

Jak powstrzymać epidemię COVID-19 we Wrocławiu i na Dolnym Śląsku?

Raport techniczny grupy MOCOS Wrocław, 20/04/2020

Marek Bawiec, Marcin Bodych, Agata Migalska, Tomasz Ożański,
Barbara Pabjan, Piotr Szymański, Tyll Krüger*, grupa MOCOS*

*Korespondencja (kierownik grupy MOCOS): e-mail tyll.krueger@pwr.edu.pl

* Pozostali członkowie grupy MOCOS Wrocław: Barbara Adamik, Viktor Bezborodov, Ewa Skubalska-Rafajłowicz, Ewaryst Rafajłowicz, Wojciech Rafajłowicz

Streszczenie

Grupa MOCOS to międzynarodowy interdyscyplinarny zespół naukowców zajmujący się modelowaniem epidemii COVID-19. Grupa MOCOS opracowała zaawansowany model mikrosymulacyjny, który symuluje zachowania indywidualnych agentów (jednostek). Pozwala on ocenić aktualny poziom reprodukcji wirusa i etap rozwoju epidemii, skalę osiągniętego ograniczenia kontaktów międzyludzkich, poziom wykrywalności zakażonych wirusem, u których choroba przebiega z łagodnymi objawami i wpływ rekomendowanych działań na możliwość ograniczenia rozwoju epidemii.

Niniejszy raport ma za zadanie przedstawienie mieszkańcom Wrocławia i Dolnego Śląska obecnego stanu epidemii w regionie, czynników, które mają wpływ na rozwój epidemii, oraz zaleceń co w związku z tym każdy z nas może i powinien zrobić, aby chronić siebie i innych, oraz wspomóc działania administracji publicznej w walce z epidemią.

Epidemię można opisać za pomocą krzywej krytycznej, tzn. takiej krzywej kiedy epidemia utrzymuje się na pewnym poziomie (stan endemiczny). Obszar ponad krzywą krytyczną nazywany jest obszarem nad-krytycznym i jest to obszar wskazujący wzrost liczby zakażeń. Natomiast, obszar pod krzywą krytyczną nazywany jest obszarem pod-krytycznym i jest to obszar gdzie epidemia słabnie i wygasa.

Aktualnie nasze modelowanie na dzień 19.04.2020 wskazuje, że:

- na Dolnym Śląsku znajdujemy się prawdopodobnie w pobliżu linii krytycznej epidemii
- od początku kwarantanny udało się ograniczyć kontakty niezwiązane z pracą o ok. 60-78%,
- spośród osób zakażonych wirusem, ale przechodzących chorobę z łagodnymi objawami (nie wymagającymi hospitalizacji), wykrywane jest ok. 20-50% przypadków.

Na dzień 19.04.2020 wg. naszych modelowań epidemia znajduje się na linii krytycznej. Choć analiza pokazuje trend przesuwania się epidemii w kierunku stanu wygasania¹, jest jeszcze zdecydowanie za wcześnie na rezygnację z ograniczenia kontaktów. W dalszym ciągu najbardziej prawdopodobne pary parametrów wskazują, że epidemia w Polsce jest wciąż daleka od stanu wygasania, aczkolwiek najprawdopodobniej na Dolnym Śląsku udało się wyjść ze stanu nadkrytycznego. Nie można tego samego powiedzieć o całej Polsce, która dalej znajduje się w stanie nadkrytycznym.

Celem naszych rekomendacji jest przede wszystkim sprowadzenie epidemii do stanu wygasania (*podkrytycznego*) i utrzymania epidemii w tym stanie, aż do jej całkowitego wygaśnięcia, aby obniżyć ryzyko zapaści służby zdrowia, a ponadto by zredukować liczbę zachorowań i zgonów spowodowanych wirusem. W tym celu rekomendujemy:

- utrzymanie ograniczenia kontaktów międzyludzkich,
- zwiększenie efektywności śledzenia historii kontaktów osób zakażonych oraz poddawania kwarantannie lub izolacji osób, które miały kontakt z zarażonymi,
- zwiększanie poziomu testowania i wykrywalności wirusa u osób z łagodnymi objawami.

Naszym celem jest oszacowanie na podstawie danych kiedy naprawdę mija zagrożenie ponownego wybuchu epidemii i kiedy można zredukować ograniczenia kontaktów społecznych,

¹ W porównaniu do dnia 11/04/2020

Rekomendacje

Kombinacja następujących 3 schematów działań ma zasadnicze znaczenie dla szybkiego zmniejszenia liczby przypadków i skrócenia czasu do zakończenia epidemii:

- zredukowanie kontaktów społecznych (już w dużej mierze osiągnięte),
- skuteczne i szybkie wyszukiwanie kontaktów osób zakażonych (nie jest dziś w sprawny sposób realizowane). Optymalnie jest rozpocząć procedurę śledzenia kontaktów już w momencie wystąpienia podejrzanych objawów, jeszcze zanim osoba otrzyma wynik testu. Można dzięki temu skrócić czas, w którym osoby nieświadome, że były w kontakcie z zakażonym, rozprzestrzeniają wirusa, a tym samym usprawnić efektywność tej procedury.
- badanie osób z łagodnymi objawami - niezależnie od historii kontaktów ze znanymi przypadkami - w celu zwiększenia puli osób, od których można rozpocząć śledzenie kontaktów.

Rekomendacje dla obywateli

Pozostanie w domu i ograniczenie kontaktów poza domem do minimum to najlepszy sposób walki z epidemią, niezależnie od poziomu restrykcji narzuconych odgórnie. Wchodzimy w kontakt z innymi ludźmi w różnych okolicznościach, poczynając od gospodarstwa domowego poprzez spotkania z rodziną, przyjaciółmi, współpracownikami, aż po sporadyczne kontakty w sklepie czy komunikacji publicznej. Z jednej strony my sami możemy nie być świadomi, że jesteśmy zakażeni, ponieważ nie wystąpiły jeszcze żadne objawy. Z drugiej strony, osoby, z którymi się zetkniemy, również mogą nie mieć świadomości własnej choroby. Każdy kontakt międzyludzki tworzy "most", dzięki któremu wirus może się rozprzestrzeniać. Dlatego tak ważne jest aby **nie wchodzić w kontakty z innymi osobami, o ile nie jest to absolutnie konieczne**. Epidemii uda się zahamować tylko wtedy gdy będziemy chronić zarówno siebie, jak i innych ludzi. Pozostając w domu dbamy zarówno o dobro własne jak i współobywateli.

Każdy z nas powinien stosować się bezwzględnie do zaleceń Generalnego Inspektoratu Sanitarnego [1]:

- Rygorystyczne mycie rąk, unikanie dotykania twarzy, oczu i ust oraz odpowiednie zasady ochrony podczas kaszlu i kichania.
- Stosowanie masek na twarz w miejscach publicznych.

Zachęcamy również do stosowania następujących reguł w celu zahamowania rozwoju epidemii:

- **Poddanie się dobrowolnej kwarantannie:** jeżeli co najmniej jedna osoba w gospodarstwie domowym ma jeden lub kilka z następujących objawów: kaszel,

gorączka, katar, problemy z oddychaniem - wszystkie osoby w tym gospodarstwie powinny poddać się dobrowolnie kwarantannie do czasu, gdy żadna z nich nie wykaże któregokolwiek z powyższych objawów przez co najmniej dwa tygodnie.

- **Niezwłoczne informowanie bliskich i znajomych:** rodziny, w których nastąpiło choć jedno zakażenie SARS-CoV-2 lub istnieje przypuszczenie, że któryś z członków może być zakażony, powinny niezwłocznie poinformować o tym swoich bliskich przyjaciół i członków rodziny oraz zasugerować im poddanie się dobrowolnej kwarantannie.

Powyższe reguły są zalecanymi przez nas zachowaniami. Szczególnie apelujemy do **osób, które nie stosują się jeszcze do tych zaleceń, aby zaczęły ich przestrzegać w naszym wspólnym interesie**. Mamy tu na myśli m.in. ludzi młodych, którzy sami nie są w grupie ryzyka, ale nieświadomie mogą przenosić wirusa na członków rodziny, którzy, z racji wieku lub chorób współistniejących, mogą przechodzić chorobę w bardziej dotkliwy sposób.

Często dyskutuje się o tym kiedy mija zagrożenie epidemiczne i można powrócić do dawnej częstotliwości kontaktów społecznych. Sam spadek liczby osób zakażonych lub fakt, że w innych krajach jest znacznie więcej osób zakażonych i ofiar epidemii może stanowić bodziec do zniesienia ograniczeń kontaktów. Pragniemy przestrzec przed zbyt wczesnym zniesieniem środków zapobiegawczych, ponieważ może to doprowadzić do wybuchu kolejnej fali wzrostowej epidemii. Bezpieczniej jest przyjąć, że zniesienie redukcji kontaktów może nastąpić dopiero wtedy, gdy w okresie dwóch tygodni nie wystąpią żadne nowe przypadki zakażeń pochodzące z nowych ognisk choroby (nowe przypadki zachorowań pochodzące z wcześniej wykrytych ognisk i objętych kwarantanną mogą zostać pominięte).

Rekomendacje dla administracji publicznej

- Kluczowe dla ograniczenia rozwoju epidemii jest jak najszybsze **identyfikowanie sieci kontaktów osób**, w gronie których wystąpiło zakażenie, lub podejrzenie zakażenia. Konieczne jest usprawnienie procedur pozwalających na **skuteczne i szybkie wyszukiwanie kontaktów osób zakażonych**, które obecnie jest przeprowadzone w sposób mało efektywny: trwa zbyt długo, dopuszcza w czasie trwania procedury testowania do swobodnych kontaktów osób podejrzanych o zakażenie i nie obejmuje kontrolą wszystkich osób pozostających w sieci kontaktów. Aby procedura śledzenia kontaktów była optymalna **należy ją rozpocząć już w momencie wystąpienia podejrzanych objawów**, lub gdy jest podejrzenie o zakażenie, zanim dana osoba otrzyma wynik testu.
- **Badanie osób z łagodnymi objawami** - niezależnie od historii kontaktów ze znanymi przypadkami - w celu zwiększenia puli osób, od których można rozpocząć śledzenie kontaktów.

