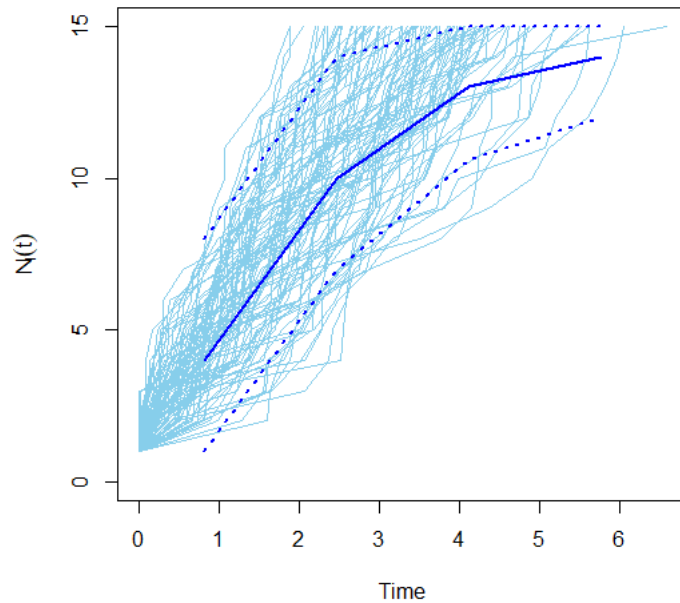
Фигура 5. Заразяване на кръгова мрежа с 15 участника, сценарий 1.



Ето заразяването на същия „кръг“ при нисък темп на заразяване, и пълна липса на оздравяване, т.е. веднъж заразен всеки продължава да бъде носител на патогена (например при СПИН). При този модел всички се заразяват рано или късно. Ситуацията на оздравяване без имунитет е подобна.

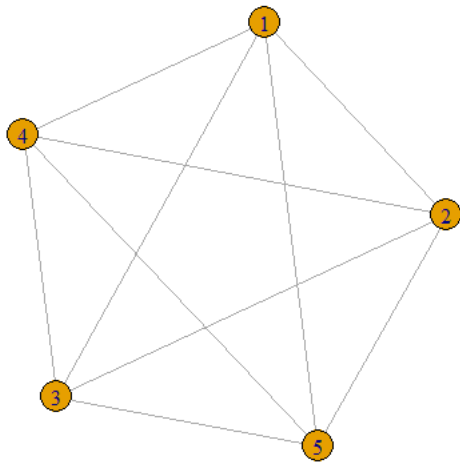
<sup>3</sup> Отново напомням, че примерите са само илюстративни.

Фигура 6. Заразяване на кръгова мрежа от 15 участника, сценарий 2.



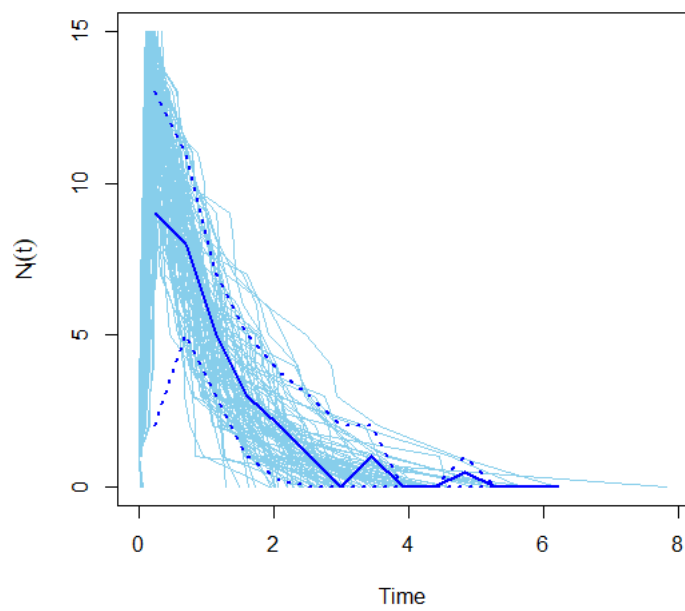
Кръговата мрежа не е особено уязвима на бързо заразяване. Освен това може да бъде разделена на две несвързани части само чрез прекъсване на две от връзките. Мрежите, които са теоретично най-уязвими на заразяване са така наречените пълни мрежи, в които всеки е свързан с всеки. На фигура 7 е показана пълна мрежа с 5 участника (можем да си я представим например като 5-членно семейство, което споделя общо жилище).

Фигура 7. Пълна мрежа с 5 участника



Ето модел на заразяване на пълна мрежа с 50 участника, при не много високи темпове на заразяване и оздравяване.