Badania sondażowe pokazują, że:

- poziom poparcia dla kontroli zachowań naruszających środki zapobiegawcze jest bardzo wysoki w społeczeństwie,
- poziom lęku i zagrożenia jest również wysoki.

Oznacza to, że zdecydowana większość obywateli jest skłonna poddawać się zaleceniom władz, również zaleceniom restrykcyjnym dotyczącym kontroli zachowań i ograniczenia swobód. Mniejsze poparcie dla restrykcji wykazują mężczyźni oraz grupy poniżej 30 r. życia.

Grupa ignorująca restrykcje zwiększa ryzyko dalszego rozwoju epidemii, pomimo że uśredniony poziom przestrzegania restrykcji wskazywałby, że epidemia wygasa.

Dopiero kombinacja wszystkich trzech schematów działań może pozwolić na zmniejszenie liczby zachorowań oraz skrócenie czasu do zakończenia epidemii.

Autorzy raportu

Raport został opracowany przez wrocławski zespół grupy MOCOS - międzynarodowego zespołu naukowców modelujących zjawiska związane z pandemią COVID-19.

Członkowie zespołu MOCOS Wrocław i autorzy raportu, w kolejności alfabetycznej:



dr inż. Marek Bawiec

Prowadzi działalność badawczą oraz dydaktyczną na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej gdzie jest pracownikiem Katedry Informatyki Technicznej. Absolwent kierunku Automatyka i Robotyka. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał z zakresu informatyki i zajmował się syntezą funkcji logicznych. Poza zaangażowaniem w pracę grupy MOCOS na co dzień zajmuje się technologiami wokół Internetu Rzeczy oraz symulatorem rozrostu komórek rakowych - SimBad.



mgr inż. Marcin Bodych

Absolwent kierunków Automatyka i Robotyka oraz Matematyka na Politechnice Wrocławskiej. Zajmuje się zawodowo uczeniem maszynowym i technikami sztucznej inteligencji w kontekście analizy obrazów i tekstu. Naukowo pracuje nad rozprawą doktorską pod tytułem *Agent based models for language evolution* (*Agentowe modele ewolucji języka*) pod nadzorem prof. Tylla Krügera.



prof. Tyll Krüger

Profesor w Katedrze Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Zawodowo zajmuje się modelowaniem matematycznym w medycynie i biologii, procesami stochastycznymi, sieciami złożonymi i systemami dynamicznymi. Absolwent Uniwersytetu Humboldta w Berlinie, doktorat uzyskał na Uniwersytecie w Bielefeld.



dr inż. Agata Migalska

Doktorat z informatyki obroniła na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Zawodowo zajmuje się analizą danych nieuporządkowanych za pomocą metod statystycznych oraz technik sztucznej inteligencji w zastosowaniach przemysłowych.



mgr inż. Tomasz Ożański

Doktorant na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. W pracy naukowej zajmuje się stochastycznymi układami ze złożonymi oddziaływaniami, w tym modelowaniem epidemii. W pracy zawodowej zajmuje się przetwarzaniem obrazów i uczeniem maszynowym.



dr hab. Barbara Pabjan

Socjolog, pracuje w Instytucie Socjologii Uniwersytetu Wrocławskiego. Zajmuje się badaniem społecznych reakcji na epidemię koronawirusa (zróżnicowaniem postrzegania poziomu zagrożenia, stosowaniem środków prewencyjnych).



dr inż. Piotr Szymański

Adiunkt w Katedrze Inteligencji Obliczeniowej na Politechnice Wrocławskiej. Zajmuje się zawodowo analizą danych, wnioskowaniem statystycznym, uczeniem maszynowym i technikami sztucznej inteligencji. Stypendysta programu Top 500 Innovators na Uniwersytecie Stanforda.

Wyniki szczegółowe

Dalsza część raportu zawiera szczegółowe opisy związane z procedurą modelowania, przetwarzanymi danymi oraz technicznymi i naukowymi aspektami wykonanej pracy. Jej struktura wygląda następująco:

1. Wprowadzenie

W tej sekcji znajdziecie Państwo dokładniejsze wyjaśnienie stosowanej terminologii oraz przyjętych w modelowaniu założeń.

2. Wyniki modelowania stanu obecnego

W tej sekcji znajdziecie Państwo wyniki modelowania w celu oszacowania aktualnej fazy epidemii oraz najbardziej prawdopodobnych wartości parametrów redukcji kontaktów, oraz wykrywania przypadków o łagodnym przebiegu choroby.

3. Scenariusze rozwoju epidemii i ich konsekwencje

W tej sekcji znajdą Państwo wyniki modelowania zmian w fazie epidemii w przypadku podjęcia efektywnych działań na rzecz śledzenia historii kontaktów osób zakażonych, zwiększenia wykrywalności przypadków o łagodnym przebiegu choroby, oraz skali negatywnego wpływu opóźnienia w docieraniu do i poddawaniu kwarantannie osób, które miały kontakt z zarażonym.

4. Wyniki modelowania strat ekonomicznych

W tej sekcji znajdziecie Państwo wyniki analizy całkowitego kosztu rozluźnienia restrykcji dotyczących ograniczenia kontaktów w celu poprawienia sytuacji ekonomicznej.

5. Strategie wyjścia z epidemii

W tej sekcji znajdą Państwo dyskusję poświęconą strategiom wyjścia z epidemii, tj. osiągnięcia fazy wygasania epidemii.

1. Wprowadzenie

Epidemię można opisać za pomocą krzywej krytycznej, tzn. takiej krzywej kiedy epidemia utrzymuje się na pewnym poziomie (stan endemiczny). Obszar ponad krzywą krytyczną nazywany jest obszarem nad-krytycznym i jest to obszar wskazujący wzrost liczby zakażeń. Natomiast, obszar pod krzywą krytyczną nazywany jest obszarem pod-krytycznym i jest to obszar gdzie epidemia słabnie i wygasa.

Modele opierają się o stochastyczne mikrosymulacje wieloagentowe i losowy graf kontaktów. Symulujemy populację **w pewnym stopniu odzwierciedlającą populację Wrocławia**, podzieloną na podgrupy narażonych na infekcję, zakażonych i usuniętych (czyli takich, którzy już ozdrowieli albo zmarli). Każda osoba w symulacji ma przypisany wiek, płeć i gospodarstwo domowe o określonej liczbie domowników, według danych demograficznych [2,3]. Przebieg choroby COVID-19 u każdej zakażonej osoby modelowany jest według najnowszych danych medycznych (dokładny opis modelu znajduje się w publikacji [4]).

Założenia modelu

Wyniki prognozy zależą od założeń co do następujących parametrów:

- **R^* - wskaźnik średniej liczby zakażeń poza domem przez jedną osobę zakażoną, zakładając że ta osoba nie została znaleziona w procesie śledzenia kontaktów lub nie została objęta kwarantanną.** Wartość parametru R^* zanim wprowadzono restrykcje została przez nas estymowana dla Polski na 3.16. Różne środki zapobiegawcze takie jak stosowanie masek w przestrzeni publicznej lub ograniczenie kontaktów redukuje ten wskaźnik.
- **q - wykrywalność przypadków o łagodnym przebiegu.** Odzwierciedla efektywność śledzenia kontaktów osób zakażonych poza kontaktami domowymi oraz efekt testowania osób bez znanego powiązania epidemiologicznego. Wykrywalność q nie obejmuje przypadków ciężkich oraz domowników osób z potwierdzonym zakażeniem (w wyniku procedury związanej z kwarantanną, w tych przypadkach zakładamy 100% wykrywalności). Przykładowo, dla 1000 przypadków o łagodnym przebiegu, $q=0.2$ oznacza, że 200 z nich byłoby wykrytych.
- **f - stopień redukcji kontaktów poza gospodarstwem domowym.** Ilustruje skuteczność wdrożonych form restrykcji kontaktów społecznych w odniesieniu do wartości bazowej parametru R^* . Może przyjmować wartość od "o 0%" (brak redukcji kontaktów) do "o 100%" (całkowita redukcja - brak kontaktów poza gospodarstwem domowym). W symulacjach efekt ten jest osiągany stopniowo: dojście do zakładanego stopnia redukcji bazowej wartości R^* zajmuje około tygodnia od momentu ogłoszenia restrykcji.
- **b - prawdopodobieństwo wykrycia kontaktów.** Jest to prawdopodobieństwo zidentyfikowania i dotarcia do każdej osoby, z którą zakażony miał kontakt. Procedura

śledzenia kontaktów jest przeprowadzana zarówno w celu zidentyfikowania źródła zakażenia (wstecz), jak i dalszych osób, które potencjalnie mogły się zakazić (w przód). Procedura powtarzana jest kaskadowo dla kontaktów wykrytych w każdym poprzednim kroku. Opóźnienie pomiędzy kolejnymi krokami śledzenia jest nazywane **opóźnieniem śledzenia**. Przyjmujemy, że śledzenie kontaktów składa się z dwóch etapów: 1) znalezienia kontaktów i poddania ich domostw kwarantannie oraz 2) przeprowadzenie testów, a na każdy z tych etapów przypada połowa **czasu opóźnienia**. Po udanym wykryciu proces jest powtarzany w celu znalezienia kontaktów dalszego rzędu.