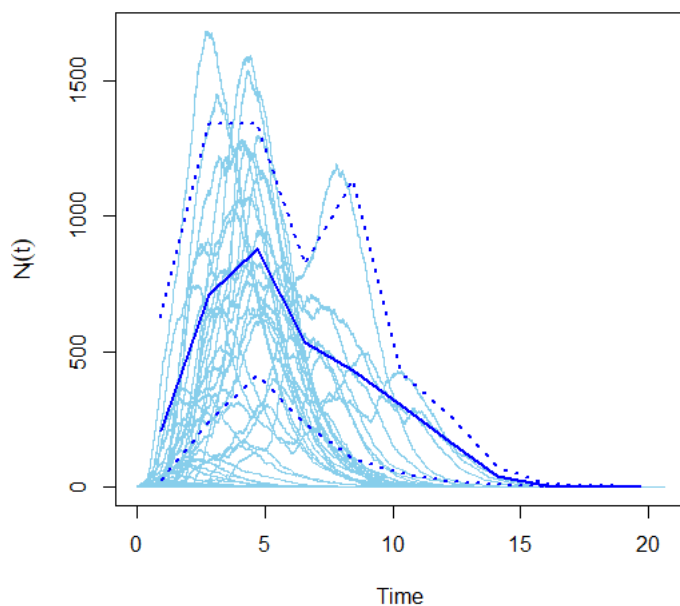
Фигура 8. Заразяване на пълна мрежа с 50 участника



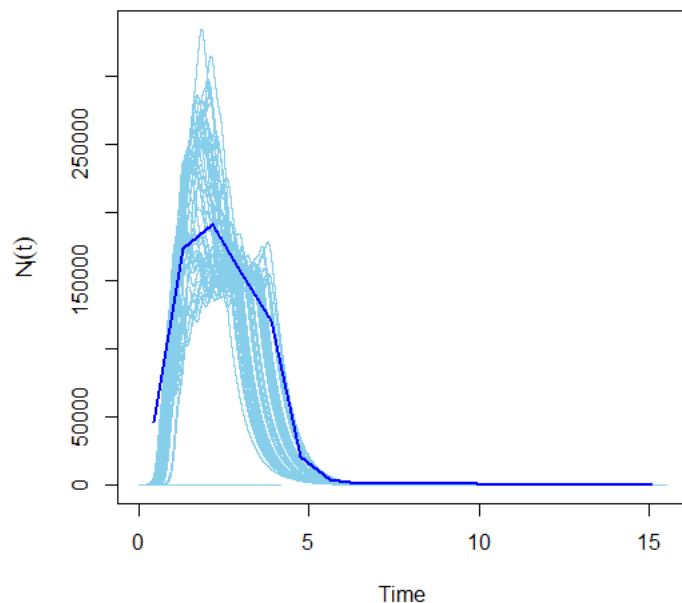


Виждаме, че в пълни мрежи заразата стартира експлозивно и след това угасва постепенно, при това темпът на заразяване би бил еднакъв независимо от размера на мрежата – още първият заразен потенциално може да зарази всички останали в зависимост от заразността и бързината на предаване на патогена. Пълните мрежи описват гъсто свързани общности. При предаване от човек на човек в личен контакт като пълна мрежа може да бъде описана общност, в която всеки познава всеки и общува със всеки. Като вече стана ясно пример за това са домакинствата. Такива могат да бъдат малки населени места, кръговете от много близки познати, работните места.