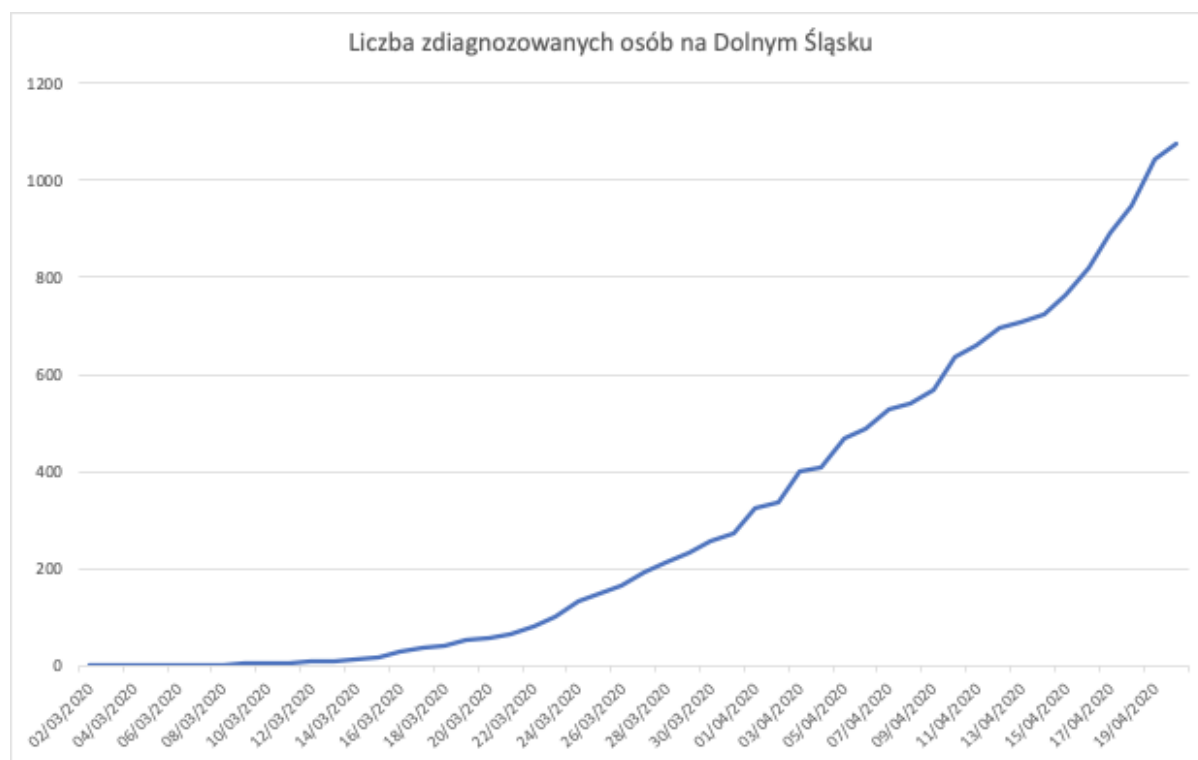
Ogólnie rzecz biorąc, związek pomiędzy q i b jest nieliniowy i zależy również od R^* .

Ograniczenia metodyki

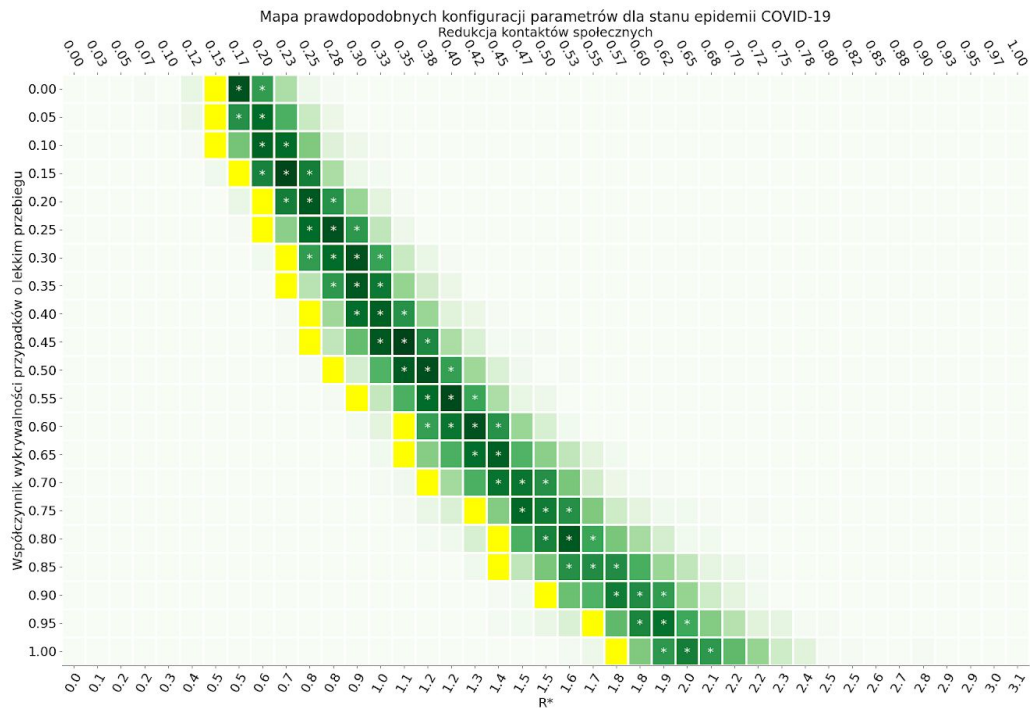
Użyty model nie uwzględnia jeszcze struktury przestrzennej Wrocławia. Nie uwzględniamy rozprzestrzeniania się epidemii w zamkniętych grupach, na przykład w szpitalach czy w domach seniora. Każdy proces modelowania dostarcza oszacowania obarczone błędem.

2. Wyniki modelowania stanu obecnego

Dynamika epidemii COVID-19 opisywana jest w modelu przez dwa parametry - wykrywalność przypadków o łagodnym przebiegu q oraz stopień redukcji kontaktów poza gospodarstwem domowym f . Stopień redukcji kontaktów jest określany w stosunku do wartości sprzed wprowadzenia restrykcji w Polsce.



Rysunek 1A: Zmiana liczby zdiagnozowanych osób na terenie Dolnego Śląska według statystyk z wikipedii (dane od 2.03.2020 do 8.04.2020) oraz statystyk udostępnionych na stronie Dolnośląskiego Urzędu Wojewódzkiego (dane od 9.04.2020 do 19.04.2020)



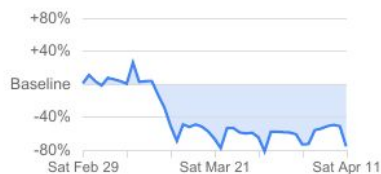
Rysunek 1B. Mapa prawdopodobnych konfiguracji parametrów dla stanu epidemii COVID-19 na Dolnym Śląsku w dniu 19/04/2020. Intensywność koloru zielonego koresponduje do poziomu ufności zadanego parametru - im bardziej intensywny kolor, tym większa wiarygodność. Gwiazdkami oznaczono miejsca o największej wiarygodności. Żółtym kolorem oznaczono linię krytyczną.

Prawdopodobne konfiguracje parametrów zostały wyznaczone na podstawie wyników serii symulacji, przeprowadzonych dla wszystkich możliwych par parametrów pełnego zakresu wartości wykrywalności q , od 0.0 do 1.0, oraz redukcji kontaktów f , od redukcji o 100% do braku redukcji. Na podstawie wyników symulacji wybraliśmy te pary wartości parametrów q i f , które w co najmniej 50% symulacji dawały liczbę osób zdiagnozowanych odpowiadającą rzeczywistej liczbie, dla danych do dnia 19/04/2020.

Lower Silesian Voivodeship

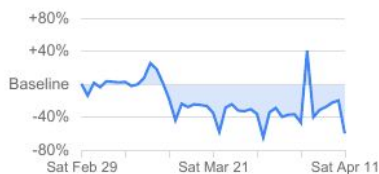
Retail & recreation

-76% compared to baseline



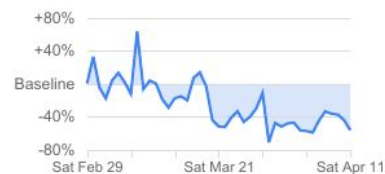
Grocery & pharmacy

-60% compared to baseline



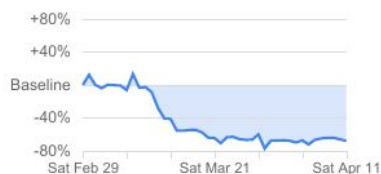
Parks

-56% compared to baseline



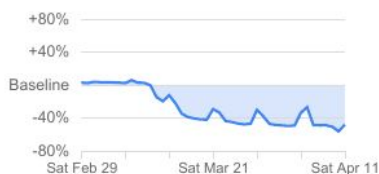
Transit stations

-68% compared to baseline



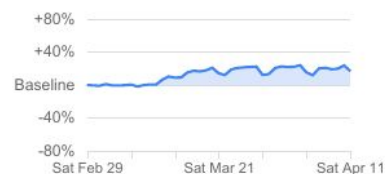
Workplace

-48% compared to baseline



Residential

+17% compared to baseline



Rysunek 2: Zmiany w mobilności dla Dolnego Śląska wg. raportów Google [5].

Wnioski z Rysunków 1-2:

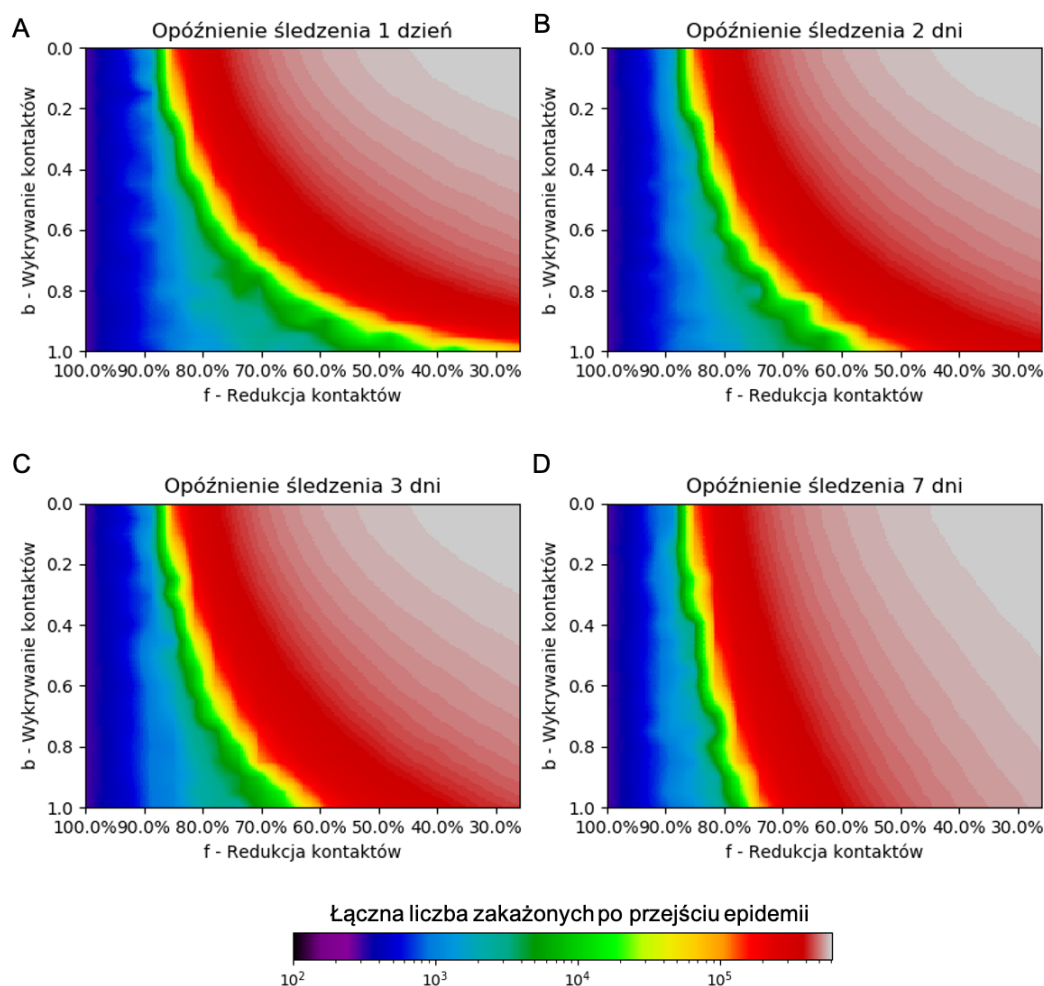
- Epidemia na Dolnym Śląsku wchodzi na linię krytyczną, trend zmian wskazuje na to, że jest szansa na opuszczenie regionu nadkrytycznego.
 - Mobilność na Dolnym Śląsku związana z aktywnością o dużym ryzyku licznych kontaktów społecznych spadła o 60-76%.
 - Najbardziej prawdopodobne konfiguracje modeli sugerują, że poziom wykrywalności przypadków o łagodnym przebiegu znajduje się w zakresie 20-55%.
 - Choć sam kierunek zmian jest pozytywny, jest jeszcze zdecydowanie za wcześnie na rezygnację z ograniczenia kontaktów. Nadal najbardziej prawdopodobne pary parametrów wskazują, że epidemia na Dolnym Śląsku jest daleka od wygasania.
-

3. Scenariusze rozwoju epidemii i ich konsekwencje

3.1 Analiza wpływu opóźnienia śledzenia kontaktów na łączną liczbę zakażonych

W tej części analizujemy jaki wpływ na rozwój epidemii ma procedura śledzenia kontaktów, tzn. osób, z którymi osoba zakażona była w styczności i mogła je również zakażać. Przyjmujemy, że śledzenie kontaktów składa się z dwóch etapów: 1) znalezienia kontaktów i poddania ich domostw kwarantannie oraz 2) przeprowadzenie testów, a na każdy z tych etapów przypada połowa **czasu opóźnienia**. Po udanym wykryciu proces jest powtarzany w celu znalezienia kontaktów dalszego rzędu.

Poniżej przedstawiamy wpływ czasu opóźnienia w śledzeniu kontaktów na łączną liczbę zakażonych po zakończeniu epidemii na podstawie wyników symulacji dla Wrocławia.

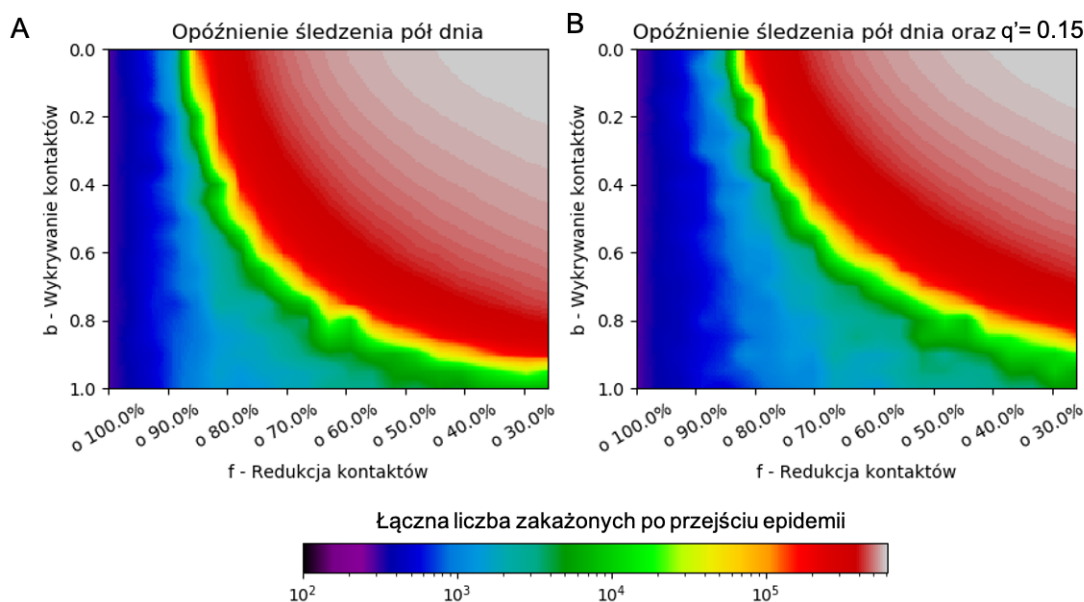


Rysunek 3: Całkowita liczba zakażonych w zależności od prawdopodobieństwa wykrycia kontaktów b (oś pionowa), stopnia redukcji kontaktów f (oś pozioma) oraz średniego opóźnienia śledzenia kontaktów A) o 1 dzień, B) o 2 dni, C) o 3 dni, D) o 7 dni. Na każdym panelu granica koloru zielonego i żółtego (odpowiadająca łącznej liczbie 50 000 zakażonych, przy populacji Wrocławia ok. 650 tys.) oddziela stan wzrostu epidemii (znajdujący się w rejonie po prawej od tej granicy) od stanu wygasania epidemii (w rejonie po lewej od granicy).

Wnioski z Rysunku 3

- Powinno się bezwzględnie dążyć do zmniejszenia opóźnienia w śledzeniu kontaktów, gdyż każdy dzień zwłoki istotnie zwiększa liczbę zakażeń.
- Nawet nieznaczne oddalenie się od granicy stanów epidemii w stronę epidemii rosnącej skutkuje znacznym zwiększeniem łącznej liczby osób zakażonych.
- Nawet nieznaczne oddalenie się od granicy stanów epidemii w stronę epidemii wygasającej skutkuje znacznym obniżeniem łącznej liczby osób zakażonych.

Poniższa analiza rozpatruje **wpływ dodatkowego (poza śledzeniem kontaktów) wykrywania osób o lekkim przebiegu choroby COVID-19. Prawdopodobieństwo wykrycia takich lekkich przypadków oznaczamy q' .**



Rysunek 4: Porównanie całkowitej liczby zakażonych przy śledzeniu kontaktów z opóźnieniem o pół dnia (A) oraz dodatkowym wykrywaniem lekkich przypadków na poziomie $q' = 0.15$ (B) w zależności od prawdopodobieństwa wykrycia kontaktów b (oś pionowa) i stopnia redukcji kontaktów f (oś pozioma). Obliczenia wykonane za pomocą modelu fazy III na populacji Wrocławia. Na każdym panelu granica koloru zielonego i żółtego (odpowiadająca łącznej liczbie 50 000 zakażonych, przy populacji Wrocławia ok. 650 tys.)

oddziela stan wzrostu epidemii (znajdujący się w regionie po prawej od tej granicy) od stanu wygasania epidemii (w rejonie po lewej od granicy).

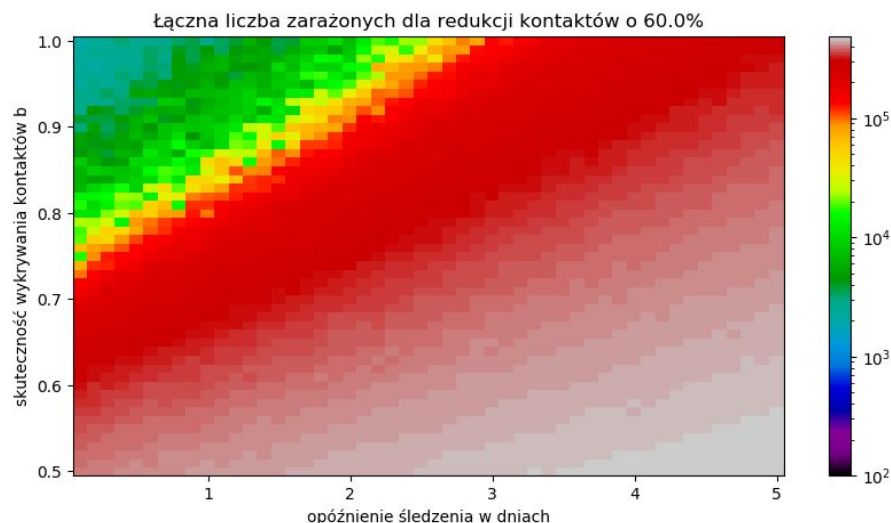
Wniosek z Rysunku 4

- Dodatkowe wykrywanie lekkich przypadków nawet z małym prawdopodobieństwem $q'=0.15$, pozwala na przesunięcie stanu niezmiennej epidemii w prawo, jednocześnie powiększając liczbę par parametrów b i f , dla których epidemia osiąga stan wygasania.

3.2 Analiza wpływu skuteczności wykrywania kontaktów na łączną liczbę zakażonych

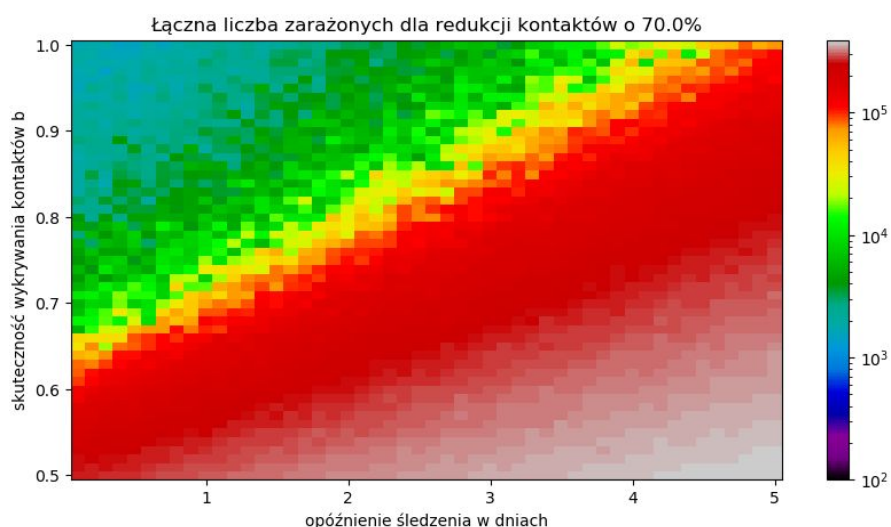
W tej części analizujemy wpływ zastosowania mechanizmu śledzenia kontaktów przy ustalonym poziomie redukcji kontaktów społecznych, ale różnym poziomie opóźnienia w śledzeniu (czasu od momentu osoby, która miała kontakt z wykrytym przypadkiem, do poddania jej kwarantannie) oraz różnej skuteczności wykrywania kontaktów.