Фигура 9. Възможен модел на заразяване на малък град с население 12,500 души

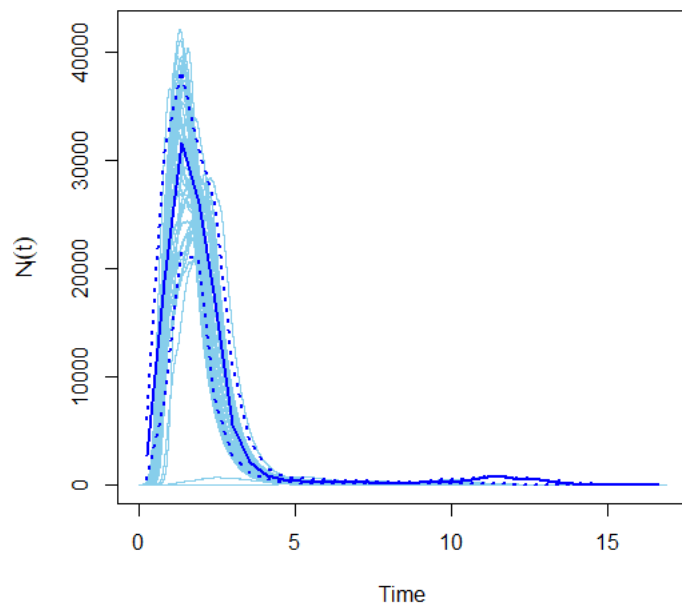


Фигура 9 представя модел на заразяване на популация с размерите на малък град от 12,500 жители, която се състои от 5 по-големи мрежи, свързани помежду си с по 20 индивида. Вижда се, че много от симулираните траектории на такава епидемия могат да имат няколко подема и спада, освен това могат да бъдат с много стръмно или по-полегато начало в зависимост от позицията в мрежата на хората, през които става заразяването.



На фигура 10 е показано експлозивно заразяване на население от 200 хиляди, което е моделирано като 20 мрежи по 10 хиляди души, скачени помежду си верижно с по 100 човека. Моделирана е висока степен на заразност. Вижда се, че такава епидемия може да избухне, след това да остане латентна (ендемична) с много малко заразени и после да „припламне“ отново. Размера на припламванията зависи от времето след оздравяване, през което има имунитет. В случая „припламването“ е малко, защото моделът допуска постоянен имунитет. При други допускания това няма да е така и може да избухне нова мащабна епидемия.

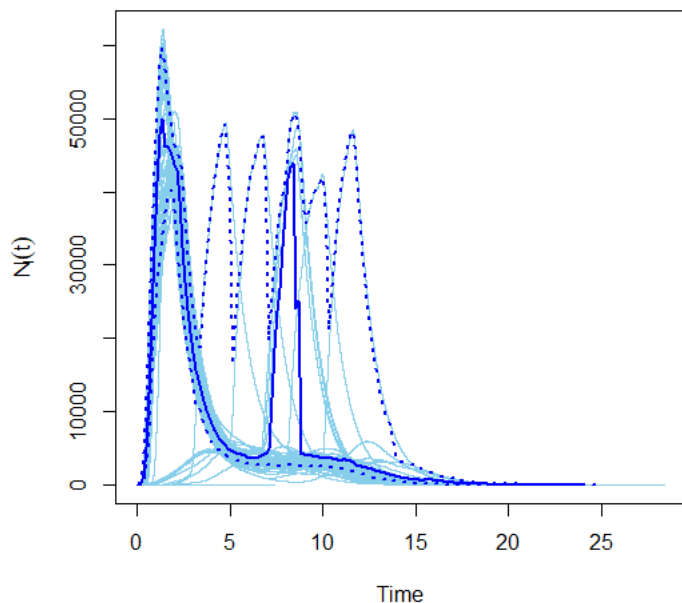
Фигура 10. Заразяване на град с 200 хиляди жители



Ето още един възможен сценарии за епидемия върху същото 200 хилядно население. В случая са променени параметрите на заразяване и оздравяване<sup>4</sup>. В този случай епидемията може да има няколко спада и нови покачвания. Такова циклично избухване се наблюдава може би в публикуваните данни от Ухан.

---

<sup>4</sup> За хората, които се занимават с епидемиология, става дума за  $\beta=1$  и  $\gamma=1$ .



Трябва да отбележа, че при публикуването до момента данни за продължителността на времето, през което носителите на коронавируса, със или без симптоми, могат да заразяват, както и за заразността на коронавируса (темпът на възпроизводство на болестта или колко души средно заразява един вирусноносител), въпреки, че заразяване на 70% от съответното население е в рамките на доверителните интервали при симулиране на епидемията, средните стойности са значително по-ниски. Протичането на епидемията в симулациите с близки до реалните параметри на епидемията от коронавирус е в рамките на 10-15 седмици без отчитане на специални мерки. Но това се отнася до относително компактен географски район. Една епидемия може тепърва да започва в дадена общност, докато вече привършва в друга. Специалните мерки от гледна точка на мрежовия анализ могат да се моделират като разкъсване на съществуващи социални връзки. Най-ефективно е разкъсването на относително малко връзки, които свързват големи групи от хора (международните или междуградските пътувания са връзки от този тип). Друг модел е разкъсването на всички връзки в пълна (изцяло свързана мрежа). Примери за това са затварянето на клуб, в който се събира обособен кръг от постоянни посетители, спиране на тренировките на спортен отбор и др. Трябва да уточня, че в симулациите става дума за реално заразените, не само за регистрираните случаи. Регистрираните случаи и разбивката според тежестта на протичане на болестта се изчисляват (моделират) на базата на допълнителна емпирична информация от страните с мащабно разпространение на коронавируса.