Przyglądamy się scenariuszom redukcji o 60%, o 70% oraz o 80%. Na każdym panelu obszar żółty odpowiada łącznej liczbie 50 000 zakażonych, (przy populacji Wrocławia ok. 650 tys.) oddziela stan wzrostu epidemii (znajdujący się w regionie po prawej od tej granicy) od stanu wygasania epidemii (w rejonie po lewej od granicy). Obszar czerwony wykresu oznacza, że epidemia pozostaje w stanie wzrastania, obszar zielony, niebieski i fioletowy oznaczają różne stadia stanu wygasania.

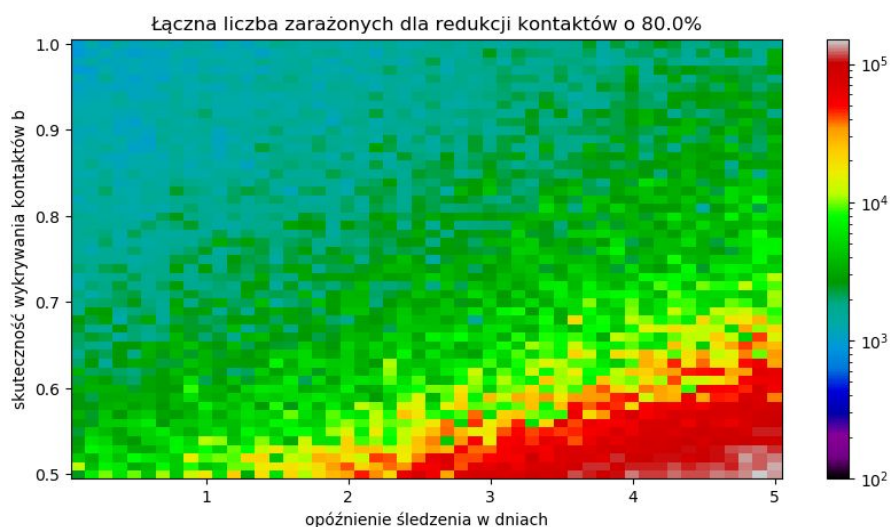


Rysunek 5: Łączna liczba zarażonych przy ustalonej redukcji kontaktów społecznych o 60% w zależności od opóźnienia we wszczęciu procedury śledzenia kontaktów w dniach (oś pozioma) i skuteczności tej procedury (oś pionowa). Kolor żółty odpowiada granicy pomiędzy obszarami

podkrytycznym (kolory zielony do fioletowego) i nadkrytycznym (kolory od pomarańczowego do białego).



Rysunek 6: Łączna liczba zarażonych przy ustalonej redukcji kontaktów społecznych o 70% w zależności od opóźnienia we wszczęciu procedury śledzenia kontaktów w dniach (oś pozioma) i skuteczności tej procedury (oś pionowa). Kolor żółty odpowiada granicy pomiędzy obszarami podkrytycznym (kolory od zielonego do fioletowego) i nadkrytycznym (kolory od pomarańczowego do białego).



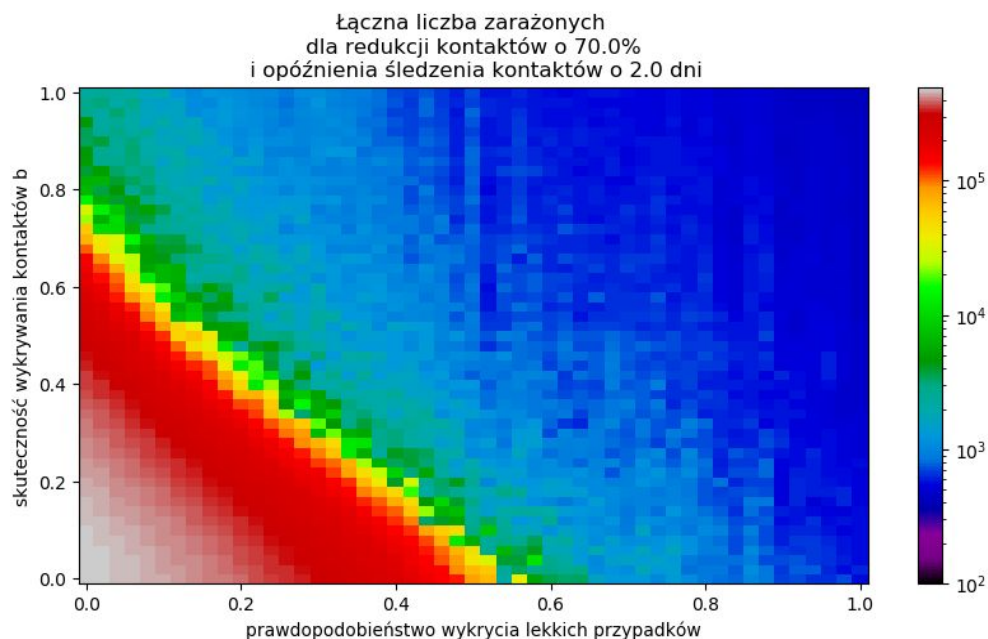
Rysunek 7: Łączna liczba zarażonych przy ustalonej redukcji kontaktów społecznych o 80% w zależności od opóźnienia we wszczęciu procedury śledzenia kontaktów w dniach (oś pozioma) i skuteczności tej procedury (oś pionowa). Kolor żółty odpowiada granicy pomiędzy obszarami podkrytycznym (kolory od zielonego do fioletowego) i nadkrytycznym (kolory od pomarańczowego do białego).

Wnioski z Rysunków 5-7

- Przy redukcji kontaktów społecznych o 60%-70%, czyli przy poziomie podobnym do obecnie obserwowanego na Dolnym Śląsku, przejście do fazy wygasania epidemii może nastąpić tylko przy wysokiej skuteczności procedury śledzenia kontaktów osób zdiagnozowanych oraz przy najmniejszym możliwym opóźnieniu we wszczęciu tej procedury względem momentu postawienia diagnozy.
 - Wysoka redukcja kontaktów społecznych zwiększa margines czasu na rozpoczęcie procedury śledzenia i dotarcie do kontaktów osób zakażonych oraz ich izolację.
 - Niezależnie od poziomu redukcji kontaktów, istotne jest skuteczne i szybkie wykrywanie kontaktów osób zakażonych.
-

3.3 Analiza wpływu skuteczności śledzenia kontaktów i wykrywania lekkich przypadków na łączną liczbę zakażonych

W tej części analizy przyjmujemy możliwe do osiągnięcia założenia o redukcji kontaktów o 70% oraz opóźnieniu we wszczęciu procedury śledzenia kontaktów o 2 dni. Prezentujemy jaki wpływ na łączną liczbę zakażonych ma skuteczność procedury wykrywania kontaktów oraz prawdopodobieństwo wykrycia lekkich przypadków.



Rysunek 8: Łączna liczba zakażonych osób przy ustalonej redukcji kontaktów o 70% oraz opóźnieniu śledzenia kontaktów o 2 dni w zależności od skuteczności wykrywania kontaktów (oś pionowa) oraz prawdopodobieństwa wykrycia lekkich przypadków (oś pozioma). Kolor żółty

odpowiada granicy pomiędzy obszarami podkrytycznym (kolory od zielonego do fioletowego) i nadkrytycznym (kolory od pomarańczowego do białego).

Wnioski z Rysunku 8:

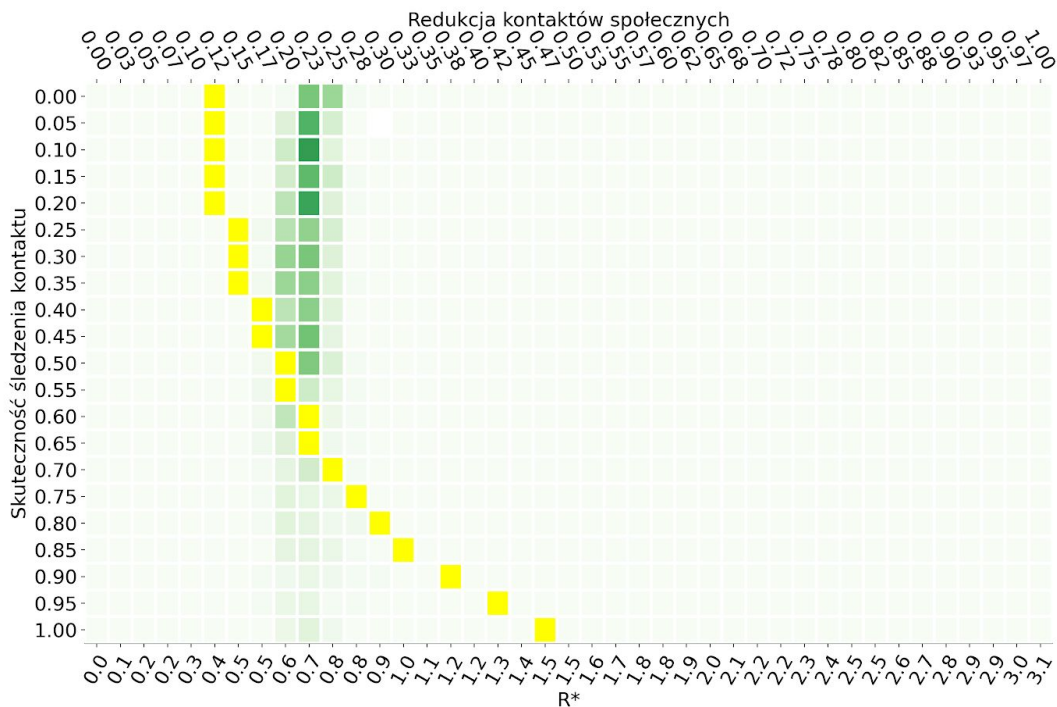
- Wysoka skuteczność wykrywania kontaktów w połączeniu z wysokim prawdopodobieństwem wykrywania lekkich przypadków są niezbędne aby epidemia wygasła, przy jednoczesnym małym podkręceniu redukcji kontaktów i przykręceniu opóźnienia w śledzeniu kontaktów.
-

3.4 Analiza dynamiki wirusa na Dolnym Śląsku

Podobnie jak w rozdziale drugim, przeprowadziliśmy analizę polegającą na dopasowaniu parametrów symulacji do bieżącej sytuacji w oparciu o dane dotyczące przebiegu liczby zdiagnozowanych przypadków zgodnie z danymi publikowanymi przez Wojewódzki Urząd Wojewódzki do dnia 20.04.2020.



Rysunek 9A: Zmiana liczby zdiagnozowanych osób na terenie Dolnego Śląska według statystyk z wikipedii (dane od 2.03.2020 do 8.04.2020) oraz statystyk udostępnionych na stronie Dolnośląskiego Urzędu Wojewódzkiego (dane od 9.04.2020 do 19.04.2020).



Rysunek 9B: Mapa prawdopodobieństw par parametrów dla stanu epidemii COVID-19 na Dolnym Śląsku przy dwudniowym opóźnieniu śledzenia kontaktów. Na osi poziomej górnej przedstawiono stopień redukcji kontaktów społecznych, a na osi poziomej dolnej odpowiadające im ilości zakażeń poza gospodarstwem domowym R^* . Na osi pionowej - skuteczność śledzenia kontaktów b . Intensywność koloru odpowiada wiarygodności par parametrów względem rzeczywistej liczby odnotowanych zachorowań na Dolnym Śląsku. Krzywa wyznacza granicę pomiędzy obszarem pod-krytycznym (po lewej) i obszarem nad-krytycznym (po prawej).

Rysunek 9B różni się od Rysunku 1B rozpatrywanymi parametrami. Na rysunku 1B nie uwzględniono czynnika śledzenia kontaktów (założono $b=0$), zaś na Rysunku 9B nie uwzględniono czynnika niezależnego diagnozowania przypadków o lekkim przebiegu (założono $q=0$)

Wnioski z Rysunku 9:

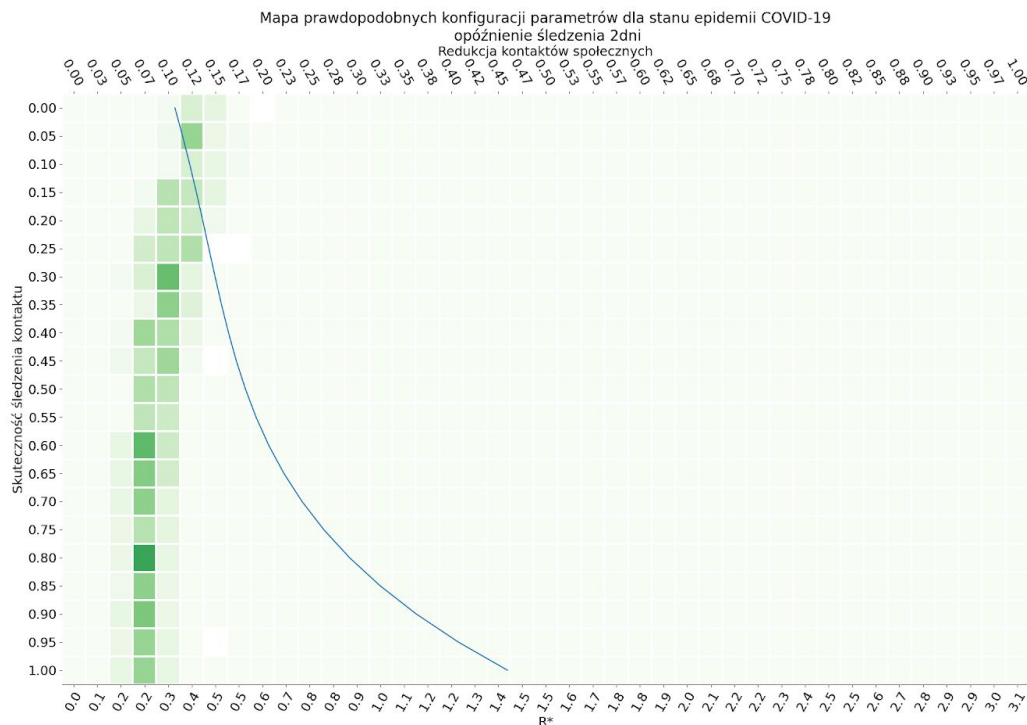
- Większość par parametrów z niezerową wiarygodnością zlokalizowanych jest powyżej linii krytycznej, to znaczy że z dużym prawdopodobieństwem stan obecny dla Dolnego Śląska znajduje się w fazie nadkrytycznej (choć blisko granicy fazy nadkrytycznej)
- Dopasowane dane wskazują zgodnie, że wartość redukcji kontaktów mieści się w przedziale od "o 75%" do "o 80%".

3.5 Analiza dynamiki wirusa we Wrocławiu

Przeprowadzono podobną analizę jak w poprzednim rozdziale dla populacji miasta Wrocław, dopasowując przebieg krzywych do liczby zdiagnozowanych dla miasta Wrocław podawanych na stronie Wojewódzkiego Urzędu Wojewódzkiego.



Rysunek 10A: Zmiana liczby zdiagnozowanych osób na terenie Wrocławia według statystyk udostępnionych na stronie Dolnośląskiego Urzędu Wojewódzkiego oraz facebooku Dolnośląskiego Urzędu Wojewódzkiego



Rysunek 10B: Mapa wiarygodności dla par redukcji kontaktów i skuteczności śledzenia kontaktu dla stanu epidemii COVID-19 we Wrocławiu przy dwudniowym opóźnieniu śledzenia kontaktów. Na osi poziomej górnej przedstawiono stopień redukcji kontaktów społecznych, a na osi poziomej dolnej odpowiadające im ilości zakażeń poza gospodarstwem domowym R^* . Na osi pionowej - skuteczność śledzenia kontaktów b. Intensywność koloru odpowiada wiarygodności par parametrów względem rzeczywistej liczby odnotowanych zachorowań we Wrocławiu. Krzywa wyznacza granicę pomiędzy obszarem pod-krytycznym (po lewej) i obszarem nad-krytycznym (po prawej).

Wnioski z Rysunku 10:

- Sytuacja dla miasta Wrocławia jest wyraźnie lepsza niż dla Dolnego Śląska.

3.6 Omówienie znaczenia grupy ignorującej restrykcje

Badania sondażowe pokazują, że zdecydowana większość obywateli jest skłonna poddawać się zaleceniom władz, również zaleceniom restrykcyjnym dotyczącym kontroli zachowań i ograniczenia swobód. Mniejsze poparcie dla restrykcji wykazują mężczyźni oraz grupy poniżej 30 r. życia.

W celu przeanalizowania tego zjawiska przeprowadzono symulacje modelu, w którym rozróżniono dwie podpopulacje. W mniejszej podpopulacji założono, że osoby mniej redukują kontakty, zaś w większej podpopulacji restrykcje są wypełniane wzorowo. Przekłada się to w

modelu na to, że osoby, które ignorują restrykcje nawiązują kontakty częściej. Co więcej, kontakty te są częściej czynione z osobami, które również mają tendencje do ignorowania restrykcji (wprost proporcjonalnie do częstotliwości kontaktów społecznych, które te osoby realizują).



Rysunek 11: Całkowita liczba osób zakażonych w zależności od stopnia redukcja kontaktów w grupie osób mniej przestrzegającej restrykcji oraz % populacji należącej do tej grupy. Założono prawdopodobieństwo wykrywania przypadków o łagodnym przebiegu na realistycznym poziomie $q=0.3$ oraz średnią redukcję kontaktów w całej populacji "o 85%". Kolor ciemnoniebieski (ok. 50 tys.) odpowiada stanowi endemicznemu epidemii (linii krytycznej).

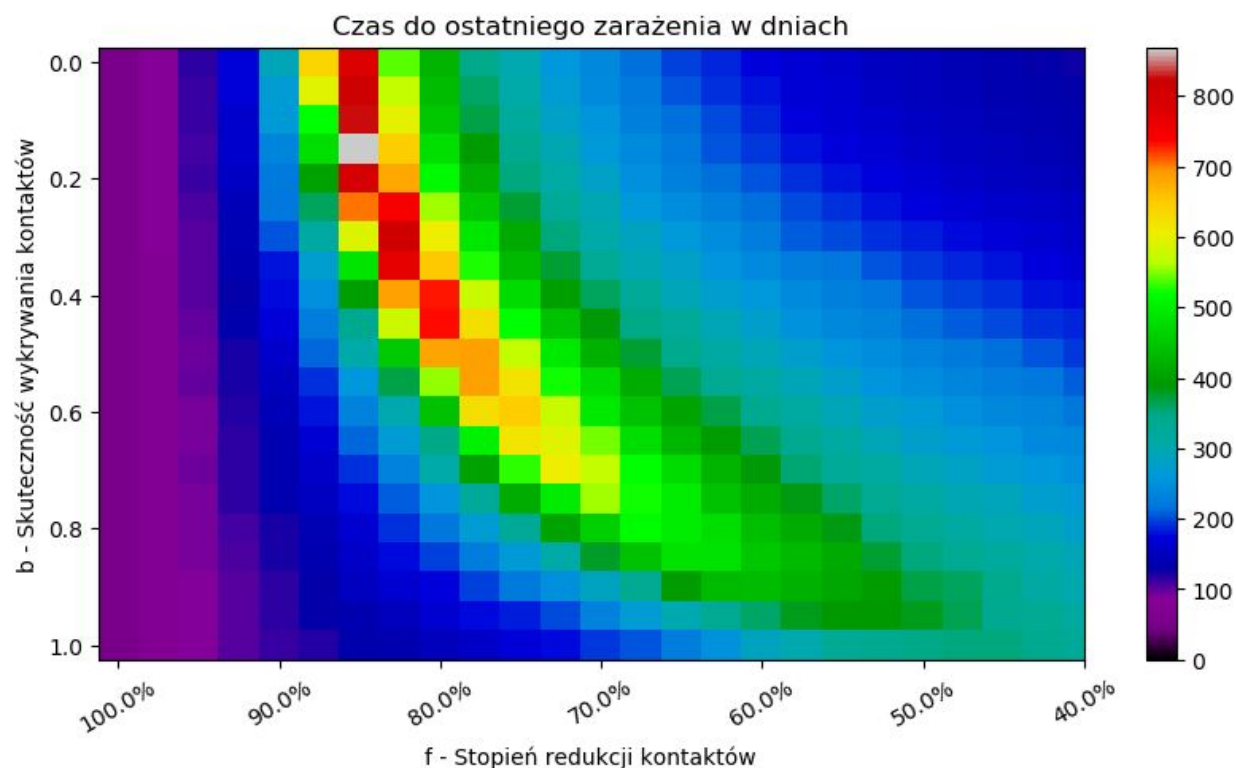
Wnioski z Rysunku 11:

- Jeżeli grupa osób nie przestrzegających restrykcji będzie duża, to pomimo tego, że średnia redukcja kontaktów w całej populacji będzie na poziomie "o 85%", epidemia przejdzie w stan nadkrytyczny.
- Szczególny apel należy wystosować do osób, które jeszcze nie respektują zaleceń, aby zaczęły ich przestrzegać.

3.7 Kiedy skończy się epidemia

Na czas zakończenia epidemii składa się wiele czynników. W trakcie rozwoju epidemii sytuacja może zmieniać się dynamicznie, i od działań władz oraz społeczeństwa zależy kierunek tej

sytuacji. W uproszczonym modelu zakładającym, że parametry opisujące rozwój epidemii są niezmiennie, liczba dni do ostatniego zakażenia, w zależności od parametru skuteczności wykrywania kontaktów oraz redukcji kontaktów o ustalony zakres, wygląda następująco.



Rysunek 12: Liczba dni do ostatniego zakażenia w zależności od stopnia redukcji kontaktów oraz skuteczności wykrywania kontaktów dla ustalonego opóźnienia procedury śledzenia kontaktów wynoszącego 2 dni oraz prawdopodobieństwa niezależnego wykrywania przypadków o lekkim przebiegu 0%.

Wnioski z Rysunku 12:

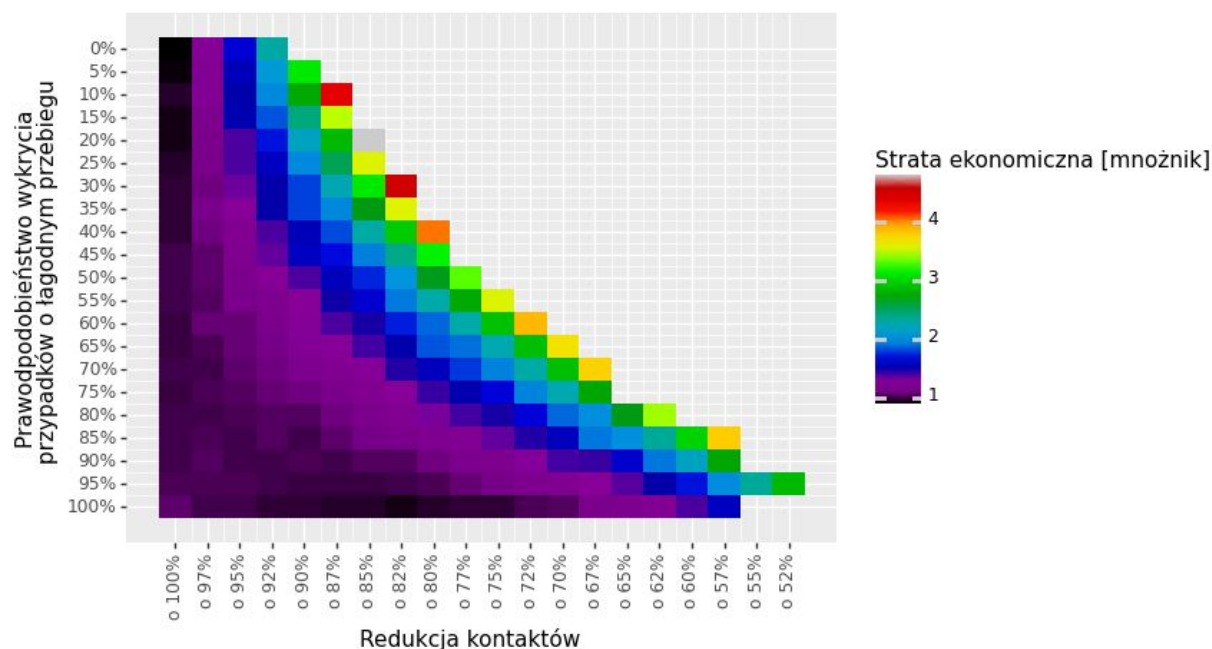
- Czas do ostatniego zakażenia zależy w dużym stopniu od odległości od obszaru krytycznego, który charakteryzuje przejście fazowe między epidemią podkrytyczną i nadkrytyczną. Krótki czas do zakończenia epidemii (zdefiniowany jako ostatni raz, gdy dochodzi do nowego zakażenia) można osiągnąć tylko przy wysokich wartościach redukcji kontaktu lub bardzo wysokim wskaźniku skuteczności procedury śledzenia kontaktów. W drugim przypadku nadal potrzebna jest pewna redukcja kontaktów społecznych. Na rys. 12 przyjęto, że opóźnienie czasowe dla każdego kroku w śledzeniu kontaktów wynosi 2 dni. Gdyby to opóźnienie było mniejsze, całkowity czas trwania epidemii najprawdopodobniej również by się skrócił.
-

4. Koszty ekonomiczne

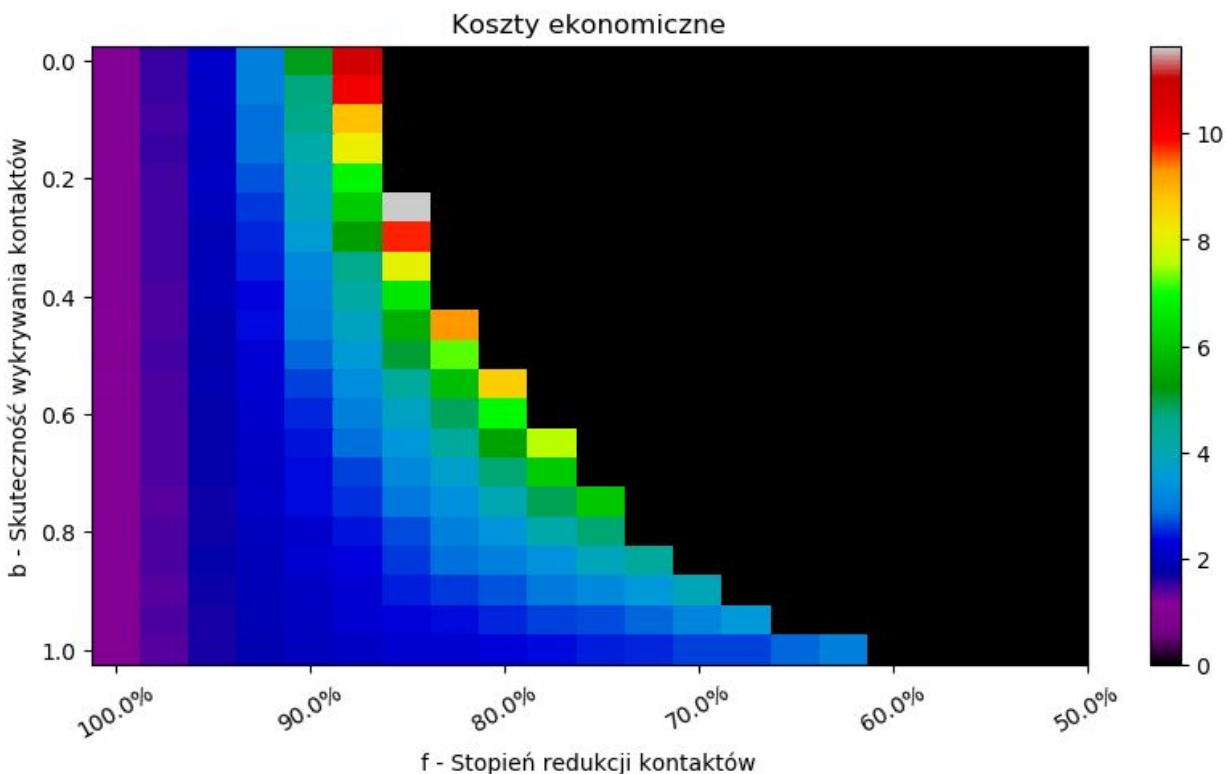
4.1 Oszacowanie kosztów ekonomicznych epidemii

W tej sekcji omawiamy wstępne wyniki analizy wpływu restrykcji wdrożonych na czas epidemii na sytuację ekonomiczną we Wrocławiu. Epidemia jest procesem rozciągniętym w czasie; na przykładzie miasta Wuhan w Chinach wiemy, że środki zaradcze tam zastosowane pozwoliły na wygaszenie epidemii po okresie ok. 2.5 miesiąca. Ilość kontaktów oraz prawdopodobieństwo wykrycia przypadków o łagodnym przebiegu wpływają na czas trwania epidemii, a zmniejszenie liczby kontaktów oraz zwiększenie prawdopodobieństwa wykrycia zwiększają szanse na skrócenie tego czasu.

Celem analizy jest obliczenie strat ekonomicznych wynikających z zamrożenia ekonomii na czas trwania epidemii. Czynimy uproszczone założenie, że koszty ekonomiczne są proporcjonalne do stopnia redukcji kontaktów, tzn. redukcja kontaktów społecznych o 75% niesie za sobą straty ekonomiczne na poziomie 75%. Zatem całkowite koszty ekonomiczne są równe stopniowi redukcji kontaktów pomnożonemu przez ilość dni do wygaśnięcia epidemii. Do wyznaczenia czasu trwania epidemii przyjmujemy kryterium, że muszą minąć pełne 2 tygodnie bez nowych detekcji wirusa abyśmy uznali epidemię za wygaszoną.



Rysunek 13: Mapa kosztów ekonomicznych w zależności od stopnia redukcji kontaktów i prawdopodobieństwa wykrycia przypadków o łagodnym przebiegu.



Rysunek 14: Mapa kosztów ekonomicznych w zależności od stopnia redukcji kontaktów i skuteczności wykrywania kontaktów f dla ustalonego opóźnienia procedury śledzenia kontaktów wynoszącego 2 dni oraz braku niezależnego wykrywania przypadków o lekkim przebiegu.

Wnioski z Rysunku 13 i 14:

- Mniej restrykcyjne ograniczenia kontaktów społecznych mogą nieść za sobą **mniejsze dzienne** straty ekonomiczne ale **większe koszty całkowite** z powodu rozciągnięcia epidemii w czasie.

4.2 Scenariusz zmiany współczynnika redukcji kontaktów

W naszym drugim eksperymencie założyliśmy, że znajdujemy się w pewnym stanie pod-krytycznym epidemii przy ograniczonej liczbie kontaktów społecznych. Aby pobudzić aktywność ekonomiczną rozważamy przejście do stanu, w którym restrykcje są rozluźnione na tyle, by uzyskać określony cel ekonomiczny, ale nie wyjść z obszaru podkrytycznego epidemii. Celem analizy jest zbadanie jakie skutki ekonomiczne ma zmniejszenie poziomu restrykcji oraz moment, w którym ta zmiana nastąpi. Zakładamy ponadto, że straty ekonomiczne są proporcjonalne do stopnia redukcji kontaktów, tzn. redukcja kontaktów społecznych o 75% niesie za sobą straty ekonomiczne na poziomie 75%.

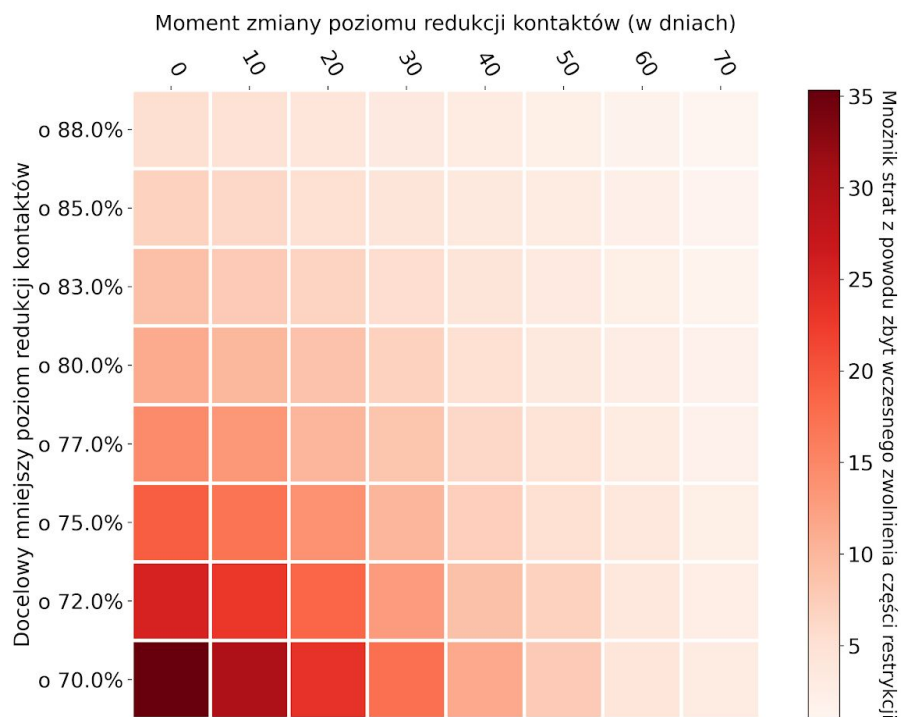
Przyjęty w analizie stan początkowy jest bardzo zachowawczy - kontakty są ograniczone o 90% ($R=0.316$), a prawdopodobieństwo wykrywania przypadków o łagodnym przebiegu wynosi 0.7. Liczba zakażonych w stanie początkowym wynosi 1000 osób.

Przeprowadzona analiza pozwoliła określić stratę względną wynikającą z rozluźnienia ograniczenia kontaktów. Rozważamy jedynie takie rozluźnienia ograniczeń, które nie spowodują wyjścia epidemii z obszaru podkrytycznego. Prawdopodobieństwo wykrycia przypadków o łagodnym przebiegu pozostawiamy na poziomie 0.7.

Całkowite koszty ekonomiczne w tym uproszczonym modelu, będącym jedynie przybliżeniem rzeczywistości, jest wyrażona jako iloczyn czasu i redukcji kontaktów, to znaczy, że jeżeli przez 30 dni jesteśmy w stanie redukcji o 90% i pozostałe 60 dni (do momentu ostatniego zakażenia) w stanie redukcji o 70%, to całkowity "koszt ekonomiczny" wyniesie:

$$30 \cdot 70\% + 60 \cdot 90\% = 75$$

Przedstawiony wynik jest w postaci znormalizowanej, co znaczy, że podzielono wszystkie wartości na rysunku tak, aby najmniejsza wartość wynosiła 1 (najmniejsza wartość przyjmowana jest w prawym górnym rogu, co odpowiada przejściu w 70 dniu do docelowej wartości redukcji kontaktów "o 88%").



Rysunek 15: Koszty ekonomiczne poniesione przy poluzowaniu redukcji kontaktów “o 90%” do wartości wskazanej na osi pionowej oraz w zależności od momentu wprowadzenia zmiany (wyrażonej w dniach; na osi poziomej).

Wnioski z Rysunku 15:

- Zalecane jest uwzględnienie możliwego wydłużenia czasu trwania epidemii przy kompleksowej ocenie długoterminowych skutków ekonomicznych wynikającego z rozluźnienia restrykcji w kontaktach społecznych.
-

5. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, że na dzień 19.04.2020 na Dolnym Śląsku epidemia znajduje się w pobliżu linii krytycznej. Od początku kwarantanny udało się ograniczyć kontakty społeczne o ok. 60-78%. Spośród osób zakażonych wirusem, ale przechodzących chorobę z łagodnymi objawami (nie wymagającymi hospitalizacji), wykrywane jest ok. 20-50% przypadków.

Celem naszych rekomendacji jest przede wszystkim sprowadzenie epidemii do stanu wygasania (*podkrytycznego*) i utrzymania epidemii w tym stanie, aż do jej całkowitego wygaśnięcia, aby obniżyć ryzyko zapaści służby zdrowia, a ponadto by zredukować liczbę zachorowań i zgonów spowodowanych wirusem. W tym celu rekomendujemy:

- utrzymanie ograniczenia kontaktów międzyludzkich i innych środków zapobiegawczych,
- zwiększenie efektywności śledzenia historii kontaktów osób zakażonych oraz poddawania kwarantannie lub izolacji osób, które miały kontakt z zarażonymi,
- zwiększanie poziomu testowania i wykrywalności wirusa u osób z łagodnymi objawami.

Przeprowadzone analizy dają nam podstawy sądzić, że dopiero równoległe wdrożenie powyższych trzech rekomendacji pozwoli na wyeliminowanie epidemii.

Potencjalnym ryzykiem jest możliwość dokonania nadinterpretacji znaczenia spadającej liczby zachorowań. Aby rozluźnić restrykcje stan epidemii powinien być znacznie poniżej linii krytycznej. Zwiększenie współczynnika R^* w obszarze podkrytycznym może być negatywne w skutkach. Nawet jeśli sytuacja gospodarcza ulegnie poprawie w ujęciu dziennym, może nie mieć to przełożenia w dłuższej perspektywie.

Zalecamy, aby ludzie wciąż podążali za regulacjami bezpieczeństwa, unikali odwiedzania znajomych i rodziny, aby utrzymać współczynnik R^* na możliwie niskim poziomie. Naturalnym psychologicznym odruchem jest to, że ludzie widząc przyrost zachorowań stają się ostrożni i zostają w domu. Natomiast na przeciwnym biegunie jest sytuacja, kiedy liczby nowych wykrytych przypadków i zgonów spadają - uspokaja to ludzi i sprzyja podejmowaniu pochopnych decyzji o zbyt szybkim zaprzestaniu samoograniczenia. Jest to swoista pułapka psychologiczna i efekt myślenia życzeniowego.

Choć analiza pokazuje trend przesuwania się epidemii w kierunku stanu wygasania, z naszych analiz wynika, że w chwili obecnej zniesienie ograniczeń kontaktów społecznych może doprowadzić do wzrostu liczby zakażeń.

Bibliografia:

- [1] Komunikat dot. aktualnej sytuacji epidemiologicznej COVID nr 3
<https://gis.gov.pl/aktualnosci/komunikat-dot-aktualnej-sytuacji-epidemiologicznej-covid-19-nr-3-warszawa-17-kwietnia-2020-r-opracowano-na-podstawie-danych-who-ecdc-cdc/> [dostęp: 20.04.2020]
- [2] Prognoza gospodarstw domowych na lata 2016-2050
<https://stat.gov.pl/en/topics/population/population-projection/household-projection-for-the-years-2016-2050.3.4.html> [dostęp: 20.04.2020]
- [3] Ludność. Stan i struktura w przekroju terytorialnym (stan w dniu 30.06.2019)
<https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/ludnosc/ludnosc/ludnosc-stand-i-struktura-w-przekroju-terytorialnym-stand-w-dniu-30-06-2019.6.26.html> [dostęp: 20.04.2020]
- [4] B. Adamik, M. Bawiec, V. Bezborodov, W. Bock, M. Bodych, J. P. Burgard, T. Goetz, T. Krueger, A. Migalska, B. Pabjan, T. Ożanski, E. Rafajłowicz, W. Rafajłowicz, E. Skubalska-Rafajłowicz, S. Ryfczyńska, E. Szczurek, P. Szymanski. Mitigation and herd immunity strategy for COVID-19 is likely to fail. *MedRxiv*
<https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.03.25.20043109v1.full.pdf+html>
- [5] Raport Google dotyczący zmian w trendach mobilności
<https://www.google.com/covid19/mobility/>